

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**ВЕСТНИК
конференции молодых ученых
СПбГУ ИТМО**

Сборник научных трудов

Том 2



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2004**

Выпуск содержит материалы I конференции молодых учёных Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Конференция была проведена 16–19 февраля 2004 г. Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель

Ректор СПбГУ ИТМО, д.т.н., профессор **В.Н. Васильев**

Сопредседатели

Проректор по развитию, д.т.н., проф. **В.О. Никифоров**
Проректор по УО и АР, д.ф.-м.н., проф. **Ю.Л. Колесников**
Декан факультета ППО, д.т.н., проф. **В.Л. Ткалич**

Члены программного комитета

Д.ф.-м.н., проф. **В.Г. Беспалов**, д.т.н., проф. **Д.Д. Куликов**, д.т.н., проф. **В.М. Мусалимов**, д.т.н., проф. **А.А. Ожиганов**, д.т.н., проф. **Э.С. Путилин**, д.ф.-м.н., проф. **В.С. Сизиков**, д.т.н., проф. **А.М. Скворцов**, д.т.н., проф. **С.К. Стафеев**, д.т.н., проф. **В.А. Тарлыков**, д.т.н., проф. **Е.Б. Яковлев**, к.ф.-м.н., доц. **А.А. Андреева**, к.т.н., доц. **Н.Н. Горлушкина**, к.т.н., доц. **Л.А. Губанова**, к.т.н., доц. **Н.Ф. Гусарова**, к.ф.-м.н., доц. **А.А. Королёв**, к.т.н., доц. **Б.А. Крылов**, к.т.н., доц. **М.Я. Марусина**, к.т.н., проф. **Б.С. Падун**, к.ф.-м.н., доц. **О.А. Приходько**, к.ф.н., доц. **В.Н. Садовников**, к.т.н., доц. **Б.Д. Тимченко**

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель

Зам. проректора по НР **Л.М. Студеникин**

Зам. председателя

К.т.н., доц. **В.И. Соловьёв**

Члены организационного комитета

П.А. Белов, **К.В. Богданов**, **Н.Ф. Гусарова**, **А.А. Зинчик**, **Л.Н. Казар**, **А.В. Козаченко**, **А.Г. Метляков**, **М.В. Никитина**, **Д.В. Осипов**, **А.Ю. Прокопенко**, **Т.А. Прудентова**, **К.А. Сергеев**, **Т.В. Точилина**, **В.Н. Фролков**, **Р.А. Халецкий**, **Д.Г. Штенников**

ISBN 5-7577-0150-1

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики,
2004

ОТЫСКИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕС С НЕСИММЕТРИЧНЫМИ
ЗУБЬЯМИ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОТСУТСТВИЕ ЗАОСТРЕНИЯ
И ПОДРЕЗАНИЯ

Д. А. Фролов

Научный руководитель – д.т.н., проф. Б. П. Тимофеев

Качество зубчатой передачи характеризуют несколько геометрических показателей, которые должны быть проверены в ходе расчета. К таким показателям относятся заострение зубьев и подрезание зубьев, рассматриваемые как виды интерференции в станочном зацеплении. Во многих работах отечественных ученых исследованы вопросы заострения и подрезания зубьев зубчатых колес с симметричным зубом. В данной работе рассматривается этот вопрос применительно к зубчатым колесам с несимметричным зубом. Определены предельные величины угла профиля α_2 при $\alpha_1=20^\circ$ и $\alpha_1=25^\circ$ при соблюдении высотных параметров стандартного исходного реечного контура, а также представлены значения наименьшего числа зубьев зубчатого колеса с коэффициентом смещения $x=0$ при станочном зацеплении с исходной производящей рейкой для значений углов профилей, отличных от стандартного $\alpha=20^\circ$.

Введение

Две стороны зуба зубчатого колеса функционально различны для большинства механизмов. Либо рабочая нагрузка на одном профиле значительно выше, чем на другом, либо нагрузка одинакова, но используется для одного из профилей в течение существенно более длительного периода времени. И в том, и в другом случае несимметричный зуб может обеспечить одинаковый срок службы по обеим сторонам. Главная выгода применения несимметричных зубьев состоит в повышении контактной прочности по мере увеличения угла профиля.

Применение несимметричных зубьев позволяет повысить несущую способность эвольвентных передач по контактной прочности и прочности на изгиб в основном направлении вращения за счет увеличения угла зацепления. Например, если исходить из расчета контактных напряжений по формуле Герца, контактные напряжения σ_n прямо пропорциональны $\operatorname{cosec}^{1/2} 2\alpha_w$. Это означает, что увеличение угла зацепления α_w с 20° до 30° , при прочих равных условиях, приведет к уменьшению контактных напряжений в 1,16 раза, что позволит увеличить передаваемую нагрузку более чем в 1,34 раза [1]. Из формулы по расчету толщины масляной пленки следует, что в полюсе зацепления она является функцией $\varphi = \sin^{1,15} \alpha_w \cos^{0,15} \alpha_w$. При прочих равных условиях увеличение угла зацепления α_w с 20° до 30° сопровождается увеличением толщины масляной пленки примерно в 1,5 раза [1]. Такой рост толщины масляной пленки, в свою очередь, приводит к образованию естественного демпфера колебаний в зацеплении, а также к увеличению долговечности передачи, к уменьшению тепловыделения и потерь на трение.

Нельзя забывать о негативной стороне повышения угла зацепления α_w . При том же крутящем моменте и межосевом расстоянии увеличение угла зацепления α_w приводит к увеличению радиальных сил, действующих на опоры.

К основным геометрическим показателям колес с несимметричными зубьями, обеспечивающих качественное зацепление, относятся: нормальная толщина на поверхности вершин и коэффициент наименьшего смещения. Проверка по этим показателям делается для того, чтобы избежать заострения или подрезания зубьев.

Отыскание толщины зуба на окружности вершин

В соответствии с [2] формула для определения нормальной толщины на поверхности вершин зубьев с симметричным профилем выглядит следующим образом:

$$S_{na} = d_a \cdot \left[\frac{\frac{\pi}{2} + 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{z} + \operatorname{inv} \alpha_t - \operatorname{inv} \alpha_a \right] \cdot \cos \beta_a ,$$

где d_a – диаметр вершин зубьев; x – коэффициент смещения; z – число зубьев; α – угол профиля; α_t – угол профиля (в торцовом сечении); β – угол наклона зубьев; α_a – угол профиля зуба в точке на окружности вершин ($\cos \alpha_a = \frac{d_b}{d_a}$, d_b – основной диаметр, равный $d \cdot \cos \alpha$); β_a – угол наклона линии вершины зуба ($\operatorname{tg} \beta_a = \frac{d_a}{d} \cdot \operatorname{tg} \beta$).

После преобразований получим формулу для расчета толщины зуба на окружности вершин зубьев прямозубого колеса с несимметричным профилем:

$$S_{na} = d_a \cdot \left[\frac{\pi}{2 \cdot z} + \frac{x}{z} (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) + \frac{\operatorname{inv} \alpha_{t1} - \operatorname{inv} \alpha_{a1}}{2} + \frac{\operatorname{inv} \alpha_{t2} - \operatorname{inv} \alpha_{a2}}{2} \right], \quad (1)$$

где α_1, α_2 – угол профиля для правой и левой сторон соответственно, α_{t1}, α_{t2} – угол профиля (в торцовом сечении) для правой и левой сторон соответственно, α_{a1}, α_{a2} – угол профиля зуба в точке на окружности вершин для правой и левой сторон соответственно.

Определение предельных величин α_2 при $\alpha_1=20^\circ$ и $\alpha_1=25^\circ$ при соблюдении высотных параметров стандартного исходного реечного контура

Под стандартными высотными параметрами исходного реечного контура [3] понимаются: коэффициент высоты головки зуба $h_a^* = 1,0$, коэффициент высоты ножки зуба $h_f^* = 1,0$, коэффициент граничной высоты $h_i^* = 2,0$, коэффициент радиального зазора $c^* = 0,25$. Предельные величины α_2 при $\alpha_1=20^\circ$ и $\alpha_1=25^\circ$ определены при построении (рис.1) из условия заострения зуба инструментальной рейки на прямой впадин. Из рис. 1. видно, что при $\alpha_1=20^\circ$ предельное значение $\alpha_2=42^\circ$, а при $\alpha_1=25^\circ$ предельное значение $\alpha_2=38^\circ$. При указанных значениях α_2 имеет место заострение зуба инструментальной рейки.

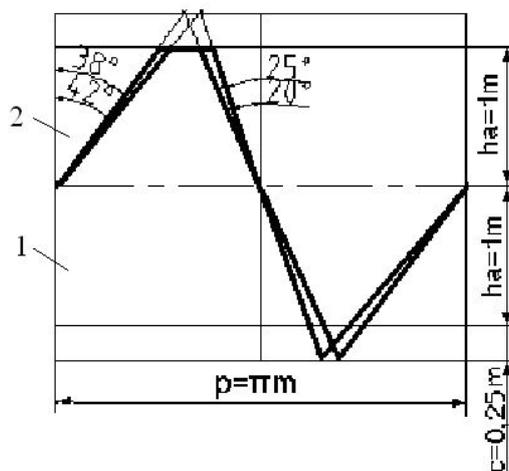


Рис. 1. Заострение зуба инструментальной рейки при $\alpha_1=20^\circ$ и $\alpha_1=25^\circ$: 1 – исходный контур, 2 – исходный производящий контур

Определение предельных значений α и x при различных значениях z (от 10 до 200), соответствующих началу заострения

На рис. 2 и 3 представлены графики для определения предельных значений α и x при различных значениях z (от 10 до 200), соответствующих началу заострения. На рис.2 представлены графики для значения $\alpha_1=20^\circ$ при изменении α_2 от 20° до 42° , для $z=10,15,20,30,50,75,100$ (при $z>100$ зубья не будут иметь заострения в указанных пределах коэффициентов смещений). На рис. 3 представлены графики для значения $\alpha_1=25^\circ$ при изменении α_2 от 25° до 38° , для $z=10,15,20,30,50,75$ (при $z>75$ зубья не будут иметь заострения в указанных пределах коэффициентов смещений). Максимальные значения α_2 взяты с учетом сохранения высотных параметров стандартного исходного реечного контура (рис. 1). Кривая на графике соответствует началу заострения. Каждая точка кривой представляет собой сочетание α_2 и x , при данных z , при которых существует заострение.

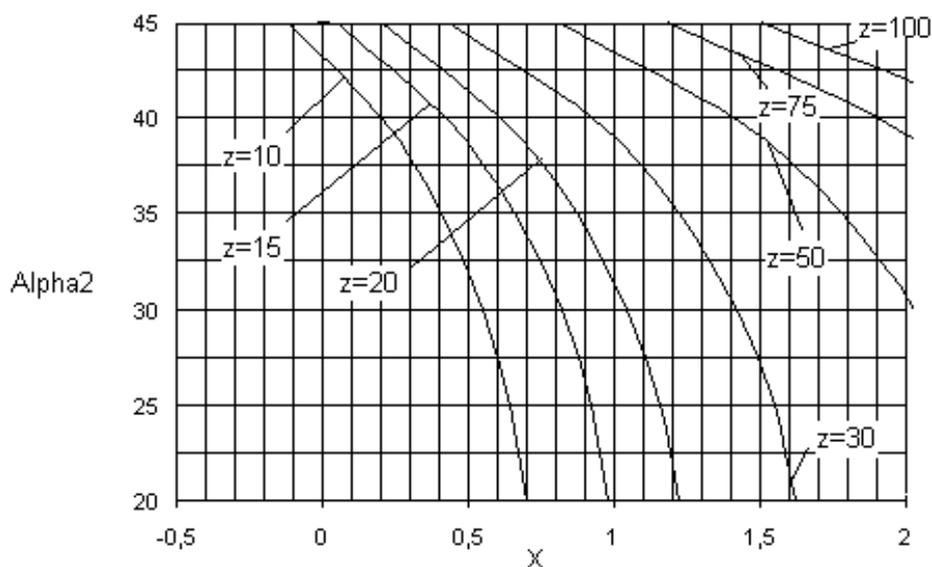


Рис. 2. Графики для определения предельных значений α и x при различных значениях z : для значения $\alpha_1=20^\circ$ при изменении α_2 от 20° до 42° , для $z=10,15,20,30,50,75,100$

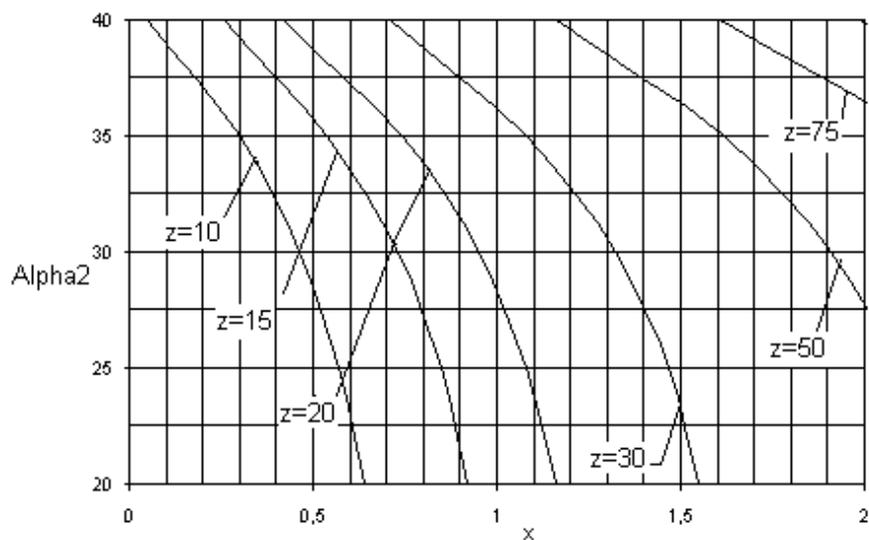


Рис. 3. Графики для определения предельных значений α и x при различных значениях z : для значения $\alpha_1=25^\circ$ при изменении α_2 от 25° до 38° , для $z=10,15,20,30,50,75$

Определение коэффициента наименьшего смещения

В процессе формирования эвольвентного зуба по способу огибания в зависимости от взаимного расположения инструмента и заготовки возможно срезание эвольвентной части профиля зуба той частью профиля инструмента, которая формирует переходную кривую. Условие, при котором это возможно, определяется из схемы станочного зацепления. Участок линии зацепления, соответствующий эвольвентному зацеплению определяется отрезком B_1 , где точка B_1 определяется пересечением линии станочного зацепления и прямой граничных точек инструмента. Если точка B_1 располагается ниже (см. рис. 4) точки N , то возникает подрезание зуба. Условие, при котором нет подрезания, можно записать так $P_0N > P_0B_1$ [4].

Из ΔP_0N0 для прямозубого колеса $P_0N = r \sin \alpha = m z \sin \alpha / 2$, для косозубого колеса $P_0N = r \sin \alpha_t / \cos \beta = m z \sin \alpha_t / 2 \cos \beta$, а из ΔP_0B_1F для прямозубого колеса $P_0B_1 = (h_1^* - h_a^* - x) m / \sin \alpha$, для косозубого колеса $P_0B_1 = (h_1^* - h_a^* - x) m / \sin \alpha_t$. Здесь $h_1^* = 2h_a^*$ – коэффициент граничной высоты. Тогда из ΔP_0B_1F для прямозубого колеса $z \sin \alpha / 2 > (h_1^* - h_a^* - x) / \sin \alpha$, при $x=0$ $z > 2 h_a^* / \sin^2 \alpha$, для косозубого колеса $z \sin \alpha_t / 2 > (h_1^* - h_a^* - x) \cos \beta / \sin \alpha_t$, при $x=0$ $z > 2 (h_1^* - h_a^*) \cos \beta / \sin^2 \alpha_t$. Отсюда $z_{\min} = 2 (h_1^* - h_a^*) \cos \beta / \sin^2 \alpha$, где z_{\min} – минимальное число зубьев нулевого колеса нарезаемое без подрезания.

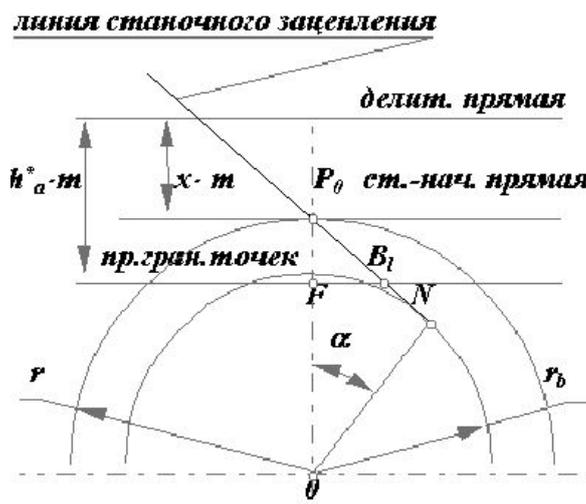


Рис. 4. Схема станочного зацепления

Избежать подрезания колеса можно, если увеличить смещение инструмента так, чтобы точка B_1 оказалась бы выше точки N или совпала с ней. Тогда смещение инструмента, при котором не будет подрезания, составляет

$$x > h_1^* - h_a^* - z \sin^2 \alpha_t / (2 \cos \beta).$$

В предельном случае, когда точка B_1 совпадает с точкой N ,

$$x_{\min} = h_1^* - h_a^* - \frac{z \cdot \sin^2 \alpha_t}{2 \cdot \cos \beta}, \quad (2)$$

где x_{\min} – минимальное смещение инструмента, при котором нет подрезания. Формула (2) может использоваться для определения коэффициента наименьшего смещения зубчатого колеса с несимметричной формой зуба. Однако следует учитывать, что для колеса с несимметричным зубом коэффициент наименьшего смещения достаточно определить для стороны зуба с меньшим углом профиля.

В табл. 1–3 представлены значения наименьшего числа зубьев z_{\min} зубчатого колеса с коэффициентом смещения $x=0$ при станочном зацеплении с исходной производящей рейкой для значений углов профилей зуба $\alpha=15^\circ, 20^\circ$ и 25° .

Таблица 1.

$\alpha=15^\circ$	
$\beta,^\circ$	z
До 8	30
Св. 8 до 12	29
Св.12 до 15	28
Св.15 до 17	27
Св.17 до 19	26
Св.19 до 22	25
Св.22 до 24	24
Св.24 до 26	23
Св.26 до 27	22
Св.27 до 29	21
Св.29 до 31	20
Св.31 до 33	19
Св.33 до 34	18
Св.34 до 36	17
Св.36 до 38	16
Св.38 до 40	15
Св.40 до 41	14
Св.41 до 43	13
Св.43 до 45	12

Таблица 2.

$\alpha=20^\circ$	
$\beta,^\circ$	z
До 3	18
Св. 3 до 12	17
Св. 12 до 17	16
Св. 17 до 21	15
Св. 21 до 25	14
Св. 25 до 28	13
Св. 28 до 31	12
Св. 31 до 34	11
Св. 34 до 37	10
Св. 37 до 40	9
Св. 40 до 44	8
Св. 44 до 45	7

Таблица 3.

$\alpha=25^\circ$	
$\beta,^\circ$	z
До 6	12
Св. 6 до 16	11
Св. 16 до 23	10
Св. 23 до 28	9
Св. 28 до 33	8
Св. 33 до 38	7
Св. 38 до 43	6
Св. 43 до 45	5

В отличие от [2], в табл. 2 представлены несколько иные значения наименьшего числа зубьев z_{\min} зубчатого колеса. При расчете по (2) получается, что при $\beta \leq 3^\circ$ наименьшее число зубьев, свободных от подрезания равно, 18, а в [2] $z_{\min} = 17$.

Заключение

В работе приведены зависимости для определения толщины зуба на окружности вершин и коэффициента наименьшего смещения для зубчатых колес с несимметричным зубом. Определены предельные величины угла профиля α_2 при $\alpha_1=20^\circ$ и $\alpha_1=25^\circ$, при соблюдении высотных параметров стандартного исходного реечного контура, а также представлены значения наименьшего числа зубьев зубчатого колеса с коэффициентом смещения $x=0$ при станочном зацеплении с исходной производящей рейкой для значений углов профилей, отличных от стандартного $\alpha=20^\circ$. Представлены графики для определения предельных значений угла профиля и коэффициента смещения при различных значениях чисел зубьев, соответствующих началу заострения.

Литература

1. Вулгаков Э.Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1995. 320 с.
2. ГОСТ 16532-70 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии.
3. ГОСТ 13755-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходный контур.
4. Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении (Теория эвольвентных зубчатых передач). М.: Машгиз, 1962, 530 с.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ КОНТРОЛЯ НОРМ БОКОВОГО ЗАЗОРА В ПЕРЕДАЧАХ, СОСТАВЛЕННЫХ ИЗ КОЛЕС С С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ ЗУБА

Д.А. Фролов

Научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев

Обычно контроль норм бокового зазора осуществляется на зуборезном станке путем измерения средней длины общей нормали. У колеса с несимметричным профилем зуба общая нормаль отсутствует. Поэтому предлагается метод измерения, основанный на процессе, аналогичном контролю по роликам (шарикам) мелко модульных зубчатых колес [1], при этом измерение размера по роликам (шарикам) производится без снятия детали со станка.

Введение

Основными параметрами для контроля зубчатых колес являются: длина общей нормали, хорда зуба на произвольной окружности диаметра d_y либо размер по роликам. Зубчатые колеса с несимметричным зубом общей нормали, в обычном понимании этого термина, не имеют. При измерении хорды зуба не удастся проконтролировать коэффициент смещения с достаточной точностью, а измерение размера по роликам позволяет это сделать. Проблеме измерения размера по роликам зубчатых колес с симметричным зубом посвящено много работ, например [4–9]. В данной статье приведен метод расчета размера по роликам (шарикам) зубчатых колес с несимметричным зубом и даны рекомендации по расположению ролика (шарика) во впадине зуба.

Определение размера по роликам (шарикам)

В соответствии с ГОСТ 16532-70 [2] размер по роликам определяется следующим образом: для нечетного числа зубьев (см. рис. 1,а):

$$M = d_D \cdot \cos\left(\frac{90}{z}\right) + D, \quad (1)$$

для четного числа зубьев (см. рис. 1,б):

$$M = d_D + D, \quad (2)$$

где d_D – диаметр концентрической окружности зубчатого колеса, проходящей через центр ролика, D – диаметр ролика, z – число зубьев колеса.

Диаметр концентрической окружности зубчатого колеса, проходящей через центр ролика d_D равен

$$d_D = \frac{m \cdot z \cdot \cos \alpha_1}{\cos \alpha_{D1}} = \frac{m \cdot z \cdot \cos \alpha_2}{\cos \alpha_{D2}},$$

где m – модуль, x – коэффициент смещения; α_1, α_2 – углы профилей правой и левой сторон зуба; d_{b1}, d_{b2} – диаметры основных окружностей; α_{D1}, α_{D2} – эвольвентные углы, соответствующие концентрической окружности диаметра d_D , которые определяют из системы трансцендентных уравнений

$$\operatorname{inv} \alpha_1 + \frac{D}{d_{b1}} + \operatorname{inv} \alpha_2 + \frac{D}{d_{b2}} - \operatorname{inv} \alpha_{D1} - \operatorname{inv} \alpha_{D2} = \frac{\pi}{z} - \frac{2 \cdot x}{z} (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2),$$

$$\frac{\operatorname{inv} \alpha_{D1}}{\operatorname{inv} \alpha_{D2}} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{d_{b1}}{d_{b2}}.$$

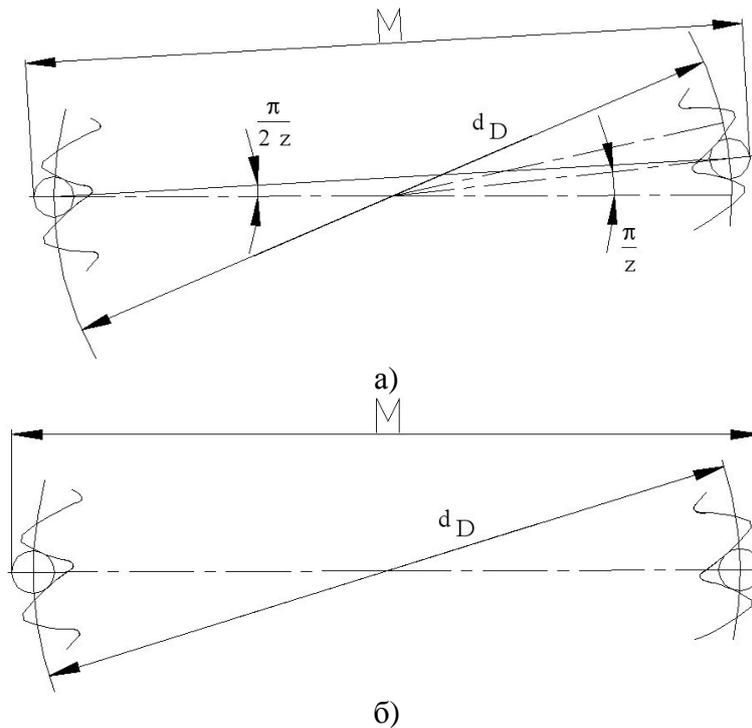


Рис. 1. Определение размера по роликам: а) для нечетного числа зубьев; б) для четного числа зубьев

Расположение шарика во впадине зуба

В настоящее время размер по роликам используется при контроле прямозубых и косозубых мелко модульных колес с $m \leq 1$. ГОСТ 9178-81 предусматривает использование проволочек и роликов [3], которые согласно В.А. Куцоконю [4] и В. Ружечке [5] должны касаться сторон зубьев в районе делительной окружности.

Все эти рекомендации связаны с тем, что многие нормы ГОСТ 1643-81 [6] относятся к длине и положению постоянной хорды и измеряются на делительном цилиндре (делительной окружности). Для колес с несимметричными зубьями невозможно осуществить касание поверхностей разных сторон зубьев одной впадины и шарика (ролика) на делительном цилиндре, однако условие касание шарика (ролика) на эвольвентном участке профиля является обязательным, поэтому для определения размера по шарикам диаметр шарика рекомендуется определять по формуле $D=1,8m$ [7] и далее округлять до ближайшего значения диаметра шарика по ГОСТ 3722-81 [8].

Шарик будет находиться на эвольвентном участке профиля, если будет выполняться следующее условие [9]:

$$\alpha_l < \alpha_M < \alpha_a, \quad (3)$$

где α_l – угол профиля в граничной точке, α_a – угол профиля на окружности вершин. Здесь

$$\operatorname{tg} \alpha_l = \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{4(h_l^* - h_a^* - x)}{z \cdot \sin 2\alpha_1},$$

где h_l^* – коэффициент граничной высоты; h_a^* – коэффициент высоты головки зуба.

Следует заметить, что достаточно определить угол профиля α_M для α_1 ($\alpha_1 < \alpha_2$). Это связано с тем, что эвольвентный участок для стороны зуба с углом профиля $\alpha_1 < \alpha_2$ начинается в точке, лежащей на основной окружности большего диаметра, чем для стороны зуба с углом профиля α_2 (например, для $\alpha_1=20^\circ$ $d_b > d_f$, где d_b – диаметр основной окружности, а d_f – диаметр окружности впадин).

Рассмотрим положение шарика (ролика) во впадине зубчатого колеса с несимметричным профилем (рис. 2). На рис. 2 $\Theta_1=D/d_{b1}$, $\Theta_2=D/d_{b2}$ – центральные углы в радианах (D – диаметр шарика); $d_D=2r_d$, где r_d – размер от центра колеса до центра ролика.

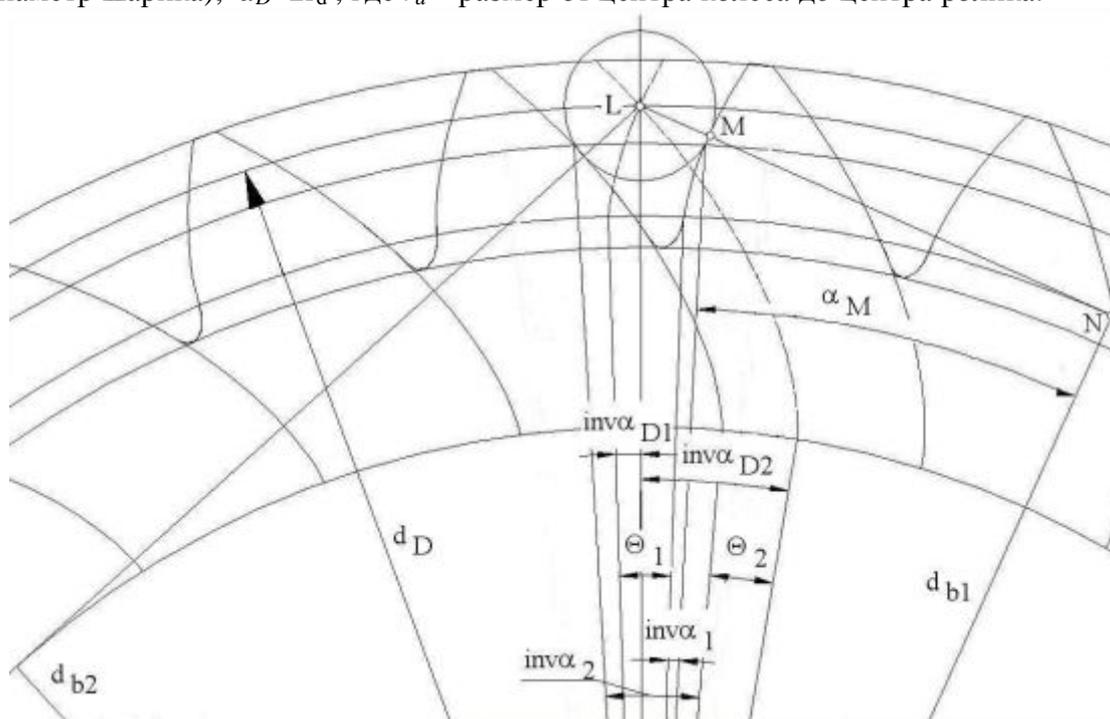


Рис. 2 Положение шарика (ролика) во впадине зубчатого колеса с несимметричным профилем

Угол профиля α_M определим из рис. 2:

$$\operatorname{tg} \alpha_M = \frac{LN - LM}{ON} = \operatorname{tg} \alpha_{D1} - \frac{D}{m \cdot z \cdot \cos \alpha_1},$$

где точка O – центр колеса; точка L – центр шарика; точка M – точка касания шарика и эвольвентного участка профиля зуба с меньшим углом профиля; NL – касательная к основной окружности с диаметром равным $d_{b1}=mz \cos \alpha_1$.

Шарик не должен касаться дна впадины. Для этого необходимо, чтобы

$$d_D - D > d_f. \quad (4)$$

Желательно, чтобы ролик выступал за пределы поверхности вершин, т.е. чтобы соблюдалось условие

$$M > d_a. \quad (5)$$

Таким образом, необходимый размер M вычисляется согласно зависимостям (1) и (2) при непрерывном выполнении условий (3)–(5).

Заключение

В работе представлен метод определения размера по роликам (шарикам) зубчатых колес с несимметричным зубом, даны рекомендации по выбору диаметра шарика и расположению ролика (шарика) во впадине зуба зубчатого колеса.

Литература

1. ГОСТ 9178-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические мелко-модульные. Допуски.
2. ГОСТ 16532-70 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии.
3. ГОСТ 2475-88 Проволочки и ролики. Технические условия.

4. Куцоконь В.А. Точность кинематических цепей приборов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 221 с., ил.
5. Ружичка В. Контроль зубчатых колес. М.: Mashgiz, 1960. 324с.
6. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски.
7. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / Под ред. И.А. Болотовского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 448с., ил.
8. ГОСТ 3722-81 Подшипники качения. Шарикоподшипники. Технические условия.
9. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления. Расчет геометрии. Справочное пособие./ И.А. Болотовский, Б.И. Гурьев, В.Э. Смирнов, Б.И. Шендерей. М.: Машиностроение, 1974. 160 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СБОРКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ НА ИХ ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю.С.Монахов, Г.И. Янгузов

Научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев

Предлагается методика вибрационной диагностики шарикоподшипниковых узлов в зависимости от конструктивных параметров и условий сборки. Особое внимание уделяется алгоритму расчета зазоров в подшипнике и указанию зависимости между осевым и радиальным зазором.

Введение

Повышение требований надежности и точности механизмов приборов связано с задачами снижения их виброактивности. Механизмы, как правило, состоят из большого числа взаимодействующих элементов. Относительные перемещения этих элементов порождают вибрации, которые для прецизионных мехатронных систем существенно усиливаются при наличии дефектов (погрешности изготовления, сборки, балансировки). Параметры вибрации могут служить информационными сигналами о внутренних ненаблюдаемых процессах. Наиболее действенными методами оценки состояния и прогнозирования его изменения во времени являются методы технической диагностики. Техническая диагностика решает задачи определения состояния системы, причин нарушения работоспособности и снижения надежности. Одним из видов технической диагностики являются неразрушающие средства контроля, т.е. контроль без разборки механизма, для диагностики эффектов, возникающих при изготовлении и эксплуатации механизма.

В данной работе рассматривается возможность применения неразрушающего метода контроля для прогнозирования вибрационных характеристик шарикоподшипниковых узлов в редукторах приборов. В качестве измеряемых параметров, характеризующих подшипники редуктора, используют данные о температуре, состоянии смазки, энергетических потерях (моментах трения, КПД), виброакустических характеристиках и т.п. Рассмотрим связь между конструктивными параметрами подшипников и вибрацией.

Определение вибрационных характеристик

Одним из существенных источников вибрации являются зазоры в подшипниках, которые, с одной стороны, необходимы для обеспечения вращения, но с другой стороны, их малая величина приводит к росту момента трения (следовательно, к снижению КПД), а большая величина снижает точность передачи угла при реверсе (т.е. увеличивается кинематический мертвый ход). Следовательно, зазоры в подшипниках можно отнести к дефектам, которые могут увеличиваться при эксплуатации в результате износа.

Величина зазора в работающем подшипнике зависит от многих факторов: первоначального зазора, нагрузки, посадки колец. Зазор увеличивается за счет пластических деформаций, появляющихся при работе.

На основании работ [1, 2] авторами составлен график, представленный на рис.1. Зазор прежде всего влияет на долговечность работы опоры. При малых зазорах долговечность уменьшается, при возрастании зазора до какого-то оптимального значения долговечность растет, но затем вновь падает. Наиболее выгодный интервал радиальных зазоров такой, при котором все шарики в одной половине нагружаются, а в другой – разгружаются. В работе [1] этот интервал составляет 12–18 мкм при работоспособности в 1200–1300 час (максимум работоспособности соответствует зазору $g=14-15$ мкм).

Если радиальный зазор меньше указанного интервала, то работоспособность падает в 2,5 раза, если больше – то в 2 раза. Причиной этого явления в первом случае служат отклонения колец и шариков от правильной геометрической формы, которые вызывают перегрузку деталей подшипника, а во втором случае – уменьшение протяженности нагруженной зоны, что увеличивает нагрузку на шарики.

Величина зазора в значительной степени влияет на уровень шума и момент трения [2] (рис.1). При малых и больших зазорах шум увеличивается, принципиально такая же картина наблюдается и при исследованиях влияния трения. Интересно, что интервал, при котором уровень шума минимален, практически совпадает с интервалом, при котором работоспособность максимальна [1], а момент трения минимален.

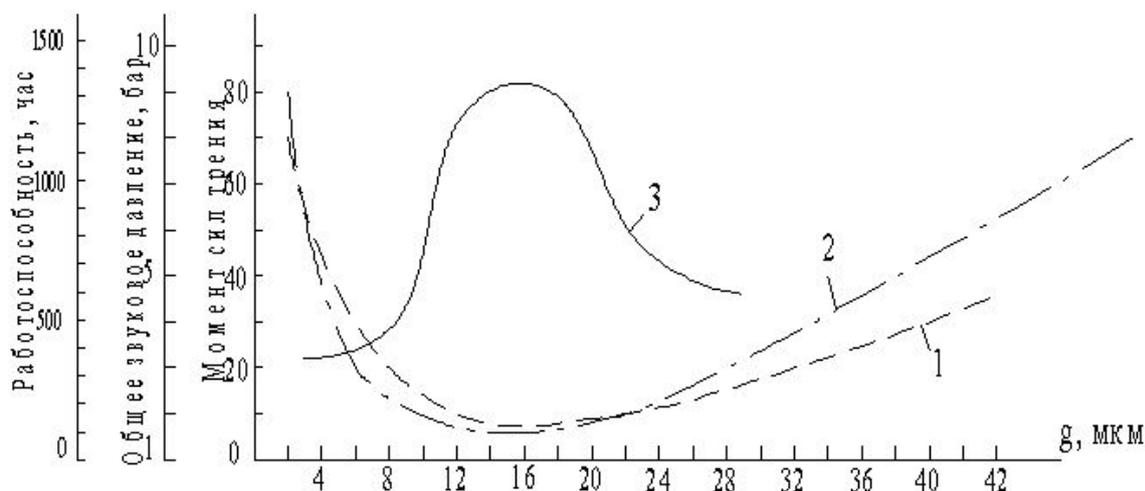


Рис. 1. Зависимости момента сил трения (1), общего звукового давления (2) и работоспособности (3) от величины радиального зазора

Конструктивные параметры шарикоподшипников определяют их кинематику. Используя работы [3, 4], можно записать зависимость между частотами вращения сепаратора f_c и кольца подшипника f_k в виде

$$f_c = 0,5 f_k \left(1 - \frac{D_w (1 - g / 2h)}{2(R_1 + R_2)} \right), \quad (1)$$

где D_w – диаметр шарика; $h = r_1 + r_2 - D_w$ – конструктивный параметр; r_1 и r_2 – радиусы профиля дорожки качения колец подшипника; R_1 и R_2 – радиусы дорожки качения колец подшипника; g – радиальный зазор в подшипнике.

При диагностике часто используют не только частоту вращения сепаратора f_c , но и любую комбинационную частоту

$$f_{\Delta} = p f_k \pm k f_c, \quad (2)$$

где p и k – целые числа. Выделение информационной частоты из спектра производят селективным вольтметром, а ее измерение – частотомером. При этом для повышения точности целесообразно измерять отношение частот

$$\frac{f_{\Delta}}{f_k} = p \pm \frac{k}{2 D_{pw}} \left[D_{pw} - D_w \frac{1 - \frac{g_r}{2h}}{1 + \frac{\delta}{h}} \right], \quad (3)$$

где δ – сближение пар качения (зависит от приложенной нагрузки), D_{pw} – диаметр центров шариков.

Однако необходимо учитывать, что при установке температурного режима образуется рабочий зазор

$$g_r = g_0 - (\Delta D + \Delta d) \pm \Delta g_r + \delta_r, \quad (4)$$

где g_0 – зазор в отдельно взятом подшипнике; $\Delta D + \Delta d$ – уменьшение зазора, вызванное уменьшением и увеличением, соответственно, наружного и внутреннего колец подшипника из-за посадки их в корпус и на вал; Δg_r – изменение зазора вследствие перепада температур вала и корпуса; δ_r – увеличение зазора, вызванное упругой деформацией в контакте наиболее нагруженного тела качения с дорожками качения. Следует также отметить, что данная зависимость справедлива лишь для нерегулируемых подшипниковых узлов.

Частоты можно определить разными способами, в частности, вибрационным и электрофлуктационным.

После определения реальных частот алгоритм последующих действий следующий.

Во-первых, зная допустимый уровень вибрации, можно найти предполагаемую вибрацию для разрабатываемой конструкции редуктора еще на стадии проектирования и внести коррективы к требованиям, предъявляемым к подшипникам (провести обоснованный выбор группы радиального зазора, уточнить величину или интервал осевого перемещения вала в подшипниках и т.п.).

Во-вторых, имея готовый редуктор, можно измерить осевое перемещение вала в подшипниках, определить соответствующий радиальный зазор в опорах, сравнить уровни предполагаемой и допустимой вибраций и в случае необходимости изменить величину осевого перемещения вала на соответствующую величину.

Поставленные задачи можно решить, если установить обоснованную и достоверную связь между радиальным g и осевым $2S$ зазорами в подшипниках. Первоначально для отдельно взятого подшипника из ГОСТ 24810–81 известен интервал радиальных зазоров без нагрузки, т.е. $g_0 \in (g_{\min}; g_{\max})$ в зависимости от группы зазоров, указанной в обозначении опоры (см. табл. 1, где приведены радиальные зазоры g_r , мкм, подшипников радиальных шариковых однорядных по ГОСТ 24810-81). В результате измерения этот зазор может быть определен при определенной контрольной нагрузке (например для $d \leq 3$ мм нагрузка $P=4H$, для $3\text{мм} < d \leq 10\text{мм}$ $P=10H$, а для $10\text{мм} < d \leq 18\text{мм}$ $P=50H$).

Номинальный диаметр посадочного отверстия подшипника d , мм		g_r в подшипнике группы				
Св.	До	C2*	нормальной	C3*	C4*	C5*
2,5	10	0/7	2/13	8/23	14/29	20/37
10	18	0/9	3/18	11/25	18/33	25/45
18	24	0/10	5/20	13/28	20/36	28/48
24	30	1/11	5/20	13/28	23/41	30/53
30	40	1/11	6/20	15/33	28/46	40/64

*В числителе приведены значения наименьшего радиального зазора, в знаменателе – наибольшего.

Таблица 1. Радиальные зазоры g_r , мкм, подшипников радиальных шариковых однорядных по ГОСТ 24810-81

Прямая формульная зависимость между радиальным g и осевым $2S$ зазором или вообще отсутствует [1,3–5], или отношение $g/2S$ принимают равным $1/6$ – $1/8$ [2] и даже от $1/10$ до $1/30$ [6], или указанная зависимость имеет упрощенный вид [7,8]:

$$2S = \sqrt{(2r - D_w)g} \quad (5)$$

Формула (5) базируется на ряде частных предположений [9]. Так, при ее выводе считалось, что радиусы профилей (желобов) дорожек качения колец подшипников равны (т.е. $r_1 = r_2$ [5]), что является частным случаем (например, для подшипников 35, 66Г, 900, 1000900 указанное условие не соблюдается). Радиусы r_1 и r_2 зависят от диаметра шарика D_w . По отечественным стандартам диаметры шариков разделены на три интервала, каждому из которых соответствует своя зависимость. Международные же стандарты определяют их по следующим зависимостям $r_1=0,52D_w$ и $r_2=0,54D_w$.

Принимая во внимание условие $h=2r-D_w$, имеем:

$$2S = \sqrt{hg}. \quad (6)$$

С другой стороны, $h=0,04D_w$ (т.е. $r=0,52D_w$); учитывая это, можно получить зависимость вида

$$2S = 0,2\sqrt{D_w g}. \quad (7)$$

Однако в работе [9] указано, что у стандартных подшипников $r_2=0,512D_w$.

Для определения зазоров определим угол контакта в радиальном однорядном шарикоподшипнике

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\cos \alpha_0}{1 + \frac{\delta}{h}} \right), \quad (8)$$

где $\alpha_0 = \arccos \left(1 - \frac{g}{2h} \right)$ – начальный угол контакта, δ – сближение пар качения.

На основании этого, а также учитывая расстояние между центрами радиусов желобов наружного и внутреннего колес $h=0,04D_w$ и следующее из графического вывода выражение $2S=h \cdot tg \alpha$, можно получить искомую зависимость в виде

$$2S = 0,04D_w tg \left[\arccos \left(1 - 12,5 \frac{g_r}{D_w} \right) \right]. \quad (9)$$

Сближение тел качения δ зависит от приложенной к подшипнику нагрузки:

$$\frac{F}{B_K h^{3/2}} = z \left(\frac{\delta}{h} \right)^{3/2} \sqrt{1 - \left[\frac{1 - \frac{g}{2h}}{1 + \frac{\delta}{h}} \right]^2}, \quad (10)$$

где F – радиальная нагрузка, z – число шариков.

Упрощая и считая $g/2h < 1$ и $\delta/h < 1$ (g и δ – в мкм, а h – в мм), получаем

$$\left(\frac{F}{zB_K h^{3/2}} \right)^2 = 2 \left(\frac{\delta}{h} \right)^4 + \left(\frac{g}{h} \right) \left(\frac{\delta}{h} \right)^3,$$

где B_K – конструктивный параметр.

Здесь следует заметить, что математическое выражение значения сближения тел качения вызывает значительные трудности, однако оно может быть получено численными методами.

Авторами предложена формула, которая является развитием работ [9-11]:

$$2S = \sqrt{0,5(r_1 - 0,5D_w)g_r} + \sqrt{0,5(r_2 - 0,5D_w)g_r} \quad (11)$$

где g_r – реальный радиальный зазор с учетом его изменения в связи с упругой деформацией при посадке и температурным режимом.

Необходимо подчеркнуть, что указанная формула выведена для однорядных шарикоподшипников. Ее достоинством является учет возможного неравенства радиусов

профилей дорожек качения подшипника r_1 и r_2 , это имеет место, например, в подшипниках 35, 66, 900, 1000085 и 1000900 и в международных стандартах. В настоящее время использование иностранных подшипников все возрастает, и в связи с этим увеличивается необходимость знания и учета этих аспектов. На рис. 2 представлен график $2S = f(g)$, выполненный для упрощенных (6), (9) и уточненной (11) зависимостей для подшипника 35.

В приборостроении на чертежах подшипниковых узлов обычно указывается требование к осевому перемещению валов (имеется в виду двухстороннее перемещение, обозначаемое термином "осевая игра" – $2S$) в пределах (0,03... 0,05) мм [9]. В других работах фигурирует больший интервал (0,02...0,1)мм [6]. При этом необходимо иметь в виду, что в подшипниковом узле реализуется минимальная "осевая игра" составляющих его подшипников:

$$2S = \min \{2S_1, 2S_2\}. \quad (12)$$

Из формулы (1) можно вывести условие, при котором в шарикоподшипнике имеет место зазор:

$$f_c / f_k \geq 0,5 [1 - \cos \alpha / (2k)], \quad (13)$$

где $k = 0,5(d_1 + D_1)/D_w$, $\cos \alpha = 1 - g_0/2h$. График зависимости отношения частот f_c/f_k от величины радиального зазора g представлен на рис.3.

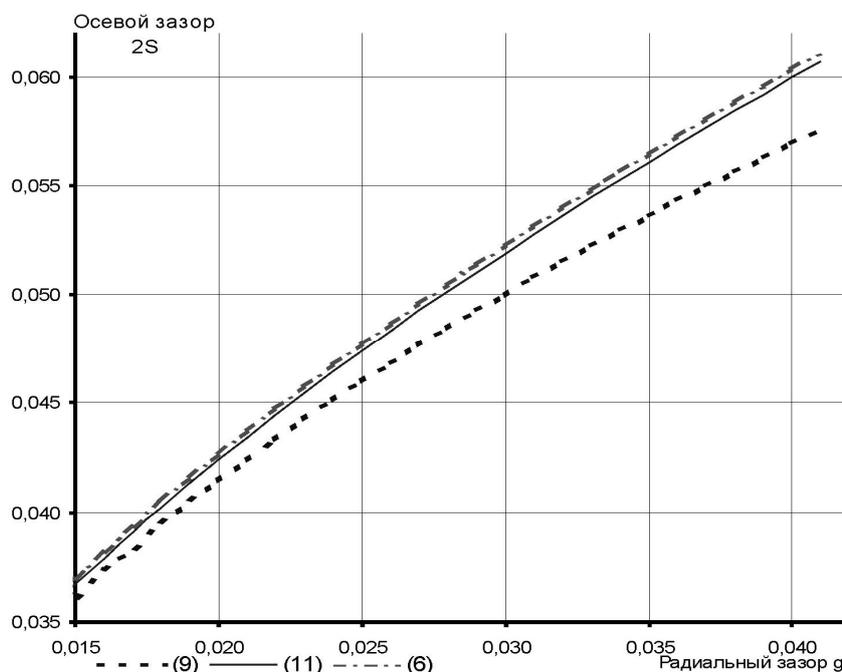


Рис. 2. Зависимости осевого зазора $2S$ от радиального g , вычисленные по различным формулам

Наружный диаметр внутреннего кольца и внутренний диаметр наружного кольца (по дну желобов) в соответствии с [1] определены:

$$d_1 = D_{PW} - D_w, \quad (14)$$

$$D_1 = D_{PW} + D_w. \quad (15)$$

Диаметр центров шариков [1]:

$$D_{PW} = D_w \sin^{-1}[\varphi / 2(z - 1)], \quad (16)$$

где z – число шариков, φ – угол заполнения шариками, образуемый радиусами, соединяющими центры двух крайних шариков с центром подшипника при условии плотного прилегания всех шариков друг к другу на желобе наружного кольца. Обычно ориентируются на $\varphi=186^\circ$, однако конструкторской документацией допускаются значения указанного параметра для тяжелых серий – 194° , для средних – 196° , для сверхлегких –

200° [12]. Анализируя указанный ряд, можно предположить, что для легких серий $\varphi=198^\circ$.

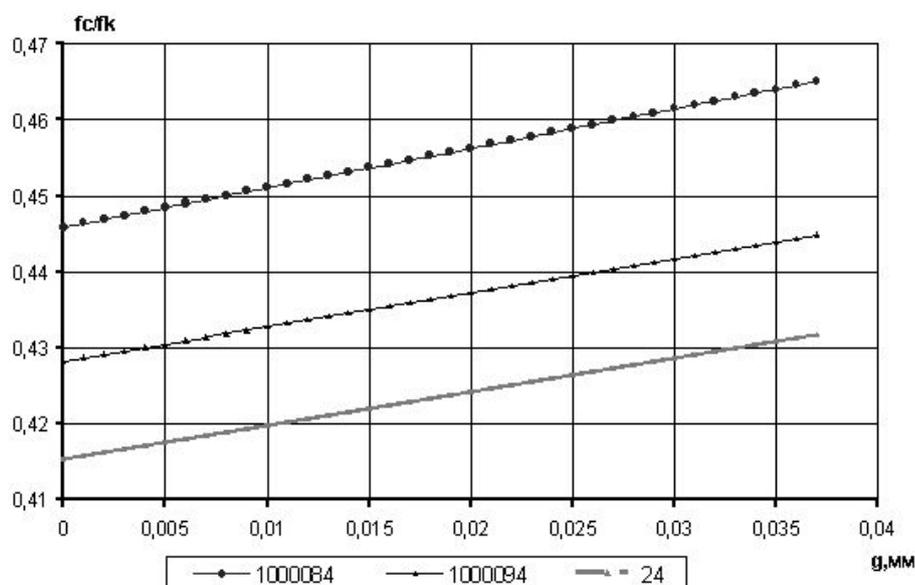


Рис. 3. Зависимость отношения частот f_c/f_k от радиального зазора g для различных шарикоподшипников

Тогда

$$d_I = D_w \{ \sin^{-1}[\varphi / 2(z - 1)] - 1 \}, \quad (17)$$

$$D_I = D_w \{ \sin^{-1}[\varphi / 2(z - 1)] + 1 \}. \quad (18)$$

Используя формулы (3), (4), необходимо учитывать, что по утверждению ряда работ, например [13], $r_I = 0,52D_w$ или $r_I = 0,515D_w$ [5] далеко не всегда выполняется [2,4], и нужны конкретные данные для каждого типоразмера.

Формулы (17), (18) мало пригодны для расчета приборных подшипников, так как имеют большую погрешность и не сходятся с известными данными, приведенными в технических условиях [1] (см. табл. 2).

№ ШП	По формулам (17) и (18)			По техническим условиям		
	d_I , мм	D_I , мм	k	d_I , мм	D_I , мм	k
1000084	4,706	7,306	4,620	5,2	7,8	5
1000085	8,387	12,378	5,189	6,14	9,588	3,933
1000093	3,059	6,239	2,924	3,91	7,088	3,459
1000094	4,973	8,973	3,487	5,5	9,5	3,750
1000095	6,105	10,105	4,053	6,73	10,73	4,366
1000096	7,265	12,025	4,053	8,12	12,88	4,412
23	4,008	7,188	3,521	5,043	8,219	4,170
24	4,646	9,406	2,952	5,819	10,581	3,445
25	6,208	12,568	2,952	6,825	13,175	3,145
26	7,750	15,690	2,952	8,244	16,182	3,076
206	34,921	53,970	4,666	36,475	55,525	4,829
208	46,56	71,96	4,666	—	—	—

Таблица 2. Сравнение расчетов по (17), (18) с техническими условиями

С целью уточнения параметра k необходимо учесть в расчетах и номинальный радиальный зазор, т.е. считать

$$D_0 = 0,5(d_I + D_I + g_0). \quad (19)$$

Номинальный радиальный зазор, который из (14,15) может быть определен, следовательно, приближенно, так как при его расчете использованы величины, полученные из тех же формул (17,18):

$$g_0 = D_I - (2D_w + d_I) = 0,5(D - d) - 2D_w. \quad (20)$$

Работы [14–17] дают возможность получить значения информационных частот за счет применения электрофлюктуационных методов исследований шарикоподшипниковых опор в сборе [15].

Пример использования расчета

Шарикоподшипник 208 (легкая узкая серия диаметров, серия ширин 0) имеет внутренний диаметр $d = 40$ мм, число шариков $z = 9$, $D_w = 12,7$ мм, наружный диаметр $D = 80$ мм (ГОСТ 8338-75, аналог по типоразмеру 6208 DIN 625, номинальное соотношение $2S_0/g_0 = 5,8$ (по каталогу фирмы FAG); по номограмме $g_0 = 0,041$ мм [7]). В то же время по формуле ($2S = 0,4\sqrt{D_w g}$) отношение зазоров имеет соотношение $2S_0/g_0 = 7$. С другой стороны, по ГОСТ 24810-81 радиальные зазоры в однорядных радиальных шарикоподшипниках данного типоразмера могут быть в интервале 0,001–0,064 мм.

В конкретном случае по формулам (9), (10) имеем $d_I = 46,56$ мм, $D_I = 71,96$ мм, или, что то же самое, $R_I = 23,28$ мм и $R_2 = 35,98$ мм.

Определим конструктивные параметры подшипника. Для радиального зазора $g = -1$ мкм (т.е. натяг 1 мкм) имеем:

$$k = 0,5(d_I + D_I - g)/D_w \cong 59,26/12,7 \cong 4,67;$$

$$h = r_1 + r_2 - D_w = 0,04 D_w = 0,508 \text{ мм}.$$

Находим расчетное соотношение частот по формуле (1):

$$\frac{f_c}{f_k} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{D_w (1 - g / 2h)}{2(R_1 + R_2)} \right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{12,7 \cdot \left(1 - \frac{-1}{2 \cdot 0,508} \right)}{2 \cdot (23,28 + 35,98)} \right) = 0,394.$$

Если пользоваться другими рекомендациями ГОСТ или международными стандартами ISO, мы получаем значения соотношения частот, представленные в табл.3.

Зазор g , мкм	f_c / f_k		
	ISO: $h=0,06D_w$	ГОСТ: $h=0,05D_w$	ГОСТ: $h=0,04D_w$
0	0,446	0,446	0,446
-0,5	0,429	0,425	0,420
-1	0,411	0,404	0,394
-1,5	0,394	0,383	0,367
-2	0,376	0,362	0,341
-2,5	0,359	0,341	0,316

Таблица 3. Значения соотношения частот

На основании электрофлюктуационных методов исследования получены соотношения частот [14–1], представленные в табл. 4.

f_c , Гц	F_k , Гц	f_c/f_k
8,70	22,50	0,387
8,78	24,20	0,363
8,69	22,21	0,391
8,66	21,90	0,395

Таблица 4. Значения соотношения частот, полученные электрофлюктуационным методом

Анализируя данные, приведенные в табл. 3, 4, можно сделать вывод о достаточно близком приближении полученных результатов к экспериментальным данным на определенном интервале значений радиального зазора g : от -1 мкм до $-2,5$ мкм. Интерпретировать полученные данные можно тем, что приведенный расчет – геометрический и не учитывает податливость системы (из-за сложности расчета), в результате чего, как следует из приведенной формулы, под действием нагрузки натяг, равный 2 мкм, может перейти в зазор.

Заключение

Предложенный авторами метод расчета информационных частот шарикоподшипниковых узлов вполне достоверен и может быть использован как для проектных расчетов, так и в качестве инженерной методики.

Установлена обоснованная зависимость между зазорами в шарикоподшипниках, которая позволяет более достоверно:

- решать задачу прогнозирования вибрации подшипников как на стадии проектирования, так и путем регулировки осевого перемещения валов в реальных редукторах;
- выбрать группу радиальных зазоров для шарикоподшипников в соответствии с требованиями к осевому перемещению валов.

Зная конструктивные параметры подшипникового узла, можно установить границу существования зазоров при определенных соотношениях информационных частот. Предлагаемая методика прогнозирования вибрационных параметров шарикоподшипниковых узлов в зависимости от регулировки зазоров при сборке предназначена для более комплексного, системного подхода к проектированию, что является особо важным на современном этапе развития науки в связи с появлением мехатронных устройств и систем.

Литература

1. Приборные шариковые подшипники / Под ред. К.Н.Явленского, В.Н.Нарышкина, Е.Е.Чаадаевой. - М.: Машиностроение, 1981.
2. Сивоконенко И.М., Явленский К.Н. Опоры трения качения / В кн.: Детали и элементы гироскопических приборов. - Л.: Судпромгиз, 1962. - С.151-249.
3. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. К.Н.Явленского, Б.П.Тимофеева, Е.Е.Чаадаевой. - Л.: Машиностроение, 1989. – 710с.
4. Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник. - М.: Машиностроение, 1983. – 534с.
5. Спришевский А.И. Подшипники качения. - М.:Машиностроение,1969.– 631с.
6. Детали и механизмы приборов: Справочник / В.Н.Уваров, В.А.Бойко, В.Б.Подаревский, Л.И.Власенко. 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Техника, 1987. – 343с.
7. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. М.Я.Кругера и В.А.Панова. - Л.: Машиностроение, 1968. – 760с.
8. Шепелев М.В. Сборка, регулировка и испытание гироскопических подшипников. - М.: Машиностроение, 1977. - 192с.

9. Шалобаев Е.В. Прогнозирование вибрационных характеристик шарикоподшипников в редукторах // Диагностика на машины и съоръжения и безразрушителни методи за контрол на материалите. - Варна: БАН, 1990. - С.336-339.
10. Пластмассовые зубчатые передачи в приборах. Расчет и конструирование / Под общ. ред. В.Е.Старжинского и Е.В.Шалобаева. - СПб.-Гомель: ИММС НАН Б, 1998. – 538с.
11. Шалобаев Е.В. Прогнозирование вибрационных параметров приборных подшипников // Материалы Всерос. науч. - техн. конф.: Диагностика веществ, изделий и устройств. - Орел: изд-во ОГТУ, 1999. - С.144-146.
12. Бальмонт В.Б., Матвеев В.А. Опоры качения приборов. –М.:Машиностроение, 1984. – 240с.
13. Минчев Н., Григоров В. Вибродиагностика на ротационни и бутални машини. - София: Техника, 1988. – 280с.
14. Подмастерьев К.В., Шалобаев Е.В. Диагностика приборных подшипников // Тез. докл. науч. - техн. конф. - СПб.: ИТМО, 2000. – С.50.
15. Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения.- М.:Машиностроение-1, 2001.-376с.
16. Подмастерьев К.В. Электрофлуктуационный метод диагностирования подшипников в опорах приборов // Контроль и Диагностика. – 2000. – №4 – С.23-31.
17. Подмастерьев К.В. Электрофлуктуационный метод диагностирования подшипников качения при проведении механосборочных работ // Сборник Диагностика веществ, изделий и устройств. – Орел: ГТУ, 1999. – С.146-150.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ПЕРЕДАЧЕ ПО НОРМАМ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА ДЕТАЛЕЙ

Ю.С. Монахов, А.В. Емельянов

Научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев

Рассмотрены основные недостатки существующих стандартов. Предлагается методика определения степени точности зубчатых колес по нормам кинематической точности с учетом погрешностей изготовления и монтажа деталей с применением имеющихся на сегодняшний день стандартов.

Введение

Существующая концепция нормирования параметров точности зубчатых колес и передач действует уже более полувека.

Серьезная модификация произошла в начале 1970-х годов. ГОСТ 1643-72 и ГОСТ 9178-72 (указаны для примера как базовые, далее просто ГОСТы) ввели следующее положение: "Точностные требования установлены настоящим стандартом для зубчатых колес, находящихся на рабочих осях. В чертеже требования к точности зубчатого колеса допускается устанавливать относительно другой оси (например, оси отверстия под вал), которая может не совпадать с рабочей осью". Нормирование параметров передачи нарушало систему стандартизации ЕСКД, правда, допускалось использовать стандарт и для отдельно взятых колес. Эта двойственность вызвала неудобство в применении нормативной документации на производстве. Появились отраслевые стандарты, нормировавшие отдельно взятые зубчатые колеса, например ОСТ1.41667-77 и ОСТ1.41671-77 (авиапромышленность), ОСТ5.0091-74, ОСТ5.8686-84 (судовое приборостроение). Однако дальнейшая связь с действующим стандартом не была предусмотрена, что нарушало стройность нормирования параметров. Кроме того, вышел стандарт, который нормировал расчет точности кинематических цепей – ГОСТ 21098-82, базирующийся на ГОСТы, но фактически закрепивший практику использования указанных выше стандартов для отдельно взятых колес, хотя официально нигде об этом не было заявлено. С другой стороны, паспортизация колес в сборе не была предусмотрена.

Однако, учитывая, что переработка стандарта, а тем более его концепции – дело длительное, а пользоваться стандартами необходимо уже сегодня, в настоящей работе предлагается методика расчетов и пути достижения временного компромисса между существующей нормативной документацией и сложившейся практикой, что очень важно в условиях вводимой сертификации продукции.

1. Методика расчета

Рассмотрим обратную задачу точности на примере обеспечения заданной величины допуска на радиальное биение зубчатого венца в общем виде:

$$F_r = f(q_i).$$

Здесь q_1 и q_2 – модуль и делительный диаметр колеса; q_3 и q_4 – диаметры вала под зубчатое колесо и под подшипник; q_5 и q_6 – степени точности колеса относительно рабочей и базовой осей; q_7 и q_8 – квалитеты точности сопрягаемых поверхностей вала и колеса; q_9 – характер сопряжения колеса с валом; q_{10} , q_{11} и q_{12} – относительная геометрическая точность формы цилиндрических поверхностей колеса и вала и соосности посадочных поверхностей под колесо и под подшипник; q_{13} – класс точности шарикоподшипника; q_{14} – длина части ступицы колеса, поджимающей подшипник; q_{15} – расстояние между опорами; q_{16} – параметр, характеризующий расположение колеса относительно опор.

Для решения обратной задачи точности используется следующий алгоритм. По действующим стандартам в соответствии с заданной степенью точности передачи определяют величины допусков параметров, затем, определив монтажные погрешности, вновь обращаются к стандарту и определяют возможность изготовления отдельно взятого колеса. Если на допуски на изготовление не хватает, но необходимо пересмотреть конструкторско-технологические приемы обеспечения точности, применяемые при сборке передачи.

В качестве примера рассмотрим методику по биению зубчатого венца (РБЗВ) F_r . Например, необходимо определить возможность изготовления зубчатых колес для передачи 7-й степени точности. РБЗВ, вызванное биением дорожки качения внутреннего кольца шарикоподшипника R_i при одинаковом типоразмере и точности подшипников, определяется по следующей формуле:

$$F_{rRi} = R_i \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot l}{L}\right)^k, \text{ мкм}$$

где R_i – радиальное биение дорожки качения внутреннего кольца шарикоподшипника (рис.1,в); l – расстояние между средними плоскостями зубчатого венца и ближайшей к нему опоры; L – расстояние между средними плоскостями опор; $k = 1$ – при консольном расположении (рис.1,а), и $k=0$ – при расположении между опорами (рис.1,б).

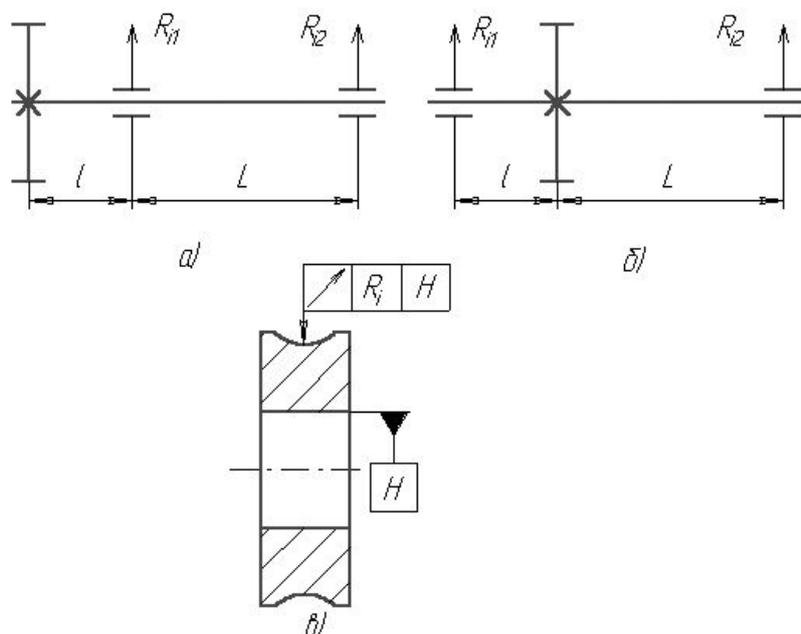


Рис. 1. Варианты взаимного расположения зубчатого колеса и опор вала: а) консольное; б) между опорами. в) радиальное биение дорожки качения внутреннего кольца шарикоподшипника

Учитывая, что колесо на вал насаживается в процессе сборки без зазора, а ступенчатый вал обработан в центрах, погрешности монтажа, связанные с этими операциями влиять на РБЗВ не будут. РБЗВ колес в сборе определяем по заданной степени точности и модулю, диаметрам колес по таблицам ГОСТов. В данном примере используют ГОСТ 9178-81. ($F_{r1\text{табл}7} = 18$ мкм; $F_{r2\text{табл}7} = 26$ мкм, $F_{rRi} = 3,6$ мкм).

РБЗВ колес в передаче, вызванные погрешностями изготовления, определяем по формулам:

$$F_{r01} = F_{r1\text{табл}j} - F_{rRi}, \text{ мкм};$$

$$F_{r02} = F_{r2\text{табл}j} - F_{rRi}, \text{ мкм}$$

В приведенных выше формулах индекс j соответствует задаваемой степени точности передачи, а, следовательно, и отдельных колес в сборе. В данном примере $F_{r01} = F_{r1\text{табл}7} - F_{rRi} = 14,4$ мкм; $F_{r02} = F_{r2\text{табл}7} - F_{rRi} = 22,4$ мкм. По тем же таблицам ГОСТов

определяем возможность изготовления отдельно взятых колес, которая определяется условиями:

$$F_{r01табл.j-m} \leq F_{r01} (m=1,2, \dots);$$

$$F_{r02табл.j-m} \leq F_{r02} (m=1,2, \dots)$$

В приведенных выше формулах индекс m соответствует изменению степени точности при перерасчете параметра для перехода от передачи к отдельно взятому колесу. В рассматриваемом случае $F_{r01табл.6} = 12$ мкм и $F_{r02табл.6} = 19$ мкм, т.е. можно изготовить отдельно взятые колеса по 6-й степени точности. Возможно уменьшение требований к точности опор, т.е. вместо 6-го класса точности шарикоподшипников достаточно применить опоры 0-го класса (т.е. $R_i = 10$ мкм, $F_{r01} = F_{r1табл.7} - F_{rRi} = 12$ мкм, $F_{r02} = F_{r2табл.7} - F_{rRi} = 20$ мкм, $F_{r01табл.6} = 12$ мкм $\leq F_{r01} = 12$ мкм; $m = 1$; $F_{r02табл.6} = 19$ мкм $\leq F_{r02} = 20$ мкм).

Для решения прямой задачи точности задаются степенью точности отдельно взятого колеса, нормируемого по стандарту, затем рассчитывают монтажные погрешности и по действующей НД определяют степень точности колеса на рабочей оси в передаче.

$$F_{r1табл.j+m} \geq F_{r1} (m=1,2, \dots);$$

$$F_{r2табл.j+m} \geq F_{r2} (m=1,2, \dots)$$

В приведенных выше формулах индекс m соответствует изменению степени точности при перерасчете параметра для перехода от отдельно взятого колеса к передаче. Рассмотрим случай, когда имеются отдельно взятые колеса 7-й степени точности. Для простоты иллюстрации остальные параметры назначаем по предыдущему примеру. Получаем $F_{r1} = F_{r01табл.7} + F_{rRi} = 21,6$ мкм, $F_{r2} = F_{r02табл.7} + F_{rRi} = 29,6$ мкм. Для 8-й степени точности ($m = 1$) проверяем условия $F_{r1табл.8} = 21$ мкм $\geq F_{r1} = 21,6$ мкм и $F_{r2табл.8} = 26$ мкм $\geq F_{r2} = 32$. Из неравенств следует, что по 8-й степени точности можно паспорттировать только колесо. Для 9-й степени точности ($m = 2$) $F_{r1табл.9} = 26$ мкм $\geq F_{r1} = 21,6$ мкм, т.е. шестерня может быть паспорттирована по указанной степени точности. Иначе говоря, колеса в передаче могут быть паспорттированы по разным степеням точности, что ГОСТами не предусмотрено. Всю же передачу можно формально паспорттировать по 9-й степени, однако фактически одно колесо будет точнее. И этот вывод еще один довод в пользу необходимости изменения стандартов.

Теперь рассмотрим методику определения суммарной приведенной погрешности монтажа цилиндрических колёс. Она рассчитывается по формуле (ГОСТ 21098-82):

$$E_{\Sigma M} = \sqrt{\left(\frac{e_r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}\right)^2 + (e_a \cdot \operatorname{tg} \beta)^2},$$

где e_r – монтажное радиальное биение, e_a – монтажное осевое биение, $\alpha = 20^\circ$ – угол исходного профиля колеса; β – угол наклона линии зуба (поскольку $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} 0^\circ = 0$, то осевое биение не вносит своего вклада в суммарную погрешность).

Монтажное радиальное биение зубчатого венца (РБЗВ) колеса в передаче равно

$$e_r = F_{rs} + F_{rst} + F_{rRi} + F_{r\beta} + F_{r\text{корп}} + F_{r\text{ун}}, \text{ где}$$

F_{rs} – РБЗВ, вызванное максимальным посадочным зазором в соединении колесо–вал, рис.2, а; F_{rst} – РБЗВ, вызванное относительным биением посадочных мест колеса и подшипника на валу, рис.2, б; F_{rRi} – РБЗВ, вызванное биением дорожки качения внутреннего кольца шарикоподшипника R_i , рис.1; $F_{r\beta}$ – допуск на РБЗВ (биение колеса, вызванное погрешностью его изготовления), рис.2, в; $F_{r\text{корп}}$ – РБЗВ, вызванное относительным биением отверстий в корпусе для установки наружных колец шарикоподшипника, рис.3; $F_{r\text{ун}}$ – РБЗВ, вызванное максимальным посадочным зазором в соединении подшипник – корпус, рис.4.

Монтажное осевое биение зубчатого венца (РБЗВ) колеса в передаче равно

$$e_a = F_{t\beta} + 2F_{t\text{ун}} + F_{t\text{корп}}, \text{ где}$$

$F_{t\theta}$ – осевое (торцевое) биение зубчатого колеса; $2F_{tun}$ – осевое биение (биение торца относительно отверстия) пары шарикоподшипников; $F_{t\text{корп}}$ – осевое (торцевое) биение корпусных элементов (например сумма торцевых биений посадочных отверстий для подшипников во втулке и биений крепежных заплечиков втулки, относительно отверстий под подшипники).

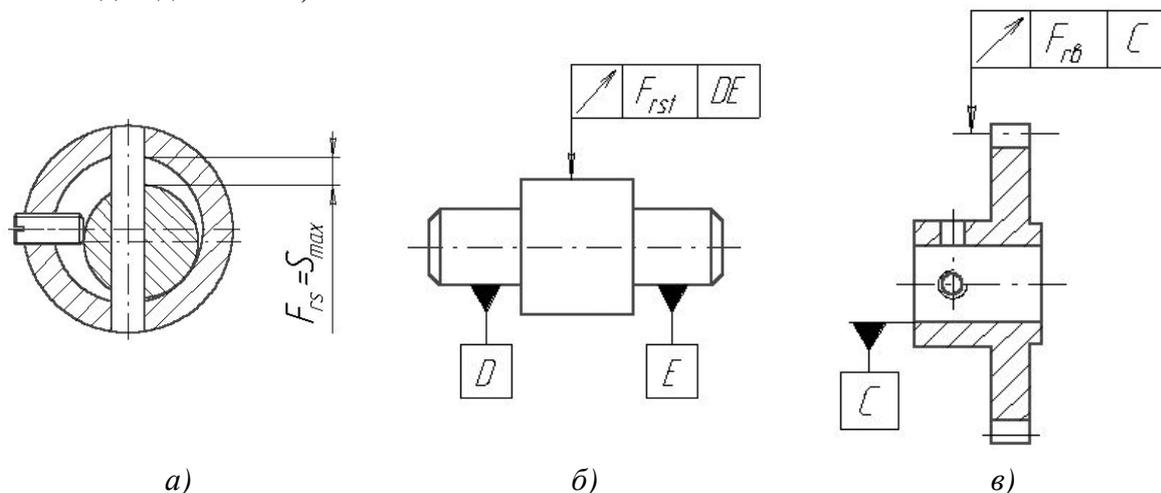


Рис.2. а) РБЗВ, вызванное максимальным посадочным зазором в соединении колесо–вал;
 б) РБЗВ, вызванное относительным биением посадочных мест колеса и подшипника на валу;
 в) Допуск на радиальное биение колеса (биение, вызванное погрешностями изготовления).

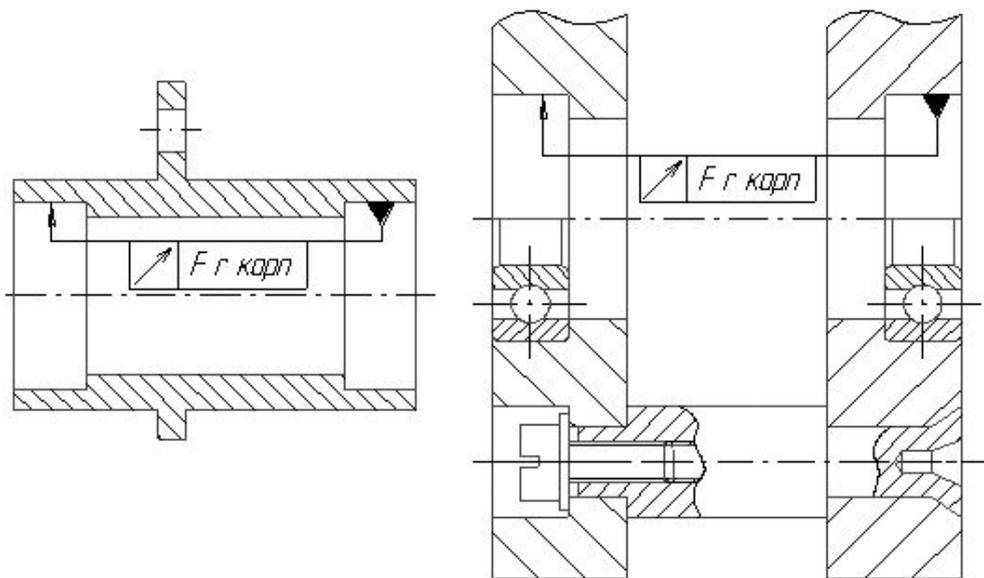


Рис. 3. Радиальные биения, вызванное относительным биением отверстий в корпусе для установки наружных колец шарикоподшипника.

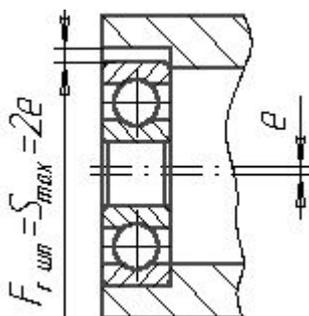


Рис. 4. РБЗВ, вызванное максимальным посадочным зазором в соединении подшипник – корпус.

2. Пример использования метода

В качестве пояснения предложенной методики приведем результаты расчета для определения степени точности зубчатых колес в передаче по нормам кинематической точности с учетом погрешностей изготовления и монтажа деталей на конкретных схемах передач: произведем расчет для консольной схемы и схемы с межопорным расположением колес (табл.1).

Параметры зубчатого колеса:

Модуль: $m = 0,5$ мм;

Число зубьев: $Z = 30$;

Степень точности по ГОСТ 9178-81: 5.

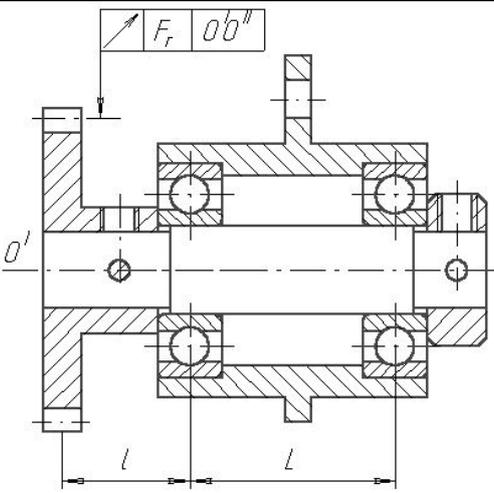
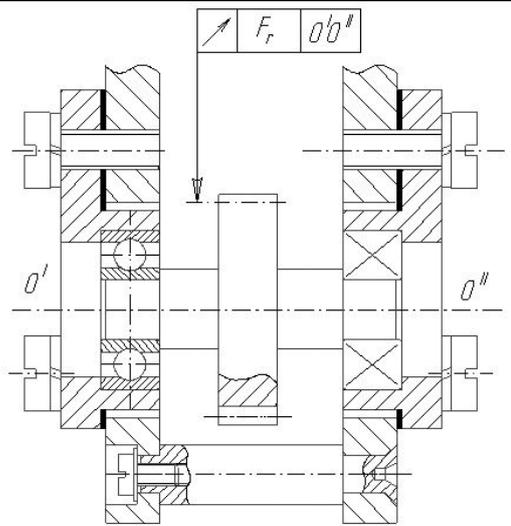
Параметр	Консольная схема	Межопорная схема
Схема		
F_{rs}	7 мкм (посадка колеса на вал $\varnothing 5H6/k5$)	0
F_{rst}	5 мкм	0
F_{rRi}	5 мкм ($R_i=3,5$ мкм, $l=8$ мм, $L=30$ мм; $k=1$)	3,5 мкм ($R_i=3,5$ мкм; $k=0$)
F_{rb}	12 мкм	12 мкм
$F_{r\text{ корп}}$	5 мкм	0
$F_{r\text{ шп}}$	7 мкм (посадка подшипника во втулку $\varnothing 15 K6/15$)	7 мкм (посадка подшипника во втулку $\varnothing 15 K6/15$)
e_r	46 мкм	22,5 мкм
$E_{\Sigma M}$	14 мкм	8 мкм
Степень точности изготовл. колеса	5	5
Степень точности колеса отн. рабочей оси	9	8

Таблица 1. Расчет для консольной схемы и схемы с межопорным расположением колес

Заключение

Приведенные результаты расчетов показывают, что при изготовлении зубчатого колеса по 5 степени точности, в собранной передаче по консольной схеме, при учете погрешностей монтажа, относительно ее рабочей оси степень точности будет 9 (т.е. понижение степени на 4 единицы!). В то же время видно, что при изготовлении зубчатого колеса по той же 5 степени точности, в собранной передаче с расположением колеса между опорами, при учете погрешностей монтажа, степень точности колеса относительно рабочей оси будет 8 (т.е. понижение степени на 3 единицы).

Приведенные примеры так же указывают на то, что учет суммарной погрешности монтажа обязателен, так как она оказывает существенное влияние на степень точности колеса в передаче, относительно его рабочей оси. С другой стороны, у конструктора есть возможность уменьшить эту погрешность монтажа. Этого можно добиться использованием вместо схем консольного расположения схемы межопорного расположения колес (в том случае, когда подобный шаг недопустим, погрешность можно уменьшить варьируя параметрами l и L , см. рис.3). С помощью других конструкторско-технологических приемов возможно существенное уменьшение (или даже сведение к нулю) некоторых слагаемых монтажного биения, таких как F_{rs} , F_{rst} , F_{rRi} и $F_{r\text{конт}}$.

Работа призвана показать пути достижения временного компромисса между существующей нормативной документацией и сложившейся практикой, что очень важно в условиях вводимой сертификации продукции.

Литература

1. Нежурин И.П. Применение отраслевых стандартов на допуски зубчатых колес ОСТ 1.41667-77 и ОСТ 1.41671-77: Методические материалы. - М.: НИАТ, 1980. - С.88.
2. Елисеев Ю.С. Точность зубчатых колес. Допуски // В кн.: Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С.Елисеев, В.В.Крымов, И.П.Нежурин, В.С.Новиков, Н.М.Рыжов. - М.: Высшая школа, 2001. - С.283-338.
3. Куцоконь В.А. Точность кинематических цепей приборов. Л.: Машиностроение, 1980. - 221с.
4. Шалобаев Е.В. Конструкторско-технологическое обеспечение точности зубчатых передач и пути совершенствования стандартов для целей САПР // Доклады VI национального конгресса по теоретической и прикладной механике. В 2-х т. - Варна: изд-во Болг.АН, 1989. - Т.2. С.215-219.
5. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колес и передач // Вестник машиностроения. 1990. №12. -С.34-36.
6. Проблемы качества механических передач и редукторов. Точность зубчатых колес и передач / Под ред. Б.П.Тимофеева, Е.В.Шалобаева. - Л.: ЛДНТП, 1991. - 140с.
7. Шалобаев Е.В. Выбор и стандартизация геометро-кинематических и точностных параметров приборных зубчатых передач. Дисс. ... канд. техн. наук. - СПб.: ИТМО, 1998. - 32с.
8. Шалобаев Е.В. Методика расчета допусков на монтажные погрешности и условие равноточности элементов зубчатых передач // Управление в технических системах. - Ковров: КТА, 1998. - С.164-169.
9. Шалобаев Е.В. О новой концепции нормирования параметров точности зубчатых колес и передач // Сборник трудов: Современные проблемы и методология проектирования и производства силовых зубчатых передач. - Тула: ТулГУ, 2000. - С.233-236.
10. Шалобаев Е.В. Нормирование параметров точности зубчатых колес и передач: выбор новой концепции // Проблемы совершенствования передач зацеплением. - Ижевск-М.: ИжГТУ, 2000. - С.149-157.
11. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Расчет точности зубчатых колес и цепей // В кн.: Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. Под ред. В.Е.Старжинского и Е.В.Шалобаева. - СПб.-Гомель: ИММС, 1998. - С.296-346.
12. Шалобаев Е.В. Конструкторско-технологическое обеспечение качества приборных зубчатых передач // В кн.: Технология проектирования и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. Под ред. В.Е.Старжинского и М.М.Кане. - Минск: Технопринт, 2003. - С.481-489.
13. Симеонов С., Краузе В., Гаврилова О.В. и др. Точность передач с пластмассовыми зубчатыми колесами // В кн.: Пластмассовые зубчатые колеса в точном приборостроении. Под ред. В.Е.Старжинского. - Мн.: Навука і тэхніка, 1992. - 307с.
14. Попов П.К., Штриплинг Л.О. Предпосылки пересмотра нормативной документации по расчету точности зубчатых передач // Вестник машиностроения. - 1998. - №6. - С.59-62.
15. Политавкин А.М. Зубчатые передачи в приборах // А.М.Политавкин, Е.В.Шалобаев, Г.Б.Заморуев, В.В.Симанков. - Л.: ЛИТМО, 1985. - С.88.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО СТИМУЛЯТОРА

А.В. Ефименко, Ю.С. Монахов

Научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев

Рассмотрены проблемы, возникающие при трансмиссии лазерного излучения к биообъекту. Указаны преимущества применения метода сканирования сфокусированным лазерным лучом в импульсном режиме. Приведены способы оптимизации параметров сканирования для разрабатываемой установки.

Введение

Несмотря на то, что лазеры используются в медицине сравнительно недавно – немногим более 30 лет, успехи их применения достаточно очевидны. Применение лазеров в медицине основано на взаимодействии света с биологическими тканями. Исходя из характера этого взаимодействия, можно выделить три основных направления использования лазеров в медицинской практике. Это лазерная диагностика, лазерная терапия и лазерная хирургия.

Для создания диагностических приборов используется невозмущающий тип взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями, когда биологическая субстанция не изменяет своих свойств в процессе взаимодействия с излучением. Это такие эффекты, как рассеивание, отражение и проникновение.

Использование лазеров в медицине основано на фотодеструктивном воздействии, при котором в силу теплового, гидродинамического, фотохимического и других эффектов света возникает деструкция тканей.

И наконец, применение лазеров как терапевтического средства обусловлено фотохимическим воздействием, при котором поглощенный биологическими тканями свет возбуждает в них атомы и молекулы, вызывает фотохимические реакции синтеза или распада молекул. Фотобиологические эффекты непосредственно зависят от параметров лазерного излучения: длины волны, плотности мощности времени воздействия на биологические ткани. В лазерной терапии используется низкоинтенсивное лазерное излучение (НИЛИ) до 500 мВт/см^2 .

Оптимизация параметров сканирования

Широкое использование лазерной терапии, однако, по-прежнему вызывает многочисленные дискуссии об оптимальных параметрах процедур и противопоказаниях, поскольку лечебный эффект далеко не всегда возможно воспроизвести или гарантировать. Анализируя сложившиеся представления об оптимальных параметрах лазеротерапии и параметры выпускаемых разными фирмами лазерных аппаратов, некоторые авторы пришли к выводу, что в "медицинской практике, по существу, используется неконтролируемое воздействие лазерного излучения на пациента". На практике многие врачи встречались с негативными влияниями, но их, как правило, объясняли неправильно выбранными параметрами, индивидуальной непереносимостью, сопутствующими заболеваниями. Рекомендуемые параметры плотности мощности в разных пособиях отличаются в сотни раз (от $0,5$ до 200 мВт/см^2), а рекомендуемые дозы варьируются от $0,1$ до 120 Дж/см^2 . Одной из причин этого является отсутствие точных сведений о количестве лазерной энергии, достигающей области, подвергаемой лазеротерапии. Поэтому важнейшей задачей является учет наибольшего числа факторов, влияющих на дозиметрию лазерной процедуры, а также разработка необходимых методов и средств.

Выпускаемые в настоящее время лазерные аппараты широко используют методы облучения лазерным излучением, либо контактно, вручную перемещая излучающую головку или световод непосредственно по облучаемой поверхности, либо бесконтакт-

но, проецируя расфокусированный луч из излучающей головки или световода на облучаемую поверхность. Обычно на выходе излучателя имеется точка. При необходимости воздействия на большие очаги поражения – варикозные язвы, ожоги и т.п. – ряд авторов рекомендовали проводить ручное сканирование (горизонтальное или вертикальное смещение луча для покрытия им определенных зон или очагов) лучом лазера или расфокусирование луча, что приводит к снижению потока мощности, являющейся важным фактором эффективности лечения. Кроме этого, при расфокусировке поперечное распределение интенсивности имеет вид колокола, крутизна спада фронтов зависит от степени расфокусировки лазерного луча. Следовательно, энергетическая экспозиция при облучении расфокусированным лучом имеет такое же распределение по облучаемой поверхности. При этом разница между энергетической экспозицией в центре и на крае облучаемой области может отличаться в несколько раз. Расфокусировка луча обеспечивает получение пятна излучения в форме круга, другие фигуры можно получить только с помощью соответствующих насадок, использование которых также снижает полезную мощность установки.

Одним из путей устранения указанных недостатков является использование метода сканирования. Облучение сфокусированным лучом дает возможность равномерно воздействовать дозированным излучением на каждую точку пораженной поверхности, но для этого луч должен перемещаться по всей поверхности, иными словами, этого можно достичь, используя режим сканирования, который позволяет обработать зону любой конфигурации. Особенность метода сканирующей лазеротерапии заключается в бесконтактном воздействии сфокусированным лазерным лучом без потери мощности излучения на поверхность объекта с различной частотой сканирования.

Воздействие на большие поверхности сфокусированным лучом обеспечивает передачу энергии излучения тканям за более короткое время по сравнению с облучением аналогичной пораженной поверхности расфокусированным лазерным лучом, так как за счет перемещения луча создаются условия для последовательного периодического воздействия и равномерного распределения энергии лазерного излучения в зоне обрабатываемой поверхности.

Существенным является тот факт, что при непрерывном излучении лазера создается импульсный режим облучения за счет пространственного перемещения луча для каждой отдельной точки поверхности. Это обеспечивает благоприятный режим лечения, так как импульсный режим не дает возможности облучаемой клетке адаптироваться к лазерному излучению и предотвращает чрезмерный перегрев в области облучения. Благодаря сканирующему устройству, оптико-механическому дефлектору, можно подобрать соответствующие параметры (форму, амплитуду и частоту) сканирования в соответствии с площадью и состоянием поверхности, подлежащей лечению, то есть проводить лечение пациентов по индивидуальной программе. Немаловажным представляется также тот факт, что использование метода сканирующей лазеротерапии позволяет уменьшить уровень облучения медицинского персонала, так как после начальной настройки управление стимулятором осуществляется автоматически.

Учитывая многочисленные литературные данные, например, можно отметить перспективность воздействия лазерным излучением в импульсном режиме по сравнению с таковым при непрерывном режиме излучения. Во-первых, к импульсным лазерным процедурам развивается значительно меньшая адаптация. Во-вторых, изменяя параметры импульсных лазерных воздействий, можно использовать энергию в дозах, существенно превышающих аналогичные при непрерывном режиме проведения процедуры. Особенность импульсного режима заключается в том, что становится возможным избежать негативных реакций биотканей, связанных со значительным перегревом в области облучения, при этом обеспечивается непосредственное воздействие на глубоко расположенные структуры без повреждения поверхностных и приповерхностных

тканей. В-третьих, импульсные лазерные воздействия (особенно в диапазоне частот от 1 до 1000 Гц) с учетом ритмичности физиологических процессов в организме больше отвечают естественным условиям и легче воспринимаются теми или иными системами. При правильном выборе ритма и параметров возможно резонансное влияние, позволяющее при малой интенсивности воздействия значительно изменить функцию органа или системы. В-четвертых, импульсные лазерные воздействия облегчают индивидуальную дозировку и повышают адекватность лазерной терапии. Кроме того, импульсное воздействие излучением дает более реальные шансы для разработки систем с автоматической регуляцией параметров процедуры, основанной на принципе обратной связи.

В качестве сканирующего устройства выбран двухкоординатный отражающий оптико-механический дефлектор. Преломляющие и голографические дефлекторы не рассматриваются, во-первых, из-за относительно низкого коэффициента пропускания, во-вторых, из-за наличия хроматических aberrаций, которые нежелательны, так как может потребоваться необходимость сканирования лучом, состоящим из нескольких лучей с разными длинами волн, например, основным лучом и лучом пилотом.

В качестве отражающих элементов использованы колеблющиеся плоские зеркала установленные так, что плоскость отражения совпадает с осью колебаний. Такое расположение позволяет избавиться от линейного искажения траектории сканирования (рис.1). Относительное искривление траектории фокуса описывается выражением

$$K(\varphi) = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} \cdot 100\%$$

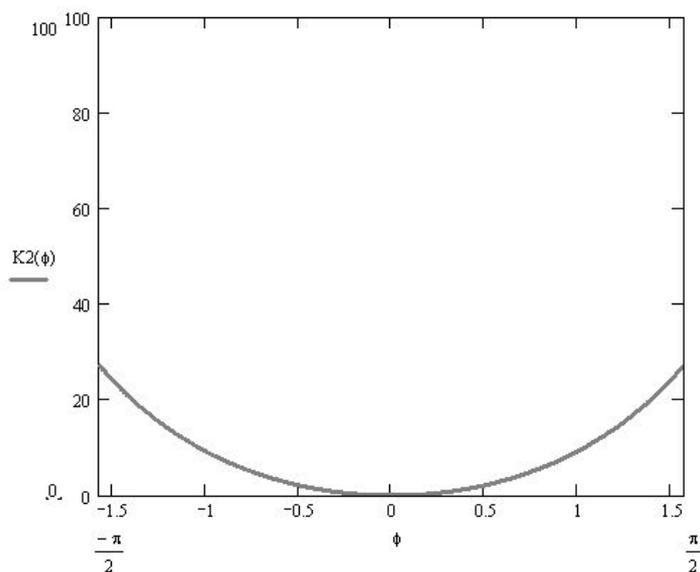


Рис.1. Относительное линейное искривление траектории фокуса от угла сканирования

При углах сканирования $\pm 10^\circ$ искривление составляет величину менее одного процента.

Другой вид искажения, присущий предлагаемой конструкции дефлектора, – это искажение линейной скорости сканирования в зависимости от угла сканирования. Относительная неравномерность линейной скорости сканирования определяется выражением

$$K(\varphi) = \left(\frac{1}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Для углов сканирования $\pm 10^\circ$, при условии равной угловой скорости вращения отражающей плоскости, относительное искажение линейной скорости сканирования составляет величину около 3%. В области больших углов отклонения искажение линейной скорости сканирования возрастает, однако это увеличение линейной скорости сканирования может быть частично скомпенсировано снижением угловой скорости сканирования в области больших углов отклонения. На участках, где угловая скорость сканирования стремительно стремится к 0, можно осуществлять гашение луча по данным с позиционирующих датчиков, тем самым не используя эти участки в формировании раstra.

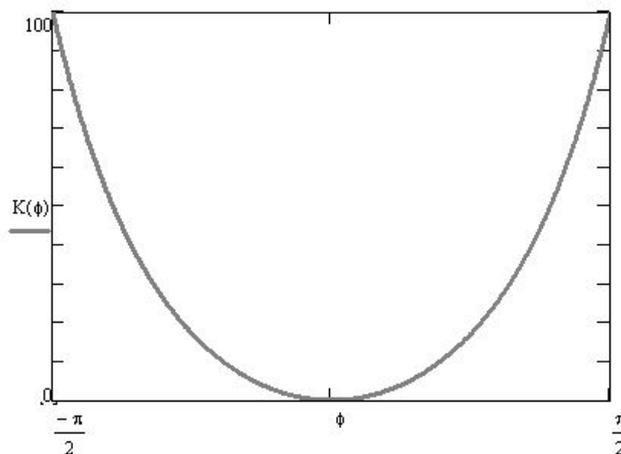


Рис. 2. Относительное искажение линейной скорости сканирования от угла сканирования

Формирование необходимой формы и амплитуды сканируемой области осуществляется также гашением луча. Предлагаемая система позволяет значительно облегчить и повысить точность дозиметрии лазерного излучения при проведении процедур лазеротерапии.

Заключение

Целью работы является разработка и исследование сканирующего лазерного стимулятора. В связи с этим были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ методов трансмиссии излучения в облучаемые ткани;
- разработка и обоснование метода сканирования для лазеротерапии;
- оптимизация параметров сканирования (относительного линейного искривления траектории фокуса и относительного искажения линейной скорости сканирования от угла сканирования).

Литература

1. Шалобаев Е.В., Ефименко В.Т., Ефименко А.В., Монахов Ю.С. Разработка и изготовление оптико-механического дефлектора на основе моментных двигателей и торсионов // Известия ОрелГТУ Серия Машиностроение и Приборостроение. 2003. - №3. С.84-88.
2. Шалобаев Е.В., Ефименко В.Т., Ефименко А.В., Монахов Ю.С. Разработка биологических обратных связей для сканирующих лазерных стимуляторов // Труды шестой сессии международной научной школы "Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем" / Под редакцией В.М.Мусалимова и Б.С.Падуна. – СПб: ИПМаш РАН, 2004. С.108-112.
3. Сканирующие лазерные установки в медицине / Шалобаев Е.В. Юркова Г.Н., Ефименко В.Т. и др. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ) Выпуск 4. Квантовая электроника, волновая оптика и лазерные технологии. – СПб.: ИТМО. 2001.- С.147-150.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЯДОВ ФУРЬЕ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КРУГЛОСТИ

С.Ю. Млокосевич

Научные руководители – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев, к.т.н., доц. И.Д. Гебель

В работе рассматривается возможность использования разложения профиля деталей в ряды Фурье для выделения отдельных характеристик геометрии профиля - отклонения от круглости, волнистости, овальности и др. Использование подобного подхода позволило бы более строго, по мнению авторов, нормировать отдельные параметры геометрической точности.

Введение

Измерение круглости отдельных сечений деталей типа тел вращения (валы, оси, кольца подшипников, втулки и т.д.) производится чаще всего путем анализа измерения радиус-векторов точек профиля в некоторой системе координат. Непосредственно измерение величин радиус-векторов затруднительно, поэтому непосредственно измеряют значения отклонения величины радиус-вектора детали от некоторой базовой кривой. В качестве базовой кривой принимают, например, траекторию движения некоторой точки шпинделя измерительного инструмента. Изменение радиус-вектора точки профиля обязательно равно по величине изменению расстояния от соответствующей точки базовой кривой до точки детали и противоположно по направлению (более подробно см. [1]). В результате измерения получают набор радиус-векторов точек профиля, которые для наглядности выводят в виде полярных диаграмм (круглограммах).

Радиус-векторы (вернее, их изменение) точек профиля детали непосредственно не дают информации о величине отклонения от круглости профиля. Это вызвано тем, что значение измеряемых величин радиус-векторов точек содержит в себе информацию также о шероховатости и волнистости. Зачастую шероховатость профиля влияет на измерение незначительно. С одной стороны, это связано с тем, что влияние шероховатости ослабляется измерительным наконечником датчика (например, [2]). С другой стороны, электрическая схема измерительного преобразователя оказывает влияние на результат измерения в соответствии со своей АЧХ. Сильнее всего эти искажения сказываются на шероховатости, значительно менее искажая волнистость и отклонение от круглости. Таким образом, можно считать, что очень часто результат измерения отклонения формы (отклонения от круглости) содержит в себе также волнистость и часть шероховатости.

Нормируются величины отклонения от круглости, волнистость и шероховатость по ГОСТ 24642-81 [3] (как и по более позднему ISO 1101 – 1995 [4]) отдельно. Это и не удивительно, так как отклонения формы и волнистость детали по-разному влияют на работу узла, в который входит деталь. Так волнистость чаще всего является причиной развития колебательных процессов, в частности звукового диапазона. В то время как отклонение от круглости вызывает снижение кинематической точности соответствующего узла.

Задача разделения волнистости, шероховатости и отклонения от круглости решается при помощи различных способов фильтрации или сглаживания (см. [5–7]).

В данной статье приводится описание возможностей рядов Фурье для фильтрации в соответствии с требованиями действующего стандарта ГОСТ 24642-81 и более поздних международных (ГОСТ 24642-81 не задает методы фильтрации, стандарты ISO предусматривают несколько различных методов).

Разложение профиля заготовки в ряд Фурье

ГОСТ 24642-81 предусматривает нормирование следующих величин, характеризующих точность формы поперечного сечения: отклонение от круглости, овальность,

огранка, волнистость, шероховатость. Эти параметры можно интерпретировать с позиции рядов Фурье. Так, овальность – профиль, описываемый уравнением

$$r(\varphi) = R_0 + A_2 \cos(2\varphi + \varphi_0^2),$$

где R_0 – постоянная составляющая, A_2 – амплитуда второй гармоники ряда Фурье, φ_0^2 – начальная фаза второй гармоники ряда Фурье, φ – угловая координата точки профиля (рис. 1).

Разложения в ряд Фурье можно использовать для выделения отдельных отклонений формы.

Изобразим на одном рисунке график второй гармоники ряда Фурье и изображение овальности из ГОСТ 24642-81.

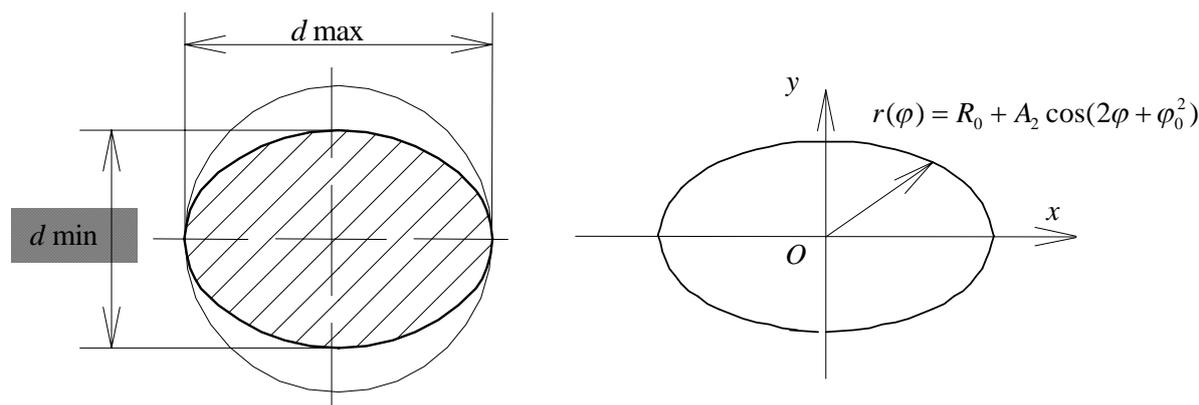


Рис. 1. Овальность по ГОСТ – слева, график вторая гармоника – справа

Величина овальности, определяемая как

$$EFK = \frac{d \max - d \min}{2},$$

будет рассчитываться следующим образом:

$$EFK = \frac{d \max - d \min}{2} = \frac{2r(\varphi) \max - 2r(\varphi) \min}{2} = [R_0 + A_2 \cos(0)] - [R_0 + A_2 \cos(\pi)] =$$

$$= R_0 + A_2 - R_0 + A_2 = 2A_2.$$

Для огранки на примере трехгранности:

$$r(\varphi) = R_0 + A_3 \cos(3\varphi + \varphi_0^3),$$

где R_0 – постоянная составляющая, A_3 – амплитуда третьей гармоники ряда Фурье, φ_0^3 – начальная фаза третьей гармоники ряда Фурье, φ – угловая координата точки профиля (рис. 2).

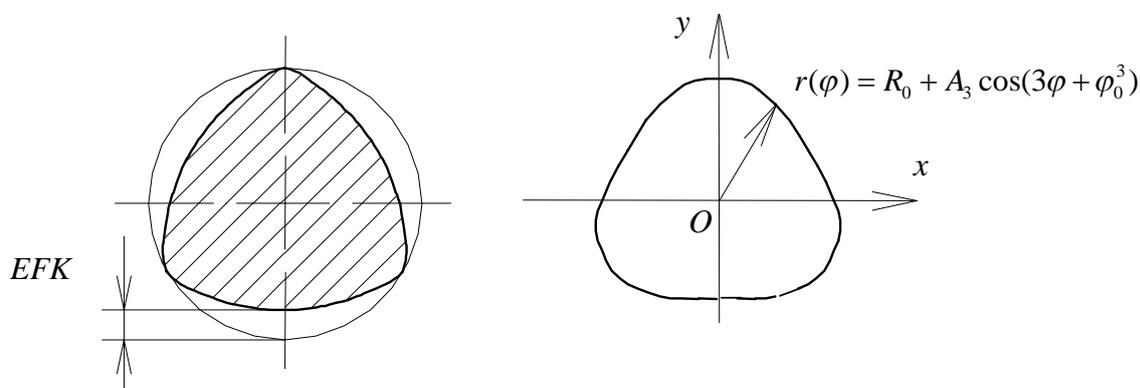


Рис. 2. Огранка по ГОСТ – слева, график третьей гармоника – справа

Отклонение от круглости при этом равно

$$EFK = r\left(\frac{\pi}{2}\right) - r\left(-\frac{\pi}{2}\right) = R_0 + A_3 - R_0 + A_3 = 2A_3.$$

Аналогично можно показать соответствие между 4-й гармоникой и четырехгранностью, 5-й и пятигранностью и т.д. Разницы между гармониками отклонения формы, волнистости и шероховатости нет.

В ГОСТе записано, что для огранки с нечетным количеством граней все диаметры равны.

Для нечетных гармоник ряда Фурье:

$$\begin{aligned} D(\varphi) &= \left(R_0 + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \varphi_0^{2k+1})\right) + \left(R_0 + A_{2k+1} \cos((2k+1)(\varphi + \pi) + \varphi_0^{2k+1})\right) = \\ &= 2R_0 + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \varphi_0^{2k+1}) + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + (2k+1)\pi + \varphi_0^{2k+1}) = \\ &= 2R_0 + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \varphi_0^{2k+1}) + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \pi + \varphi_0^{2k+1}) = \\ &= 2R_0 + A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \varphi_0^{2k+1}) - A_{2k+1} \cos((2k+1)\varphi + \varphi_0^{2k+1}) = 2R_0. \end{aligned}$$

Другими словами, значения всех диаметров также равны и не зависят от величины амплитуды гармоники.

Для четных гармоник:

$$\begin{aligned} D(\varphi) &= \left(R_0 + A_{2k} \cos(2k\varphi + \varphi_0^{2k})\right) + \left(R_0 + A_{2k} \cos(2k(\varphi + \pi) + \varphi_0^{2k})\right) = \\ &= 2R_0 + A_{2k} \cos(2k\varphi + \varphi_0^{2k}) + A_{2k} \cos(2k(\varphi + \pi) + \varphi_0^{2k}) = \\ &= 2R_0 + A_{2k} \cos(2k\varphi + \varphi_0^{2k}) + A_{2k} \cos(2k\varphi + 2k\pi + \varphi_0^{2k}) = \\ &= 2R_0 + 2A_{2k} \cos(2k\varphi + \varphi_0^{2k}). \end{aligned}$$

Наибольшее значение диаметра из всех возможных равно

$$\max(D(\varphi)) = 2R_0 + 2A_{2k},$$

а наименьшее –

$$\min(D(\varphi)) = 2R_0 - 2A_{2k}.$$

Разность соответствующих наибольших и наименьших радиусов равна

$$\frac{\max(D(\varphi)) - \min(D(\varphi))}{2} = 2A_{2k},$$

т.е. некруглости детали.

Таким образом, мы показали, как использовать гармоники ряда Фурье для представления овальности и огранки.

Следует отметить, что огранка может быть отражена гармониками Фурье двойко. Рассмотрим следующий пример. Пусть некоторый профиль представлен второй гармоникой. Гармоника с номером 6 при совпадении фазы с фазой второй гармоники будет увеличивать значение радиус-вектора в точках максимумов и уменьшать в точках минимумов. Так же будут действовать гармоники с номерами из ряда 7, 10, 14 и т.д.

В общем случае n -ю гармонику будут усиливать гармоники с номерами $(2k+1)n$ при $k=1,2,\dots,\infty$.

При рассмотрении сил, генерируемых неровностями профиля (колебательные процессы), каждая гармоника будет вносить свой вклад. Поэтому использование одной гармонике при представлении огранки кажется предпочтительным.

Любой реальный профиль можно разложить в сходящийся ряд Фурье. Следовательно, его можно представить суммой нескольких гармоник. Для выделения интересных частот (количества неровностей на оборот) можно воспользоваться отрезком полученного ряда:

$$S(\varphi) = \sum_{i=A}^B A_i \cos(i\varphi + \varphi_0^i),$$

где A и B – соответственно, нижняя и верхняя границы полосы пропускания фильтра.

Заключение

Следует отметить, что рассмотренный подход позволяет выделить отдельно любой набор гармоник профиля. В отличие от фильтров Гаусса, такой фильтр обладает абсолютно четкими границами, в то время как границы фильтра Гаусса размыты: задавая граничные значения полосы пропускания фильтра Гаусса 2-22, нельзя сказать, что составляющие профиля периодичностью 23 неровности на оборот не попадут в рассматриваемый профиль.

В целом, разложение профиля деталей в ряды Фурье имеет практическую пользу для решения задачи разделения отдельных составляющих геометрии профиля как при нормировании (ограничение отдельных гармоник, их суперпозиции), так и при проведении измерений. Вероятно, использование рядов Фурье может стать заменой существующим фильтрам.

Литература

1. N. Cho, J. Tu. Roundness modeling of machined parts for tolerance analysis. Precision Engineering, №25 (2001) p. 35-47.
1. 2. ISO 4291:1985 Methods for the assesement of departure from roundness. Measurement of variations in radius
2. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей.
3. ISO 1101 – 1995. Technical drawings. Geometrical tolerancing. Tolerancing of form, orientation, location and run-out. Generalities, definitions, symbols, indications on drawings
4. Т.С. Лоповок. Волнистость поверхности и ее измерение. М.: Изд. стандартов, 1973.
5. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд. стандартов, 1974.
6. ISO 13565-1:1996. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 1: Filtering and general measurement conditions

КОНТРОЛЬ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕПЛОСКОСТНОСТИ И НЕКРУГЛОСТИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ УСТРАНЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ

С.Ю. Млокосевич

Научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев

Рассматривается способ измерения периодических отклонений от правильной геометрической формы (гармонических составляющих профиля) заготовок и их устранения как для плоских тел, так и тел вращения с базированием на измеряемую (или обрабатываемую в случае обработки) поверхность. Приведены соответствующие формулы для расчета конструкций измерительных приборов и корректирующих приспособлений.

Введение

Периодические неровности на сопрягаемых поверхностях деталей могут стать причиной развития колебательных процессов в механизме. В случае совпадения собственных частот деталей механизма с частотой колебаний, вызванных наличием периодических неровностей, развиваются резонансные явления.

Колебательные процессы в узлах механизмов могут проявляться во время работы, в частности, в виде шума. Это негативно сказывается на условиях труда персонала.

Другое отрицательное явление, связанное с наличием колебаний, – снижение срока службы узлов механизмов. Кроме того, колебания приводят к снижению точности измерительных приборов. В отдельных случаях колебания накладывают ограничения на допускаемые максимальные скорости движения узлов механизма. Зачастую присутствие на деталях гармонических составляющих (периодических неровностей) вызвано изменением составляющих усилий резания и жесткостью узлов.

1. Анализ причин возникновения периодических неровностей на заготовках

Уравнение, описывающее вынужденные колебания без учета сопротивления, может быть записано в следующей форме [1]:

$$q'' + k^2 q = h \sin(pt + \delta), \quad (1)$$

где q – обобщенная координата, k – круговая частота собственных колебаний, h – относительная амплитуда возмущающей силы, p , q – постоянные величины, t – время.

Решение данного уравнения (нерезонансный случай):

$$q_{1,2} = A_1 \sin(kt + \alpha) + \frac{h}{k^2 - p^2} \sin(pt + \delta), \quad (2)$$

где A – амплитуда, а α – начальная фаза собственных колебаний.

Анализ выражений (1), (2) позволяет сделать вывод: если при обработке детали имеют место колебательные процессы, то на обрабатываемой поверхности будут образовываться неровности, описываемые уравнениями вида

$$r(x) = \sum_i A_i \sin(k_i x_i + \alpha_i), \quad (3)$$

для плоского случая, или

$$r(\varphi) = \sum_i A_i \sin(k_i \varphi + \alpha_i), \quad (4)$$

для тел вращения.

Выражения (3) и (4) справедливы в том случае, если взаимосвязь между t и x (φ – для круглого случая) имеет следующий вид:

$$x = Kt, \quad \varphi = Kt,$$

где K – некоторая постоянная.

Очевидно, что для анализа отклонений формы в таких случаях удобно применять разложения в ряд Фурье. При этом период разложения можно выбрать любым удобным образом. В дальнейшем будем предполагать, что период разложения подобран так, что интересующие нас гармоники укладываются на нем целое число раз. В этом случае уравнение гармоники будет иметь вид

$$y = A_n \sin(n\varphi + \varphi_0^n),$$

где n – номер гармоники (количество раз, которое гармоника уместается на интервале), A_n – амплитуда гармоники, φ_0^n – начальная фаза гармоники, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ – координата в рамках рассматриваемого интервала.

2. Вывод уравнений для расчета конструкций измерительных приборов и корректирующих приспособлений

Рассмотрим способ измерения одной отдельно взятой гармоники [2].

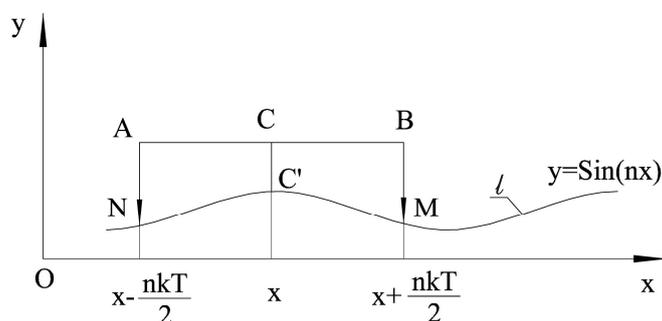


Рис. 1. Схематичное изображение опоры, перемещающейся по некоторому профилю

Представим жесткую неизменяемую конструкцию НАСВМ (рис. 1), точки которой непрерывно движутся по кривой реального профиля l .

На рис. 1 $T = 2\pi$ – рассматриваемый интервал кривой, n – номер гармоники, $T_n = \frac{T}{n}$ – период n -й гармоники, k – коэффициент длины конструкции, $y_C(x)$ – ордината точки С, x – абсцисса точки С.

Уравнение кривой l :

$$y(x) = \sin(nx).$$

Полагая, что контакт конструкции с профилем точечный, амплитуда гармоники гораздо меньше длины конструкции АВ, высота NA пренебрежимо мала, можно записать:

$$y_A(x) = \sin\left(nx - \frac{nkt}{2}\right), \quad (5)$$

$$y_B = \sin\left(nx - \frac{nkt}{2}\right). \quad (6)$$

Координаты точки С

$$y_C(x) = \frac{1}{2}(y_A(x) + y_B(x)). \quad (7)$$

С учетом (5) и (6) выражение (7) можно переписать в следующем виде:

$$y_C(x) = \sin(nx) \cos\left(\frac{nkt}{2}\right). \quad (8)$$

Расположим в точке С измеритель линейных перемещений, который будет фиксировать величину CC' :

$$CC' = y_c(x) - y(x) = \sin(nx) \cos\left(\frac{nkt}{2}\right) - \sin(nx) = \sin(nx) \left[\cos\left(\frac{nkt}{2}\right) - 1 \right].$$

В том случае, если $\cos\left(\frac{nkt}{2}\right) = 0$, амплитуда гармоники будет соответствовать показаниям прибора CC' . В том случае, если $\cos\left(\frac{nkt}{2}\right) \neq 0$, имеет место ошибка измерения, величина которой определяется следующим выражением:

$$\delta = \frac{CC'}{y(x)} = \frac{\sin(nx) \left[\cos\left(\frac{nkt}{2}\right) - 1 \right]}{\sin(nx)} = \cos\left(\frac{nkt}{2}\right) - 1.$$

Анализ полученного результата показывает, что непосредственное значение результата измерения CC' дает величину в $\frac{1}{\cos\left(\frac{nkt}{2}\right) - 1}$ раз меньше истинной [3].

3. Пример анализа ошибки измерения различных гармонических составляющих

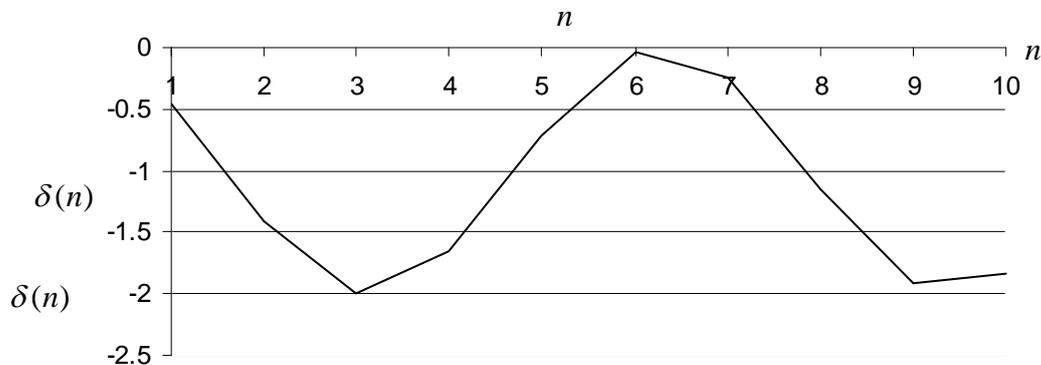


Рис. 2. График зависимости $\delta(n)$.

Приведем пример. При значениях $T = 2\pi, k = \frac{1}{\pi}$ график ошибки измерения $\delta(n)$ при $n = 1, 2, \dots, 10$ приведен на рис. 2.

Погрешность измерения амплитуды гармоники связана с величиной погрешности CC' следующим образом:

$$\Delta y_n = K_n \Delta CC',$$

где $\Delta CC'$ – погрешность измерения CC' .

В том случае, если $K_n \approx 1$, эти погрешности будут приближенно равны. Если $K_n \gg 1$, то погрешность измерения амплитуды гармоники будет в несколько раз больше погрешности измерения CC' [4]. С учетом допустимой погрешности измерения амплитуды гармоники в каждом конкретном случае, зная величину $\Delta CC'$, можно использовать один прибор для измерения группы гармоник.

4. Расчет корректирующих приспособлений

Использование приведенной на рис. 1 конструкции при закреплении в точке С обрабатываемого инструмента и кривой 1 в качестве базовой поверхности может позволить добиться целенаправленного снижения амплитуды гармоники на детали в процессе обработки.

Как было показано в выражении (8), траектория точки С описывается уравнением

$$y_C(x) = \sin(nx)\cos\left(\frac{nkt}{2}\right).$$

Изменение ординаты профиля:

$$y(x)_{\max} - y(x)_{\min} = 2\sin(nx) \quad (9)$$

Изменение ординаты точки С, с учетом (8) и (9):

$$y_C(x)_{\max} - y_C(x)_{\min} = 2\sin(nx)\cos\left(\frac{nkt}{2}\right).$$

Пусть в точке С жестко закреплен резец. Тогда биение его режущей кромки вдоль оси ординат будет в $\frac{2\sin(nx)}{2\sin(nx)\cos\frac{nkt}{2}} = \frac{1}{\cos\frac{nkt}{2}}$ раз меньше, чем биение непосредственно

базовой поверхности кривой 1.

Использование систем с обратной связью может позволить добиться уменьшения амплитуды целого ряда гармоник. Для этого подача инструмента должна определяться с учетом амплитуды гармоник и коэффициентов коррекции.

Приведенные рассуждения для плоских деталей могут быть аналогично проведены и для деталей типа тел вращения.

Заключение

В работе продемонстрирован единообразный подход к обработке и измерению, учитывающий особенности возникновения периодических неровностей, который позволяет решать задачи измерения и устранения широкого ряда периодических неровностей в тех случаях, когда получить требуемый результат обычными способами не удается.

Литература

1. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1990.
2. Гебель И.Д. Бесцентровое измерение формы профиля тел вращения. Измерительная техника, 1973, №3.
3. Верхотуров Б.Я., Кузьмин В.И. Трехточечный разностный метод измерения отклонения от круглости. М.: Вестник машиностроения, №11. 1982.
4. Абдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Издательство Стандартов, 1974.

АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ ГОСТ 1643-81

М.В. Абрамчук

Научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев

Рассматривается ГОСТ 1643-81. "Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски" с точки зрения соответствия данного стандарта, являющегося базовым в области регламентации норм точности и бокового зазора для зубчатых передач разных видов (конических, червячных, гипоидных, реечных и т.д.), современному уровню теории точности передач, уровню производства и контроля зубчатых колес и передач в России. Статья посвящена выявлению недостатков действующего стандарта и намечает пути их преодоления.

Введение

ГОСТ 1643-81 [1] выпущен более двадцати лет назад. За это время произошли большие перемены как в теории точности передач, так и в технологии производства и контроля зубчатых колес и передач. Основные положения стандарта сдерживают прогресс в области зубонарезания и контроля зубчатых колес и передач главным образом потому, что не стимулируют отечественного производителя к производству конкурентоспособной продукции. В то время как в зарубежных редукторах, например, объектом взаимозаменяемости является, как правило, отдельно взятое колесо, у нас таким объектом является пара колес или же весь редуктор в целом.

Критика положений стандарта ведется давно и разными авторами [2–5]. Существо настоящей статьи направлено на исследование недостатков действующего стандарта и поиск путей исправления существующего положения как в области стандартизации, так и в области производства и контроля зубчатых колес и передач.

Недостатки действующего стандарта

Рассматриваемый документ имеет название "ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски". Как видно из названия, объект стандартизации – зубчатая передача. Следовательно, документ должен устанавливать нормы и показатели точности для цилиндрических зубчатых передач. Однако это не так, поскольку большое внимание уделяется показателям точности зубчатых колес. По сути, исследуются зубчатые колеса, а не передачи, и из суммы их показателей точности находятся показатели точности для передач.

Рассмотрим, например, примечание к табл. 6, пункт 3 (стр. 13). "Допуск на кинематическую погрешность зубчатой передачи F'_{io} равен сумме допусков на кинематическую погрешность ее зубчатых колес". Допуск на кинематическую погрешность зубчатого колеса F'_i – величина табличная, а допуск на кинематическую погрешность передачи – расчетная.

То же самое касается допуска на местную кинематическую погрешность передачи f'_{io} – примечание к табл. 8, пункт 3 (стр. 21). В документе эта величина определяется как $f'_{io} = 1,25f'_f$, где f'_f – допуск на погрешность профиля зуба (тоже табличная величина).

Далее читаем пункт 2.9 (стр. 30): "Точностные требования установлены настоящим стандартом для зубчатых колес, находящихся на рабочих осях. На чертеже требования к точности зубчатого колеса допускается устанавливать относительно другой оси (например, оси отверстия под вал), которая может не совпадать с рабочей осью. Погрешности, вносимые при использовании в качестве измерительной базы поверхностей, имеющих неточности формы и расположения относительно рабочей оси, должны быть учтены при установлении точности передачи или компенсированы введением уменьшенного производственного допуска". Однако упомянутые погрешности не являются

единственными. Напомним, что в случае измерения кинематической точности передачи стандарт рассчитывает точность передачи, как сумму показателей точности колес, в нее входящих. При этом не оговаривается, что свой вклад вносят также погрешности остальных элементов передачи: валов, подшипников, неподвижного звена - корпуса и др. Стандарт не оговаривает влияние упомянутых элементов передачи на ее кинематическую точность, т.е. точность передачи движения с одного вала на другой, что немало важно.

В документе также отсутствует определение зубчатой передачи и не упоминается количество элементов, в нее входящих. По умолчанию принимается, что передача состоит из трех звеньев (рис. 1).

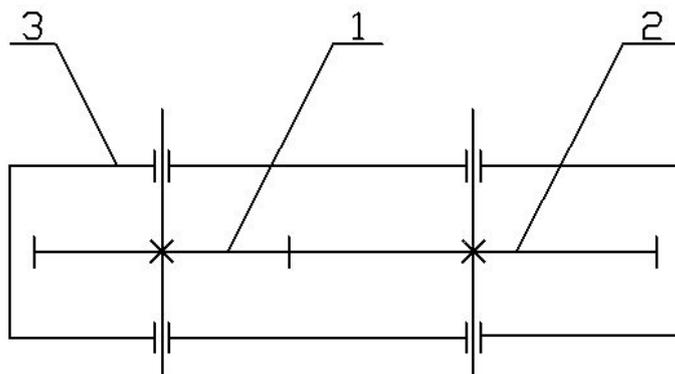


Рис. 1 Зубчатая передача с расположением колёс между опорами

Первое и второе звено – зубчатые, а третье, неподвижное, состоит из многих деталей. Как было сказано, влияние третьего звена на точность передачи не оговорено. Нет схемы передачи, а она важна. Если расположить колеса по-другому, то точность передачи будет иной при той же точности входящих в нее зубчатых колес (рис. 2).

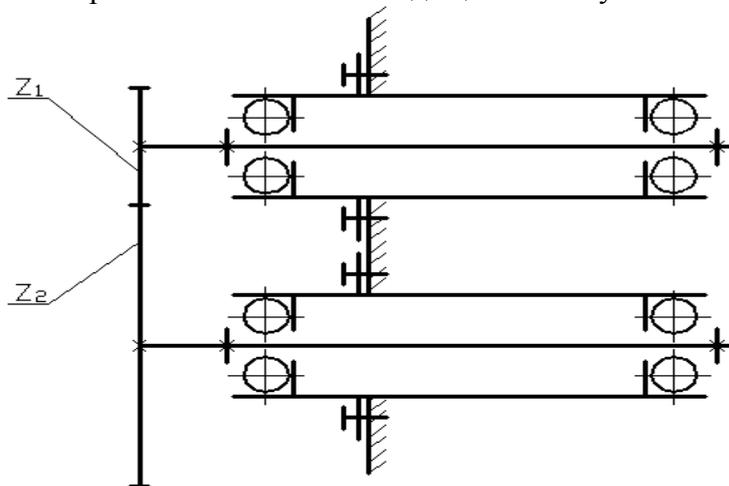


Рис. 2 Зубчатая передача с консольным расположением колёс

В связи со сказанным не ясно, что подвергается замене в случае поломки, т.е. что является объектом взаимозаменяемости [2] (колесо, пара колес, корпус или совокупность всех элементов - передача). Следовательно, в названии стандарта должен быть полностью отражен объект стандартизации: зубчатое колесо, пара колес или зубчатая передача.

ГОСТ 1643-81 устанавливает 12 степеней точности для зубчатых колес и передач (п. 1.1, стр. 1). По умолчанию считается, что степени точности колес в передаче для

каждой нормы должны совпадать. При этом в документе не оговаривается, что на практике это не всегда возможно.

Пункт 2.1.1 (стр. 4): "Если кинематическая точность зубчатых колес относительно рабочей оси соответствует требованиям настоящего стандарта и требование селективной сборки не выдвигается, кинематическую точность зубчатых передач допускается не контролировать". Как уже говорилось выше, на кинематическую точность передачи влияют не только зубчатые колеса. К тому же, на практике, зубчатые передачи практически не контролируются, контролю подвергаются только колеса. Безусловно, необходим контроль передач, особенно под нагрузкой при скоростях, близких к рабочим.

Пункт 2.1.2 (стр. 4): "При совпадении кинематической точности окончательно собранной передачи требованиям настоящего стандарта контроль кинематической точности зубчатых колес не является необходимым". Если следовать этому пункту и не измерять точность колес, то не представляется возможным изготовить корпус и зубчатые колеса для замены. К тому же, как уже говорилось, измерение точности передач на практике затруднено.

П. 2.2.1 (стр. 5) "Если точность зубчатых колес по нормам плавности соответствует требованиям настоящего стандарта, плавность работы передач допускается не контролировать". Опять же, измерение точности передачи на практике затруднено. И, как и в предыдущем пункте, отсутствуют нормы, регламентирующие нагрузку, скорость и т.д. в процессе контроля, длительность самого процесса.

П. 2.2.2 (стр. 6): "При соответствии плавности работы передачи требованиям настоящего стандарта контроль плавности работы зубчатых колес не является необходимым". Вновь, следование этому пункту ведет к невозможности изготовления отдельно взятых зубчатых колес.

Сравнение ГОСТ 1643-81 с предыдущим стандартом

Сравнение документов производится в части методологии изложения отдельных положений, определения терминов и т.д. К сожалению, по сравнению с предыдущим документом (ГОСТ 1643-72) уменьшился объем графической информации, что затрудняет работу с документом. Разберем подробнее различия в стандартах [1] и [6]. П. 6 (стр. 47): "Радиальное биение зубчатого венца F_{rr} ". Убран рисунок, поясняющий данный термин. П.8 (стр. 47). Исключен рисунок к пояснению параметра F_{vwr} – колебание длины общей нормали. П. 22 (стр. 52). Исключено определение термина "контактная линия", которое было в документе 1972 года. П. 26 (стр. 53). Из рисунка (черт. 15) убрано обозначение средней торцевой плоскости и изображение параметра f_{ar} - отклонение межосевого расстояния. П. 27 (стр. 53). Исключен рисунок к параметру $j_{n \min}$ - гарантированный боковой зазор. Также отсутствует определение термина "Боковой зазор". П. 32 (стр. 55). "Номинальная толщина зуба (по постоянной хорде) \bar{S}_c ". Отсутствует определение термина "Постоянная хорда" и рисунок [7, стр. 304]. П. 33 (стр. 55): "Отклонение размера по роликам E_{Mr} ". Отсутствует рисунок с пояснениями. П. 34 (стр. 55). Нет определения термина "Коэффициент осевого перекрытия", часто употребляемого в тексте документа.

Имеются и опечатки, недопустимые в стандартах. Так, в определении действительного торцевого профиля зуба (стр. 50) вместо "в плоскости" следует читать "плоскостью".

Пользоваться ГОСТ 1643-81 неудобно. В документе 1972 года термины, обозначения и определения сведены в таблицу, где чертежи располагаются справа от терминов и определений. Пункты разделены пробелами, в результате чего поиск нужного термина не занимает много времени. В стандарте 1981 года отсутствует упомянутое

представление графической и текстовой информации, включая пробелы, что затрудняет ознакомление с документом и делает этот процесс длительным.

Пути преодоления недостатков стандарта

Прежде всего в стандарте необходимо четко определить объект взаимозаменяемости, дать определение зубчатой передачи и упомянуть, какие звенья передачи могут быть подвижными и неподвижными. Необходимо привести типовые схемы зубчатых передач так, как это сделано в стандарте расчетов на прочность. Возможно наличие двух стандартов, один из которых регламентирует нормы точности и бокового зазора только для зубчатых колес, а второй – для передач. Имеющаяся научно-техническая литература в области точности передач предполагает расчетный характер такого стандарта. При этом, однако, табличные показатели норм точности и бокового зазора будут относиться к отдельным типовым схемам передач. Необоснованное требование одинаковой степени точности по каждому отдельному показателю для шестерни и колеса передачи становится при этом излишним.

Обсуждаемый документ имеет в своем названии термин "допуски", но ГОСТ 1643-81 устанавливает не только допуски, но и отклонения, имеющие отношение к нормам и показателям точности и бокового зазора [8, стр. 5]. В связи с этим представляется правильным сменить подзаголовок стандарта на "Нормы точности и бокового зазора".

Заключение

В работе подробно проанализированы наиболее существенные недостатки ГОСТ 1643-81. Также обращено большое внимание на методологические просчеты, допущенные в этом стандарте по сравнению с предыдущим документом (ГОСТ 1643-72 [6]). Намечены пути изменений положений стандарта, позволяющие, во-первых, повысить качество производимых зубчатых колес и передач, а, во-вторых, изложить многие положения стандарта таким образом, чтобы пресечь возможные двойственные толкования и вообще облегчить усвоение положений стандарта всем пользователям – ученым, производственникам, технологам, студентам технических вузов.

Литература

1. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1989.
2. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колес и передач. – Вестник Машиностроения. № 12, 1990. с. 34.
3. Тимофеев Б.П. Назревшие перемены в нормировании точности зубчатых колес и передач. – Труды шестой сессии международной научной школы. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. Часть 2. СПб, 2003. с. 60.
4. Попов П.К., Штриплинг Л.О. Предпосылки пересмотра нормативной документации по расчету точности зубчатых передач. Вестник машиностроения, №6, 1998.
5. Попов П.К., Штриплинг Л.О. Концепция создания нормативной документации по точности зубчатых передач. Конверсия и машиностроение. №4, 1998.
6. ГОСТ 1643-72. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1979.
7. Тищенко О.Ф., Валединский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М., "Машиностроение", 1977.
8. Тайц Б.А., Марков Н.Н. Точность и контроль зубчатых передач. – Л., "Машиностроение", 1978.

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПРОФИЛЯ И УГЛА НАКЛОНА ЗУБА НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

А.И. Кириченко

Научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев

Исследуется зависимость действующих и допускаемых контактных напряжений в зубчатых передачах от параметров этих передач. Определена зависимость действующих и допускаемых контактных напряжений от угла α и угла β . Определено влияние угла α и угла β на долговечность зубчатой передачи.

Введение

Использование эвольвентных зубчатых колес с несимметричным зубом позволяет повысить несущую способность зубчатых передач по контактной и изгибной прочности в основном (рабочем) направлении вращения [1]. Применение таких колес выгодно в реверсивных передачах, в которых крутящий момент в основном направлении значительно больше, чем в обратном, или вращение в основном направлении гораздо более продолжительно по времени, чем в обратном.

Существует определенная зависимость контактных напряжений, действующих в зубчатых передачах, от параметров этих передач. В данной работе рассматривается влияние угла профиля α и угла наклона линии зуба β на контактные напряжения и долговечность зубчатых передач.

1. Методика расчета

В то время как один и тот же исходный контур может использоваться для изготовления зубчатых колес с разными β , при варьировании α используются разные исходные контуры с различным углом профиля зуба. Поэтому зависимость контактных напряжений от угла профиля зуба рейки α рассматривается отдельно.

Расчет контактной прочности производился для трех зубчатых передач. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Входная мощность составляет 81 кВт на каждом из двух ведущих зубчатых колес, а частота вращения на входе равна 2160 об/мин.

№ передачи	m, мм	z ₁	z ₂	a _w
1	5	13	50	170
2	7	16	29	165
3	9	15	31	210

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Расчет на прочность прямозубых и косозубых цилиндрических передач стандартизован [2]. При этом контактные напряжения определяют по формуле

$$\sigma_H = Z_E Z_H Z_\epsilon \sqrt{\frac{F_{tH} K_{HE} (u+1)}{b_w d_1 u}} \leq [\sigma_H],$$

где Z_E – коэффициент, учитывающий материал зубьев, МПа^{0,5}; Z_H – коэффициент, учитывающий форму соприкасающихся поверхностей; Z_ϵ – коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий; F_{tH} – окружная составляющая силы, действующей на шестерню, Н; K_{HE} – коэффициент нагрузки; d_1 – делительный диаметр шестерни, мм; b_w – рабочая ширина венца зубчатой передачи, мм; u – передаточное число.

2. Зависимость контактных напряжений от угла α

В данной части расчетов исследована зависимость контактных напряжений от угла профиля зуба α (рис. 1). Угол α изменяется в пределах от 15° до 45° с интервалом в 5° . При этом вторая сторона зуба имеет постоянный угол профиля равный 20° . Данные значения углов профиля зуба α обеспечивают существование зубьев с заданной высотой, равной $2,25m$ и неотрицательной толщиной на поверхности вершин. Угол наклона линии зубьев β не меняется ($\beta=10^\circ$), а коэффициенты смещения x_1 и x_2 равны нулю ($x_1=0, x_2=0, x_\Sigma=0$).

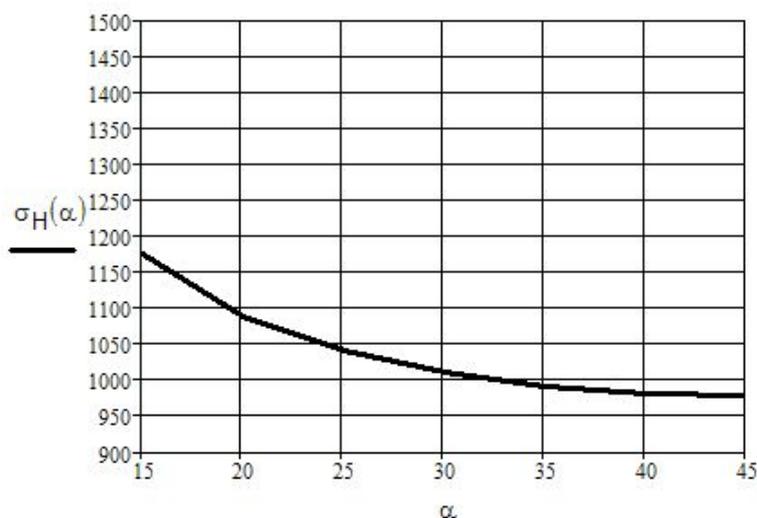


Рис. 1. Зависимость контактных напряжений от угла профиля зуба рейки α (1-ая передача)

Полученные результаты показывают, что увеличение угла профиля зуба α ведет к увеличению контактной прочности, т.е. к уменьшению действующих контактных напряжений.

3. Зависимость контактных напряжений от угла α и угла β

В данном случае исследуется зависимость контактных напряжений от угла профиля зуба α и угла наклона линии зубьев β (рис. 2, 3). Угол α изменяется в пределах от 15° до 45° с интервалом в 5° , а β – в пределах от 5° до 35° с интервалом в 5° . Коэффициенты смещения x_1 и x_2 равны нулю ($x_1 = 0, x_2 = 0, x_\Sigma=0$).

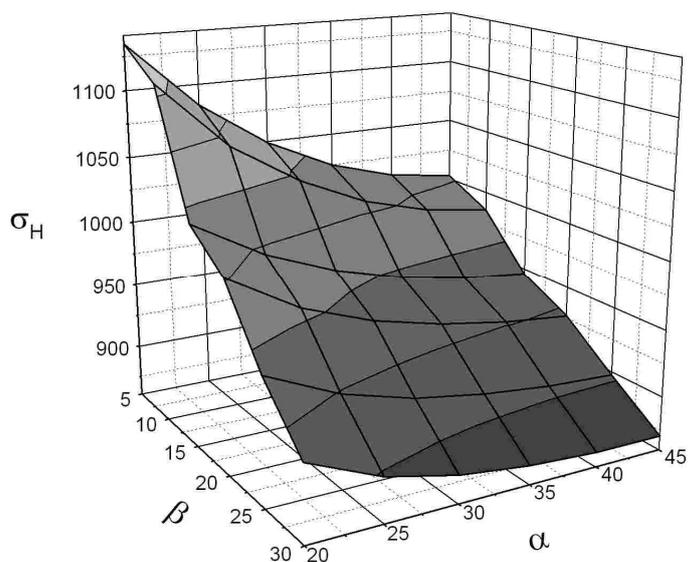


Рис.2. Зависимость σ_H от углов α и β (1-ая передача)

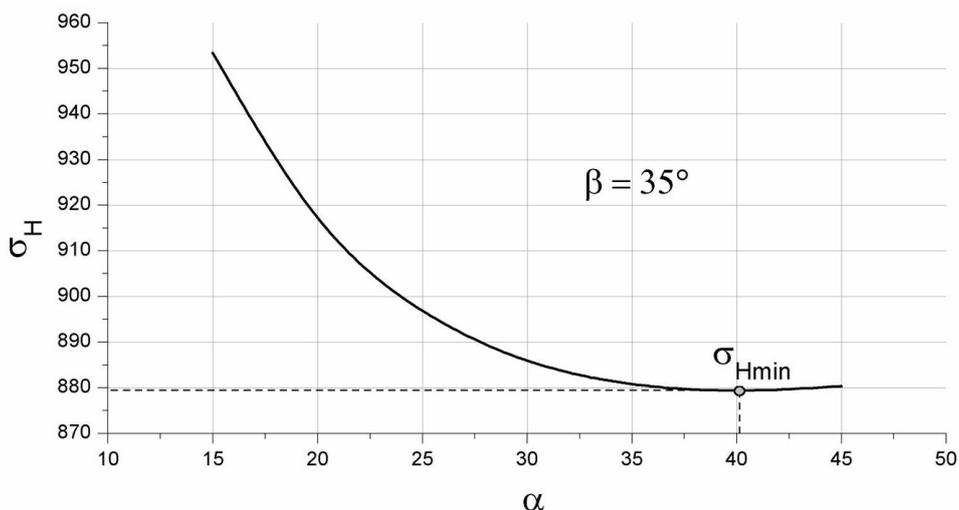


Рис. 3. Зависимость σ_H от угла α при постоянном угле β , равном 35° (1-ая передача)

Полученные результаты показывают естественную зависимость контактных напряжений от угла наклона линии зуба β . Другими словами, при увеличении угла β действующие контактные напряжения уменьшаются. Так же результаты показывают, что при разных углах β минимальные контактные напряжения действуют при различных углах α .

Так, например, в первой передаче при максимальном угле β , равном 35° , минимальные контактные напряжения действуют при угле α , равном $40,114^\circ$, и дальнейшее увеличение угла α ведет к увеличению контактных напряжений.

4. Влияние углов α и β на долговечность

Далее были рассчитаны допускаемые контактные напряжения для каждой зубчатой передачи из условия, что долговечность передач должна составлять 4500 часов.

Допускаемые контактные напряжения для шестерни и колеса зубчатой пары находятся по формуле [2, 3]:

$$[\sigma_{Hj}] = (\sigma_{Hlimb} Z_N / S_{Hmin})_j Z_R Z_V Z_L Z_{Xj},$$

Предел выносливости σ_{Hlimb} рассчитывается в зависимости от материала зубчатых колес. В передачах привода использовались колеса из легированной стали марки 18ХГТ и применена цементация с закалкой. Так как в чертежах указана твердость в пределах $H_{RC3} = 57 \div 63$, то за расчетное было принято среднее значение $H_{RC3} = 60$. Таким образом, предел выносливости σ_{Hlimb} определяется по формуле [3]:

$$\sigma_{Hlimb} = 23 H_{RC3} = 23 \cdot 60 = 1380 \text{ МПа}.$$

Минимальные значения коэффициента запаса прочности для зубчатых колес с поверхностным упрочнением $S_{Hmin} = 1,2$.

Значения коэффициента Z_R , учитывающего влияние исходной шероховатости поверхностей зубьев, и коэффициента Z_V , учитывающего влияние окружной скорости приняты равными 1.

Коэффициент Z_L , учитывающий влияние вязкости масла, в ГОСТ 21354-87 принят $Z_L = 1$. Коэффициент Z_X , учитывающий размеры зубчатого колеса при $d \leq 700$ мм, принимают также равным 1.

Коэффициент долговечности Z_N при постоянной нагрузке рассчитывают по следующим формулам:

$$Z_{Nj} = \sqrt[6]{\frac{N_{H \lim j}}{N_{\Sigma j}}}, \quad \text{если } N_{\Sigma j} \leq N_{H \lim j}$$

$$Z_{Nj} = \sqrt[20]{\frac{N_{H \lim j}}{N_{\Sigma j}}}, \quad \text{если } N_{\Sigma j} > N_{H \lim j}$$

При этом $N_{H \lim j}$ определяется по формуле $N_{H \lim j} = 30H_{HB}^{2,4} \leq 12 \cdot 10^7$

Допускаемое контактное напряжение зубчатой передачи определяется по следующей формуле [3]:

$$[\sigma_H] = \sqrt{(\varepsilon_{a1} \delta_I [\sigma_{HI}]^2 + \varepsilon_{a2} \delta_{II} [\sigma_{HII}]^2) \varepsilon_a^{-1}},$$

в которой

$$\delta_I = 1 + 0,5K_I - 0,5K_I / u - K_I^2 / (3u),$$

$$\delta_{II} = 1 - 0,5K_{II} + 0,5K_{II} / u - K_{II}^2 / (3u),$$

$$K_I = 2\pi\varepsilon_{a1} / (z_1 \operatorname{tg} \alpha_{tw}),$$

$$K_{II} = K_I \varepsilon_{a2} / \varepsilon_{a1},$$

$$[\sigma_{HI}] = \min(\mu_{k1} [\sigma_{H1}]; [\sigma_{H2}]),$$

$$[\sigma_{HII}] = \min([\sigma_{H1}]; \mu_{k2} [\sigma_{H2}]),$$

а коэффициент μ_{k1} определяется как

$$\mu_{kj} = 1,6\sqrt[4]{200 / H_{oj}}.$$

Так как ε_{a1} , ε_{a2} и ε_a зависят от углов α и β , то и значение допускаемых контактных напряжений будет зависеть от этих углов. Зависимости действующих и допускаемых контактных напряжений от угла профиля зуба α и угла наклона линии зубьев β для первой передачи показаны на рис. 4.

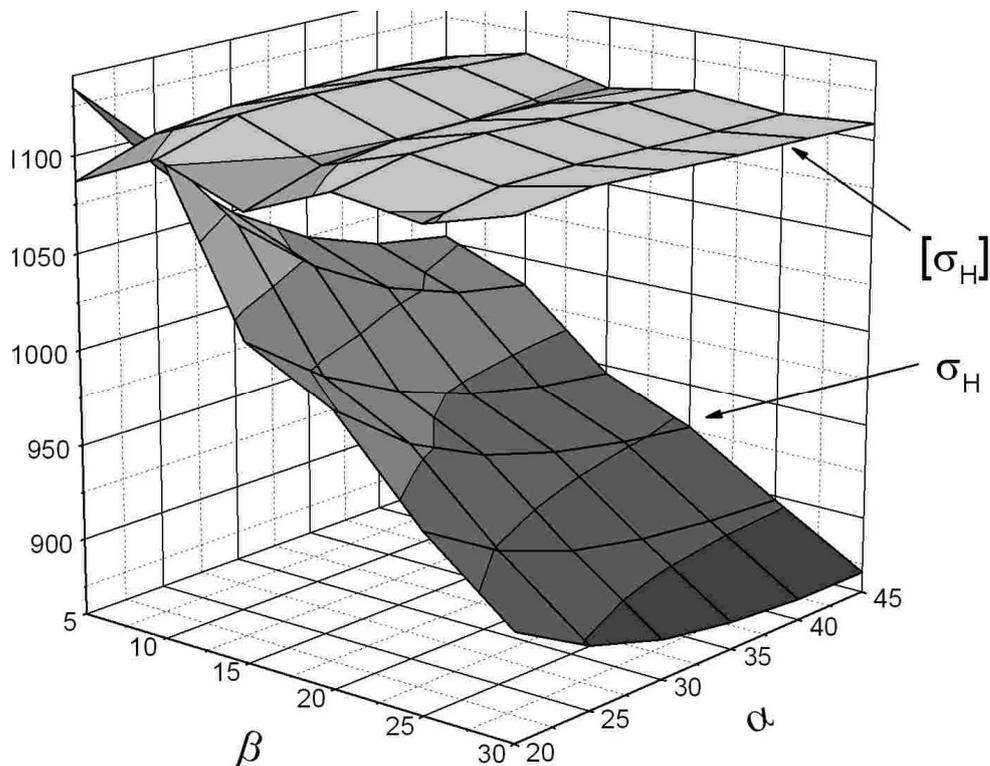


Рис. 4. Зависимость σ_H и $[\sigma_H]$ от углов α и β (1-ая передача)

Выяснилось, что две передачи из трех не удовлетворяют заданному значению долговечности при обычных параметрах ($\alpha = 20^\circ$ и $\beta = 10^\circ$), так как допускаемые значения контактных напряжений оказались меньше действующих. Однако при оптимальных параметрах, долговечность передач значительно увеличилась.

В табл. 2 приведены рассчитанные допускаемые контактные напряжения $[\sigma_H]$ для всех трех передач, а также долговечности D этих передач при использовании обычных и оптимальных параметров этих передач.

<i>№ пере- дачи</i>	$[\sigma_H], МПа$	$D, \text{ час.}$ (при $\alpha = 20^\circ, \beta = 10^\circ$)	$D, \text{ час.}$ (при опт. парам.)
<i>1</i>	<i>1063</i>	<i>4500</i>	<i>4500</i>
<i>2</i>	<i>1137</i>	<i>900</i>	<i>4500</i>
<i>3</i>	<i>1221</i>	<i>2150</i>	<i>4100</i>

Таблица 2. Рассчитанные допускаемые контактные напряжения и долговечности

Результаты показывают, что применение зубчатых колес с подобранными оптимальными параметрами α и β позволяет значительно увеличить долговечность зубчатых передач (особенно наблюдается во 2-ой передаче).

Заключение

Полученные результаты показывают, что увеличение углов α и β выгодно до уровня, который определяется геометрическими особенностями зубчатых колес (заострение) и зубчатой передачи в целом (подрезание). Действующие контактные напряжения заметно уменьшаются, а допускаемые остаются примерно на одном и том же уровне.

Таким образом, можно подобрать такие α и β , при которых контактные напряжения будут минимальными. Для каждой зубчатой передачи эти α и β разные.

Таким образом, если подобрать оптимальные параметры зубчатой передачи, такие как угол профиля зуба рейки α и угол наклона линии зубьев β , можно уменьшить действующие контактные напряжения, а, следовательно, повысить долговечность зубчатой передачи.

Литература

1. Вулгаков Э. Б., Капелевич А. Л. Возможности несимметричных зубчатых передач. // Вестник машиностроения, 1986, № 4, с.14–16.
2. ГОСТ 21354–87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность.
3. Кудрявцев В. Н., Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник. – СПб.: Политехника, 1993.

ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИИ ДАТЧИКА В СОСТАВЕ НАНОТЕСТЕРА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И МОДИФИКАЦИИ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

С.Ю. Керпелева

Научный руководитель – д.ф.-м.н., проф. А.О. Голубок

В работе представлены варианты конструкций датчиков силового взаимодействия, предлагается схема универсального датчика туннельного тока, работающего в силовом режиме и в режиме туннельного тока в полуконтактной моде. Также рассматривается построение математической модели взаимодействия острия пьезосенсора с поверхностью исследуемых образцов.

Введение

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – это прибор, позволяющий исследовать свойства поверхностей материалов от микронного до атомарного уровней с помощью твердотельных зондовых сенсоров. При использовании СЗМ имеется возможность получать карты распределения целого ряда физических и физико-химических характеристик поверхности, таких как топография, распределение приповерхностных электростатических, магнитных, электродинамических сил, адгезионных сил, сил трения, тепловых полей, теплопроводности, электропроводности с высоким пространственным разрешением вплоть атомного [1]. Это стало возможным, с одной стороны, благодаря развитию аппаратных средств и программного обеспечения, а с другой – благодаря созданию зондов специальных типов.

Зондами в СЗМ являются острые иглы. В туннельных микроскопах – это специальным образом заточенные металлические или полупроводниковые проводящие иглы, в ближнепольной оптической микроскопии – заостренные световые волокна, в сканирующей силовой микроскопии – иглы, закрепленные на упругих балках – кантилеревах.

Традиционным датчиком силового взаимодействия является кремниевая микробалка (кантилевер) с оптической схемой регистрации величины прогиба балки, возникающего вследствие силового взаимодействия между образцом и зондом, расположенным на краю балки.

Для исследований в силовом режиме и режиме туннельного тока предлагается схема универсального датчика локального взаимодействия, что позволит существенно повысить точность исследований.

Краткие сведения о природе взаимодействия зонда и поверхности образца

В отношении контакта между острием сканирующей иглы и поверхностью исследуемого образца работа силового сканирующего микроскопа обычно проходит в одном из режимов: контактный и бесконтактный режимы, сочетание которых дает так называемый режим "постукивания" [2].

При контактном режиме, известном иначе как режим отталкивания, острие иглы сканирующего силового микроскопа (ССМ) приходит в мягкий "физический контакт" с образцом. Измерительная консоль, на свободном конце которой расположена игла, обычно характеризуется низкой константой упругости, величина которой должна быть меньше, чем эффективная константа упругости, удерживающая атомы образца вместе. Отталкивающая сила уравнивает практически любую силу, которая пытается сблизить атомы друг с другом. Для ССМ это означает, что, если измерительная консоль прижимает острие иглы к поверхности, то консоль скорее изогнется, чем ей удастся приблизить острие к атомам образца. Даже если изготовить очень жесткую консоль, чтобы приложить огромную силу к образцу, межатомное расстояние между острием и атомами образца уменьшится ненамного. Вероятнее всего деформируется поверхность образца.

Для контактного ССМ отталкивающая межатомная сила должна быть уравновешена другими усилиями. Это происходит благодаря наличию двух сил – капиллярной и консольной.

Капиллярная сила – это воздействие на острие сканирующей иглы со стороны тонкого слоя влаги, обычно присутствующего на поверхностях, находящихся в обычной среде. Капиллярная сила возникает, когда адсорбированная на поверхности влага приподнимается вокруг острия. Оказываемое на острие сильное притягивающее воздействие (около 10^{-8} Н) удерживает его в контакте с поверхностью. Величина капиллярной силы зависит от расстояния между острием и образцом.

Ввиду того, что острие находится в контакте с образцом, капиллярная сила должна быть постоянной, поскольку расстояние между острием и образцом фактически не изменяется. Другое условие, позволяющее считать капиллярную силу постоянной, – это предположение о достаточной однородности слоя влаги [3].

Воздействие со стороны самой измерительной консоли подобно усилию в сжатой пружине. Величина и знак (отталкивающая или притягивающая) "консольной" силы зависит от отклонения консоли и ее константы упругости. Сила, прилагаемая измерительной консолью контактного ССМ, в отличие от капиллярной силы является переменной.

Общее усилие, прикладываемое со стороны острия сканирующей иглы к образцу, – это сумма капиллярной и консольной сил. Величина суммарной силы варьируется от 10^{-8} Н (когда измерительная консоль отводится от образца почти с таким же усилием, как вода притягивает острие к его поверхности) до более типичного рабочего диапазона в пределах 10^{-7} – 10^{-6} Н [2].

В бесконтактном режиме, также известном как режим притяжения, ССМ отслеживает притягивающие Ван-дер-Ваальсовы силы между острием сканирующей иглы и образцом. Зазор между острием и образцом обычно составляет 5–10 нм. На таком расстоянии электронные орбитали атомов острия сканирующей иглы начинают синхронизироваться с электронными орбиталями атомов образца. В результате возникает слабое притяжение, поскольку в любой момент времени атомы острия и образца поляризованы в одном и том же направлении. В свободном пространстве эти атомы будут сближаться до тех пор, пока сильное электростатическое отталкивание, описанное выше, не станет преобладающим.

В бесконтактном режиме работы ССМ суммарная сила между острием и образцом небольшая – обычно $\sim 10^{-12}$ Н. Эта малая сила является преимуществом при исследовании мягких и упругих образцов. Еще одно преимущество заключается в том, что такие образцы, как, например, кремниевые подложки, не загрязняются при контакте с острием.

При исследовании жестких образцов изображения, полученные в контактном и бесконтактном режимах, могут выглядеть одинаково. Однако если на поверхности жесткого образца лежат, к примеру, несколько монослоев конденсированной влаги, то эти изображения могут значительно различаться. ССМ, работающий в контакте, будет проникать через слой жидкости, отображая нижележащую поверхность, тогда как бесконтактный ССМ будет давать изображение поверхности слоя влаги.

Качество результатов, которые можно получить в бесконтактном режиме ССМ, в значительной мере зависит от использования качественной измерительной консоли и сканирующей иглы. Измерительная консоль для бесконтактного режима, как отмечалось, должна быть значительно жестче, чем консоль для контактного ССМ, чтобы в процессе своих колебаний она случайно не коснулась поверхности. Более того, острая игла для бесконтактного ССМ даже более важна, чем для контактного: при работе в бесконтактном режиме наклон кривой ван-дер-ваальсовых сил пологий, поэтому с поверхностью образца будет взаимодействовать большее количество атомов острия.

Существует возможность значительно, практически до 1000 раз, снизить давление на образец. Для этого регистрируют не изменение угла наклона балки кантилевера, а изменение амплитуды ее резонансных колебаний. Такой режим называют полуконтактным или, по терминологии, введенной компанией *Digital Instruments, tapping mode* (режим постукивания) – режимом сканирования. Это режим периодического кратковременного контакта иглы с поверхностью в процессе сканирования. Такой режим достигается за счет увеличения амплитуды колебаний кантилевера с 10 до 50–100 нм. При таких амплитудах игла соприкасается с поверхностью в момент максимального отклонения кантилевера вниз от положения равновесия, что существенно изменяет частоту, фазу и амплитуду его колебаний [3]. В некоторых ССМ периодическое касание иглой поверхности реализуется путем модуляции длины пьезотрубки, на которой закреплен образец. В этом случае регистрируется величина отклонения кантилевера в момент касания с образцом. Режим "постукивания" характеризуется более высоким латеральным (горизонтальным) разрешением по сравнению с режимом постоянного контакта. Это объясняется тем, что при движении иглы вдоль поверхности и кратковременном контакте менее вероятно повреждение иглы или перенос на ее кончик загрязнений с поверхности. При режиме постукивания поверхность ощупывают колеблющимся зондом в режиме малых резонансных колебаний консоли. Амплитуду колебаний иглы устанавливают в диапазоне 1–50 нм.

Кроме того, с развитием резонансных мод появилось возможность измерения еще целого ряда характеристик поверхности, таких как подповерхностная емкость (бесконтактная емкостная мода), распределение поверхностного потенциала (Кельвин–мода), резонансная магнитно-силовая мода, моды резонансной и модуляционной модификации поверхности.

Для повышения точности исследования объектов методом сканирующей силовой микроскопией были использованы другие, более простые, способы детектирования силового взаимодействия, когда происходит прямое преобразование силового взаимодействия в электрический сигнал. Один из таких способов основан на использовании прямого пьезоэффекта, когда прогиб пьезоматериала под действием силового взаимодействия приводит к появлению электрического напряжения.

Известно, что силовое взаимодействие между поверхностью и вибрирующим с небольшой амплитудой зондом смещает его резонансную частоту, а, следовательно, уменьшает амплитуду колебаний. Производя синхронное детектирование сигнала, пропорционального амплитуде колебаний зонда, можно получить сигнал, являющийся функцией величины приложенной к зонду силы, т.е. регистрировать силу взаимодействия в системе зонд-образец.

Варианты конструкций датчиков

Для реализации сканирующей силовой микроскопии были разработаны пьезосенсоры силового взаимодействия нескольких типов: составной пьезосенсор (рис. 1), пьезосенсор на основе биморфной пластины (рис. 2, а), пьезосенсор на основе композитного пьезоэлемента на основе одной биморфной пластины (рис. 2, б).

На описанных выше пьезосенсорах силы было достигнуто пространственное разрешение примерно в 200 ангстрем в плоскости X-Y.

Работа с пьезосенсором в режиме силового взаимодействия имеет свою специфику.

1. Система склонна к самовозбуждению даже при узкой полосе следящей системы. Для устранения автоколебаний следящей системы выбиралась минимально возможная опорная сила.
2. Условие самовозбуждения зависит от свойств поверхности образца. В некоторых случаях удается работать без автоколебаний с большими силами в одной области образца, но они возникают при прохождении зонда над другой областью образца.

3. Чувствительность метода и пространственное разрешение тем выше, чем меньше амплитуда колебаний пьезодатчика.
4. Исследования показали возможность работы с пьезосенсорами на высших гармониках до 120 кГц, что способствует эффективной фильтрации от низкочастотных электрических помех, однако эти гармоники индивидуальны для каждого пьезосенсора [4].

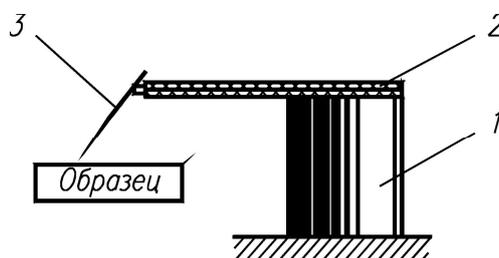


Рис. 1. Составной пьезосенсор: 1 – вибратор, 2 – пьезодатчик силы (биморфная пластина), 3 – зонд в виде W-острия

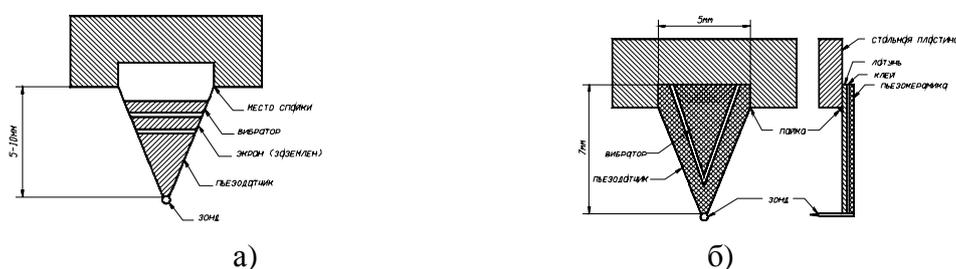


Рис. 2. Пьезосенсоры: а) на основе одной биморфной пластины, б) на основе композитного пьезоэлемента

Обычно в СЗМ используются независимые датчики туннельного тока и силового взаимодействия, и при переходе от токовых к силовым измерениям производят замену датчиков.

Датчиком туннельного тока является преобразователь ток – напряжение, включенный в цепь протекания тока между зондом и образцом. Возможны два варианта включения: с заземленным зондом, когда напряжение смещения подается на образец относительно заземленного зонда, или с заземленным образцом, когда напряжение смещения прикладывается к зонду относительно образца.

Для исследований в силовом режиме и в режиме туннельного тока был разработан универсальный датчик туннельного тока и силового взаимодействия в полуконтактной моде. Датчик выполнен в виде пьезокерамической трубки длиной $l = 1\text{--}7$ мм, диаметром $d = 1,2$ мм и толщиной стенки $h = 0,25$ мм, жестко закрепленной с одного конца. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм (рис. 3).

Свободный конец проволоки, использующийся в качестве нанозонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину $0,2\text{--}0,05$ мкм. Нанозонд имеет электрический контакт с внутренним электродом трубки, соединенным с заземленным корпусом прибора. При измерении туннельного тока пьезотрубка играет роль жесткой пассивной балки. Электрическое смещение прикладывается к образцу относительно заземленного зонда.

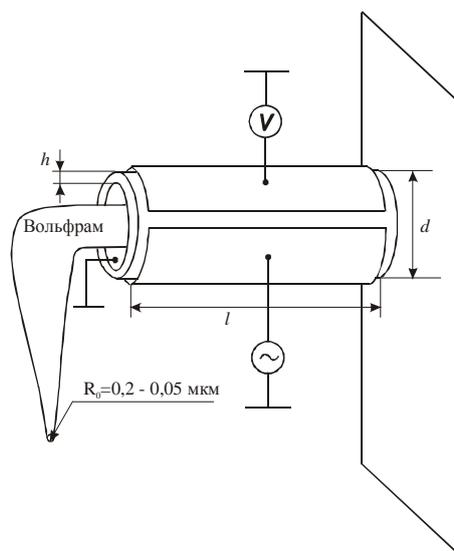


Рис. 3. Конструкция универсального датчика

Математическая модель взаимодействия острия пьезосенсора с поверхностью исследуемых образцов

При моделировании использовалась схема рис. 4. Пьезоэлектрическая трубка управляет положением острия по z и колеблется с частотой ω и амплитудой A .

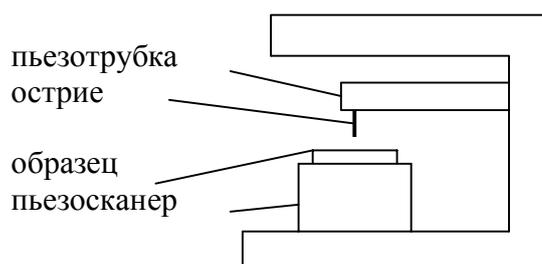


Рис. 4. Схема механической системы, использованная при моделировании

При измерении силового взаимодействия в полуконтактной моде одна половина пьезотрубки используется как пьезовибратор. Для этого к одному из внешних электродов прикладывается напряжение от генератора напряжения, приводящее к изгибу трубки и, следовательно, к периодическим изменениям зазора между зондом и образцом. При больших зазорах между зондом и образцом зонд осциллирует с амплитудой A , имеющей максимальную величину на резонансной частоте. Амплитуда колебаний определяется величиной раскачивающего напряжения генератора и добротностью колебательной системы. Изменения амплитуды колебаний детектируется путем измерения напряжения, возникающего вследствие изгиба пьезотрубки (прямой пьезоэффект) между вторым внешним электродом и заземленным внутренним электродом. Резонансная частота колебаний определяется по максимуму напряжения при развертке частоты напряжения генератора. При малых зазорах между зондом и образцом возникает постукивание кончика зонда по поверхности образца, приводящее к уменьшению амплитуды колебаний и, следовательно, к уменьшению амплитуды переменного напряжения, а также к фазовому сдвигу относительно фазы переменного напряжения раскачивающего генератора.

Для понимания работы пьезорезонансного датчика силового взаимодействия воспользуемся простой одномерной моделью (рис. 5).

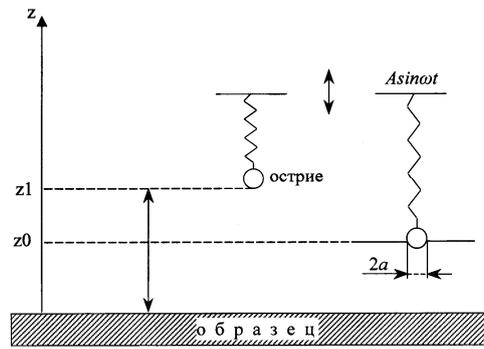


Рис. 5. Механическая схема контакта острие-образец

Консольно закрепленная с одного конца трубка с зондом, прикрепленным к другому, осциллирующему концу, моделируется пружиной с подвешенным грузом. На одном конце пружины закреплен шарик с радиусом R и массой m , где R – радиус зонда, m – эффективная масса колебательной системы, z_1 – расстояние от поверхности образца до вершины зонда, z_0 – расстояние, на котором сила между образцом и зондом равняется нулю. На этом расстоянии характер силы меняется от притяжения к отталкиванию. Точка подвеса пружины колеблется по закону $A \sin \omega \cdot t$.

Чтобы исследовать электрические, магнитные и ван-дер-ваальсовские поля, можно немного отвести острие от поверхности образца и вынуждать его вибрировать на резонансной или близкой к ней частоте [5]. Для амплитуды вибрации, намного меньшей, чем расстояние от образца до острия, можно использовать приближенное возмущение, чтобы моделировать влияние типовых силовых полей на прочностные свойства вибрирующего острия. Аппроксимация дает эффективную жесткость, $k_1 = k - F'$, и измененную резонансную частоту, равную $\omega_1 = [k_1/m]^{1/2}$ [6], где k – жесткость острия. Здесь m – эффективная масса острия, а F' – производная от локальной силы, возникающей между острием и поверхностью, изменяющие резонансную частоту свободных колебаний от ω_0 до ω_1 .

Изменение в резонансной частоте вызывает изменение в фазе и амплитуде колебаний острия, которое может использоваться для измерения полей взаимодействия. Поместив иглу на пьезоэлектрический элемент и используя систему обратной связи, можно получить топографическую карту производных силы над поверхностью образцов, которые происходят из истинной топографии или от электрического и магнитных полей. Недостаток работы в этом бесконтактном режиме – некоторая потеря в разрешении. Преимущество, однако, состоит в возможности получения существенного увеличения чувствительности к малым производным силы.

Подход возмущения обычно использовался для моделирования бесконтактного режима работы для малых амплитуд, но совершенно не подходил для больших значений. В частности, когда амплитуда вибрации равна или больше, чем промежуток между острием и поверхностью образца, мы сталкиваемся со сложным случаем нелинейной генераторной системы с внешним возбуждением, которая должна быть решена численно.

Поведение управляемой нелинейной колеблющейся системы усложнено тем, что нельзя использовать простые аналитические методы для оценки корреляции амплитуды колебаний острия и его прочностных свойств.

Когда амплитуда колебаний равна или больше, чем промежуток между острием и поверхностью, возникает достаточно сложный случай нелинейного возбуждения, требующий численного решения. Для области взаимодействия с преобладанием притягивающей силы выберем модель Леннарда–Джонса, в которой суммируются силы Ван-дер-Ваальса между молекулами, принадлежащими к сфере и плоскости образца [5]:

$$F(z) = f_0 R [-(\sigma/z)^2 + (1/30)(\sigma/z)^8],$$

где

$$f_0 = (2/3)\pi^2 \varepsilon \rho_1 \rho_2 \sigma^4.$$

Здесь ε и σ – параметры взаимодействия, ρ_1 и ρ_2 – плотности сферы и плоскости, соответственно. Для взаимодействия в области $z < z_0$, где преобладают силы отталкивания, выберем модель Герца [5], которая описывает деформацию двух контактирующих упругих сфер с радиусом R_1 и R_2 . Согласно этой теории, радиус контакта этих двух сфер a рассчитывается по формуле:

$$a^3 = (3/4)\pi(K_1 + K_2)R_1R_2/(R_1 + R_2)F(z), \quad (1)$$

где $K_i = (1 - \gamma_i^2)\pi E_i$, здесь $i = 1, 2$, E_i – модуль Юнга, γ_i – коэффициент Пуассона, $F(z)$ – приложенная сила.

Положим $R_1 = R \ll R_2$, т.е. рассмотрим упругий контакт сферы с радиусом R и модулем Юнга E_1 и плоскости с модулем Юнга E_2 . При вдавлении сферы в плоскую поверхность на небольшую глубину по сравнению с радиусом сферы $|z - z_0| \ll R$ для радиуса контактного пятна имеем:

$$a = (2R|z - z_0|)^{1/2}.$$

Подставляя это значение в выражение (1) и учитывая, что $R_1 \ll R_2$, получим выражение для силы отталкивания:

$$F(z) = g_0(z - z_0)^{3/2},$$

где

$$g_0 = \frac{8 \cdot 2^{1/2} R^{1/2}}{3\pi(K_1 + K_2)}.$$

Теперь, зная зависимость силы от расстояния, можно записать уравнение движения управляемой нелинейной осциллирующей системы:

$$m \left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right) + m \left(\frac{\omega}{Q} \right) \frac{dz}{dt} + K[z(t) - z_1 - A \sin \omega t] - F(z(t)) = 0. \quad (2)$$

Здесь Q – добротность колебательной системы, m – эффективная масса, k – жесткость, $k = m\omega_0^2$, а сила взаимодействия острия и поверхности определяется выражением:

$$F(z(t)) = f_0 R \left[-(\sigma/z)^2 + (1/30)(\sigma/z)^8 \right]$$

при $z > z_0$. Тогда при $z < z_0$:

$$F(z(t)) = g_0(z(t) - z_0)^{3/2}.$$

Путем численного решения уравнения (2) можно проанализировать поведение управляемой нелинейной осциллирующей системы в зависимости от параметров, таких как жесткость зонда и поверхности, расстояние от зонда до поверхности, добротность колебательной системы и т.п.

Для удобства численного решения дифференциальное уравнение второго порядка (2) обычно преобразовывают в систему дифференциальных уравнений первого порядка для амплитуды $z(t)$ и скорости колебаний $v(t)$,

$$\frac{dz(t)}{dt} = v(t)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = -(\omega/Q)v(t) - (k/m)[z(t) - z_1 - A \sin \omega t] + F[z(t)]/m.$$

В качестве граничных условий выберем: $z(0) = z_0$ и $v(0) = 0$, т.е. в начальный момент времени $t=0$ зонд находится в точке z_0 , где сила взаимодействия между зондом и образцом равна нулю, и имеет нулевую скорость перемещения. С течением времени зонд будет осциллировать с нарастающей амплитудой до тех пор, пока его максималь-

ная амплитуда либо достигнет значения $A \cdot Q$, либо под действием сил острие-образец достигнет некоторого значения, соответствующего установившемуся режиму колебаний. Любые другие разумные граничные условия должны дать те же самые результаты, как только система перейдет в установившийся режим.

Численные расчеты показывают, что мягкий образец испытывает меньшую силу воздействия, действующую в течение большего промежутка времени, а жесткий образец испытывает большую силу, работающую более короткое время, и с ростом жесткости поверхности увеличивается крутизна участка кривой зависимости силы от расстояния, отвечающего за отталкивание. При увеличении жесткости зонда практически пропорционально возрастает амплитуда силы взаимодействия. Частота колебаний зонда при взаимодействии с поверхностью несколько двигается в сторону уменьшения по сравнению с резонансной частотой. Значительное изменение жесткости поверхности приводит к незначительному изменению амплитуды колебаний зонда. Следовательно, изменение амплитуды колебаний зонда отражает скорее изменение топографии поверхности образца, чем изменение его локальной жесткости. Значительно более чувствительной к локальной жесткости поверхности образца оказывается фаза колебаний зонда.

Заключение

Разработаны различные конструктивные варианты универсального датчика туннельного тока и силового взаимодействия. Разработана математическая модель универсального датчика взаимодействия. В дальнейшем предполагается использование универсального датчика для возбуждения и исследования явления экзоэлектронной эмиссии.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства Образования Российской Федерации научно-технической программы "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники", код проекта/НИР: 208.04.01.№016, тема №20158 "Нанотестер для диагностики и модификации микро- и наноструктур: создание и исследование методики, изготовление и испытание макетного образца", а также при поддержке Министерства Образования РФ по конкурсу 2003 года на соискание грантов для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов высших учебных заведений, тема № 40201 "Исследование локальной экзоэлектронной эмиссии с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии".

Литература

1. В.А. Быков. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии. // Микросистемная техника, 2000, № 1, с. 21-23.
2. Т. Шермергор, В. Неволин. Новые профессии туннельного микроскопа. // Наука и жизнь (1990), № 11, 54–57.
3. А.А. Бухарев, Д.В. Овчинников, А.А. Бухарева. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор). // Исследования структуры и свойств. Физические методы исследования и контроля, 1996, с. 10 – 27.
4. А.О. Голубок, А.А. Дюбарев, С.Ю. Кerpелева, А.К. Чуркина. Конструкции пьезосенсоров силового воздействия для сканирующей силовой микроскопии. // "Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем" 30 сентября– 04 октября 2003 г.
5. Jian Chen, Richard K Workman, Dror Sarid and Ralf Hoper. Numerical simulations of a scanning force microscope with a large-amplitude vibrating cantilever. – Nanotechnology, № 5 (1994), p. 199-204.
6. Е.В. Булаенко, С.В. Тузенко, П.А. Фридман. Устройство цифро-аналогового ввода данных и управления на основе ЦСП. // ПТЭ N 2, 1997, с. 160.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ (АМОРТИЗАТОРОВ)

И.Г. Захарова

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.М. Мусалимов

Описаны наиболее распространенные и широко применяемые типы опытных и серийных виброизоляторов отечественного и иностранного производства. Для некоторых из них приведены экспериментальные характеристики и результаты испытаний. Осуществлено сравнение типов виброизоляторов, на основании чего выбраны наиболее перспективные.

Введение

Уменьшение вредных динамических воздействий, передаваемых на приборы, является основным назначением виброизоляторов. При этом собственные частоты системы, состоящей из амортизаторов и установленных на них приборах, а также собственные частоты самих виброизоляторов, являются основным показателем качества виброизоляции. Для достижения значительного эффекта от применения виброизоляции для каждой из этих собственных частот должно быть выполнено следующее условие изоляции: $\gamma = 2,5 - 5$, где γ – отношение частоты возбуждения к собственной частоте системы, (при $\gamma = 2,5$ эффективность изоляции 81 %, а при $\gamma = 5$ – 96 %) [3]. Это условие задает и собственные частоты, которыми должна обладать изолируемая система. При этом в каждом частном случае изоляции задачу приходится решать по-своему, исходя из условий эксплуатации, соответственно и требования к виброизоляторам целиком и полностью определяются условиями их эксплуатации.

Современные виброизоляторы принято классифицировать в основном по виду или способу введения демпфирования или по материалу упругого элемента. Различают резинометаллические, пружинные, цельнометаллические сетчатые и лепесткового типа, тросовые, а также виброизоляторы из композиционных материалов (свойства могут быть обеспечены подбором материала и связующих полимеров).

Резинометаллические виброизоляторы

Упругим элементом виброизоляторов этого типа является фасонный резиновый массив, соединенный с деталями металлической арматуры с помощью вулканизации. Достоинства резинометаллических виброизоляторов заключаются в простоте их конструкции, в широком диапазоне изменения их упругих характеристик, определяющихся как маркой применяемой резины, так и конфигурацией упругого элемента, в возможности произвольной ориентировки виброизоляторов относительно основания. Характеристики некоторых резинометаллических виброизоляторов представлены в табл. 1.

Наименование виброизолятора	Собственная частота в верт. напр., Гц	Собственная частота в гориз. напр., Гц	Диапазон рабочих частот, Гц	Амплитуда вибраций, мм	Диапазон рабочих температур., °С	Коэфф. демпфирования, ν
АП	10-15	15-25	22 ÷ 2000	0,002 ÷ 1	от - 45 до +80	0,1
АЧ	10-15	15-25	22 ÷ 2000	0,002 ÷ 1	от - 45 до +80	0,1
АКСС	10-15	нет данных	нет данных	нет данных	от -5 до +70	0,2 ÷ 0,25
АР	11-12	11-12	10 ÷ 70	0,5 ÷ 1	от - 45 до +50	нет данных
АН	11-13	6-7	15	до 0,5	от - 45 до +80	нет данных
АО	25-30	нет данных	25	до 0,5	нет данных	нет данных
АМ	20-30	35-45	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных

Таблица 1. Характеристики некоторых резинометаллических виброизоляторов

Особые свойства резины определяют, однако, и недостатки таких амортизаторов:

- изменение динамических свойств при длительной эксплуатации, связанное с так называемым "старением" резины;
- недостаточная надежность соединения резинового массива с металлической арматурой;
- ухудшение виброзащитных свойств в условиях, отличающихся от нормальных (например, при повышенной или пониженной температуре и влажности);
- недостаточное в отдельных случаях демпфирование;
- невозможность использования в атмосфере, содержащей пары бензина, масла и т.п.

Пружинные виброизоляторы

Упругий элемент пружинных виброизоляторов представляет собой фасонную пружину, коническую или экспоненциальную, назначение которой состоит в том, чтобы статическая характеристика была нелинейной, например, обладала свойством равночастотности. По сравнению с резинометаллическими виброизоляторами пружинные обладают значительно большим ресурсом работы, их упругие характеристики гораздо меньше зависят от внешних условий – температуры, влажности и т.п.; они могут работать в агрессивных средах. Вместе с тем это, как правило, виброизоляторы, создающие эффективную защиту лишь в осевом направлении. Поскольку внутреннее трение в материале пружины весьма мало, демпфирование в виброизоляторах этого типа создается искусственно. Характеристики некоторых пружинных виброизоляторов с демпфированием представлены в табл. 2.

Наименование виброизолятора	Собственная частота в верт. напр., Гц	Собственная частота в гориз. напр., Гц	Диапазон рабочих частот, Гц	Амплитуда вибраций, мм	Диапазон рабочих температур, °С	коэффициент демпфирования, ν	коэффициент динамичности, η
АД	8-10	нет данных	12 ÷ 80	0,5 ÷ 1,5	от - 60 до +70	0,06 ÷ 0,5	нет данных
АФД	15-20	25-30	30 ÷ 300	0,5 ÷ 1	от - 60 до +150	нет данных	до 2
АПН	нет данных	нет данных	30 ÷ 200	нет данных	нет данных	нет данных	до 2,5

Таблица 2. Характеристики некоторых пружинных виброизоляторов с демпфированием

Одним из представителей недемпфированных пружинных виброизоляторов являются виброизоляторы ЦАГИ. Частота собственных колебаний в вертикальном направлении в нагруженном состоянии 6–7 Гц. Влияние температуры и давления на виброизоляторы этого типа не сказывается. Виброизоляция вертикальных колебаний начинается с частоты 10–12 Гц при амплитудах вибраций до 1 мм. При действии вибрации в горизонтальном направлении виброизоляция объектов начинается с 15–20 Гц.

Цельнометаллические виброизоляторы

Виброизоляторы этого типа полностью изготавливаются из металла. Сетчатые цельнометаллические виброизоляторы содержат упругие и демпфирующие элементы, изготавливаемые из материала, обладающего механическими свойствами, близкими к свойствам резины. Поэтому такой материал условно называют металлической резиной (МР).

Упругий элемент таких виброизоляторов может быть выполнен в виде пружины рессорного типа или из прессованных гофрированных лент, металлической витой про-

волоки или сетки. В последнем случае упругие свойства полученных таким образом элементов могут широко варьироваться путем придания им определенной формы, за счет выбора материала или диаметра проволоки и т.п. Этим одновременно осуществляется варьирование демпфирования. Цельнометаллические сетчатые виброизоляторы отличаются высокой надежностью и долговечностью, а при совместном использовании в качестве упругого элемента параллельно работающих пружин и сетчатых подушек – стабильностью упругодеформирующих свойств даже при интенсивных динамических нагрузках и в тяжелых климатических условиях.

Виброизоляторы лепесткового типа предназначены для виброизоляции аппаратуры в групповом монтаже по граням амортизированного блока.

Тросовые виброизоляторы

Упругий элемент виброизоляторов этого типа – трос круглого сечения. Тросовые виброизоляторы имеют следующие преимущества перед другими видами виброизоляторов: широкий диапазон нагрузок 10:1, т.е. виброизолятор, рассчитанный для защиты массы в 1 кг, обеспечивает защиту от вибрации и массы в 10 кг; большой коэффициент демпфирования, и поэтому коэффициент динамичности η на резонансной частоте может не превышать 2; движение амортизированного блока при действии ударной нагрузки эллиптическое вместо поступательного при обычных амортизаторах, что позволяет уменьшить зазоры между блоком и основанием; защита от воздействия вибрации обеспечивается во всех направлениях; малое изменение характеристики при длительном воздействии линейных ускорений; широкий интервал рабочих температур. Характеристики некоторых цельнометаллических и тросовых виброизоляторов представлены в табл. 3.

Сборно-композитные виброизоляторы типа АСК

Виброизоляторы из композиционных материалов, свойства которых могут быть обеспечены подбором материала и связующих полимеров, не имеют пока зарубежных аналогов. Авторами статьи [12] получен патент на изобретение данного типа амортизаторов (№ 2010126, 1991г.).

Упругие элементы композитных амортизаторов изготавливаются путем намотки стекловолокна с применением связующего – эпоксидной смолы, что требует специального оборудования.

Композитные амортизаторы в 1993 году прошли межведомственные испытания. Было доказано, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к корабельным амортизаторам. Кроме того, эксплуатация устройств АСК-500 под дизель-генератором ДГ-200 на тральщике ЧФ класса "НАТУА II" с 1991 года подтвердила их высокую надежность в эксплуатации [12].

Заключение

Многолетняя эксплуатация резинометаллических виброизоляторов показала, что они наиболее надежны по ресурсу и ударным нагрузкам. Однако такие виброизоляторы в настоящее время мало удовлетворяют сильно возросшим требованиям, предъявляемым к виброизоляции приборов. Обладая сравнительно высокой частотой собственных колебаний (15–20 Гц в вертикальном направлении и 30–35 Гц в горизонтальном направлении), эти виброизоляторы не обеспечивают надлежащей защиты от вибраций в диапазоне частот меньших, чем указаны выше. К недостаткам можно отнести низкую пожаростойкость; кроме того, попадание на них масла и топлива разрушает резину.

Цельнометаллические виброизоляторы					
Наименование	Собственная частота, Гц	Номинальная нагрузка, кгс	Линейные ускорения	Ударная прочность, g	Длительность импульса, с
ДК	варьируется от 11-12 до 35-40	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
АРМ	нет данных	нет данных	до 10	6	0,05
АЦМ	8-10	от 0,5 до 20	нет данных	нет данных	нет данных
АЦП	8-10	от 0,5 до 30	2-50	15	0,01
Лепесткового типа	10-12	нет данных	нет данных	25	0,05
	Диапазон раб. частот, Гц	Амплитуда вибраций, мм	Диапазон раб. температур, °С	Коэффициент демпфирования, ν	Коэффициент динамичности, η
ДК	нет данных	до 1	-60 ÷ +150	0,4 ÷ 0,5	нет данных
АРМ	5 ÷ 1500	до 25	нет данных	нет данных	нет данных
АЦМ	нет данных	до 1	нет данных	нет данных	нет данных
АЦП	15 ÷ 2000	нет данных	-50 ÷ +150	нет данных	от 3,5 до 6
Лепесткового типа	15 ÷ 2000	нет данных	-60 ÷ +150	нет данных	нет данных
Тросовые виброизоляторы					
	Собственная частота, Гц	Номинальная нагрузка, кгс	Линейные ускорения	Ударная прочность, g	Длительность импульса, с
Стержневые	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Уголкового	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Упругие подвески	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Лестничного типа	10	от 2 до 70	нет данных	15	нет данных
Коаксиальные	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Сферические	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Типа СТВР	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
	Диапазон раб. частот, Гц	Амплитуда вибраций, мм	Диапазон раб. температур, °С	Коэффициент демпфирования, ν	Коэффициент динамичности, η
Стержневые	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Уголкового	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Упругие подвески	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Лестничного типа	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	0,75
Коаксиальные	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Сферические	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Типа СТВР	нет данных	нет данных	-50 ÷ +260	нет данных	нет данных

Таблица. 3. Характеристики некоторых цельнометаллических и тросовых виброизоляторов

Пружинные виброизоляторы обладают значительно большим ресурсом работы, чем резинометаллические. Их упругие характеристики гораздо меньше зависят от внешних условий. Недостатком является то, что пружинные виброизоляторы создают эффективную защиту лишь в осевом направлении.

Цельнометаллические виброизоляторы не поддаются воздействию температуры, влажности, радиации, барометрического давления. Следует сказать, что основным недостатком, присущим всем без исключения цельнометаллическим сетчатым виброизоляторам, является недостаточная стабильность их амортизирующих качеств во времени. На практике замечена некоторая усадка упругого материала – сетки под статической нагрузкой, что приводит к появлению нежелательных люфтов к конструкции, а также к уходу резонансной частоты виброизолятора.

Наилучшие характеристики имеют спирально-тросовые виброизоляторы. Трос круглого сечения благодаря относительно равномерному распределению напряжений способен воспринимать большую нагрузку на единицу веса. Такие виброизоляторы имеют большой коэффициент демпфирования, малое изменение характеристики при длительном воздействии линейных ускорений. Движение амортизированного блока при действии ударной нагрузки эллиптическое вместо поступательного при обычных виброизоляторах, что позволяет уменьшить зазоры между блоком и основанием. К недостаткам можно отнести такие дефекты, как перетирание волокон тросов и остаточные деформации.

Сборно-композиционные виброизоляторы по своим характеристикам превосходят остальные. Например, анализ статических характеристик АСК показывает, что они имеют линейный характер и гистерезис 5–10%. Жесткость в поперечном направлении у АСК составляет порядка 30% от продольной. Остаточные деформации – до 1 мм. Статические характеристики СТВР также имеют близкий к линейному характер при небольшом гистерезисе, но разброс значений жесткости достигает 25%. Сдвиговая жесткость превышает 30% от вертикальной, а остаточные деформации 2–3 мм. Поскольку статическая жесткость СТВР в 1,5 раза больше, чем у АСК, то и собственные частоты первых выше, а значит, виброхарактеристики тросовых амортизаторов должны быть несколько хуже, чем у композитных [12]. Однако следует отметить, что изготовление АСК требует специального дорогостоящего оборудования, тогда как СТВР могут быть изготовлены практически в условиях ремонтной мастерской. Так же отметим, что пожаростойкость СТВР значительно выше (интервал рабочих температур от -72°C до $+260^{\circ}\text{C}$), чем у АСК, поскольку органические связующие материалы значительно ниже по термостойкости ($120\text{--}150^{\circ}\text{C}$), чем стальные волокна тросов.

Анализ характеристик резинометаллических, пружинных, цельнометаллических, спирально-тросовых и композитных амортизаторов позволяет утверждать, что амортизаторы типа АСК и СТВР являются наиболее эффективными средствами виброзащиты по сравнению со штатными резинометаллическими, пружинными и цельнометаллическими виброизоляторами.

Литература

1. Гель П.П., Иванов-Есипович Н.К. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – Л.: Энергия, 1972. – 232 с.
2. Грибов М.М. Регулируемые амортизаторы РЭА. - М.: Сов. радио, 1974. - 144 с.
3. Ильинский В. С. Вопросы изоляции вибрации и ударов. - М.: Сов. радио, 1960. - 159 с.
4. Ильинский В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий. - М.: Энергия, 1970. - 320 с.
5. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радио аппаратуре. - М.: Сов. Радио, 1971. – 344 с.
6. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти т. Т. 6. 2-е изд., испр. и доп./ Ред. Совет: К. В. Фролов (пред.) – М.: Машиностроение, 1995. Защита от вибрации и ударов/Под ред. К. В. Фролова 456 с.
7. ГОСТ 11679.1-76 Амортизаторы Резинометаллические приборные.
8. ТУ 949-ТРМК.013-95 Спирально-тросовый виброизолятор (амортизатор) типа СТВР.

9. А. с. № 198839 (СССР). Упругая тросовая подвеска/Б. В. Большаков, Д. П. Николин – Оpubл. в Б. И., 1969, № 9.
10. А. с. № 236132 (СССР). Сферический тросовый амортизатор/Д. А. Волков, В. Д. Кирилов, Б. В. Большаков – Оpubл. в Б. И., 1969, № 6.
11. А. с. № 1469220 (СССР). Тросовый амортизатор/В. М. Мусалимов, С. Л. Лукьянов – Оpubл. в Б. И., 1989, № 12.
12. Сайт internet www.sir35.narod.ru. Раздел: Научные разработки. Средства борьбы с вибрацией. Медведев В.В., д.т.н.; Червяков А.Н., к.т.н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УДАЛЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СРЕДЕ PDM СИСТЕМЫ

П.Д. Юсупов

Научный руководитель – д.т.н., проф. Д.Д. Куликов

В статье рассмотрены преимущества использования систем ведения проекта (PDM-систем) при проектировании технологических процессов (ТП). Исследования PDM-системы "SmarTeam" показали: что отслеживание жизненного цикла изделия, контроль всего процесса проектирования и просмотр документов стали более простыми для использования и сильно сократилось время проведения этих действий.

Информация, создаваемая на этапе технической подготовке производства, составляет большую часть информации о жизненном цикле изделия.

В данной статье рассмотрены преимущества использования систем ведения проекта (PDM-систем) при проектировании технологических процессов (ТП). Эти системы предназначены для поддержки электронного описания изделия на всех стадиях его жизненного цикла. Однако в большинстве публикаций акцентируется внимание лишь на стадии конструирования изделия. Были проведены исследования PDM-системы "SmarTeam", которая является одной из ведущих в мире фирм по разработке указанных систем. Необходимость проведения исследований была вызвана тем, что к современным САПР технологических процессов предъявляются весьма высокие требования. Для повышения уровня автоматизации и интеллектуальных возможностей современные САПР ТП должны обладать:

- развитой базой данных и знаний, а также средствами ее сопровождения;
- средствами принятия решений при работе с базой знаний;
- средствами настройки на входные и выходные документы;
- средствами, обеспечивающими интеграцию как с CAD/CAM системами, так и с системами технологической подготовки производства;
- развитыми средствами ведения диалога и диагностики состояния процесса проектирования технологии;
- модульной структурой, позволяющей компоновать необходимую структуру системы проектирования;
- развитыми средствами ведения и контроля процесса проектирования.

Комплекс инструментальных средств PDM-системы позволяет организовать эффективное взаимодействие между следующими компонентами: электронным архивом, средствами автоматизированного документооборота, средствами Internet-технологии, CAD/CAE/CAM системами.

Рассмотрим, какие из указанных требований можно реализовать на основе PDM-системы "SmarTeam"(фирма Smart Solutions Ltd, Израиль).

Важной компонентой "SmarTeam" является электронный архив, функционирующий на базе СУБД "InterBase" в архитектуре "клиент-сервер". Наличие электронного архива позволяет осуществить авторизованный доступ ко всем информационным (удаленным и распределенным) ресурсам ТПП. Возможность быстрого доступа к чертежам деталей, к операционным эскизам и к технологическим картам удобна для технологов и является необходимым условием эффективной реализации принципа преемственности технологических решений. Просмотр объектом выполняется без загрузки специальных приложений, так как в "SmarTeam" имеется большое количество вьюверов, позволяющих просматривать как текстовые, так и графические файлы основных CAD/CAM систем. Поиск в архиве осуществляется PDM-системой с помощью стандартных средств задания запроса на поиск по реквизитам учетной карточки объекта. Возможность создания и хранения в архиве объектно-ориентированных баз данных

дает возможность организовать удобный поиск технологического оснащения и нормативно-справочной информации.

Удаленные базы данных могут использоваться как в составе локальной сети, так и в составе глобальной сети (Интернет).

Основные функции таких программных продуктов данного вида таковы:

- обеспечить отображение интерфейса пользователя в формате HTML для отображения программой просмотра клиента, в частности Internet-браузерами.
- обеспечить формирование запросов к базе данных наиболее простыми для неподготовленного пользователя средствами.
- обеспечить аутентификацию пользователя (для разграничения доступа).
- обеспечить обработку запроса и возврат результата в HTML формате для отображения программой просмотра пользователя.

Взаимодействие базы данных и WEB-сервера схематически представлено на рис. 1.

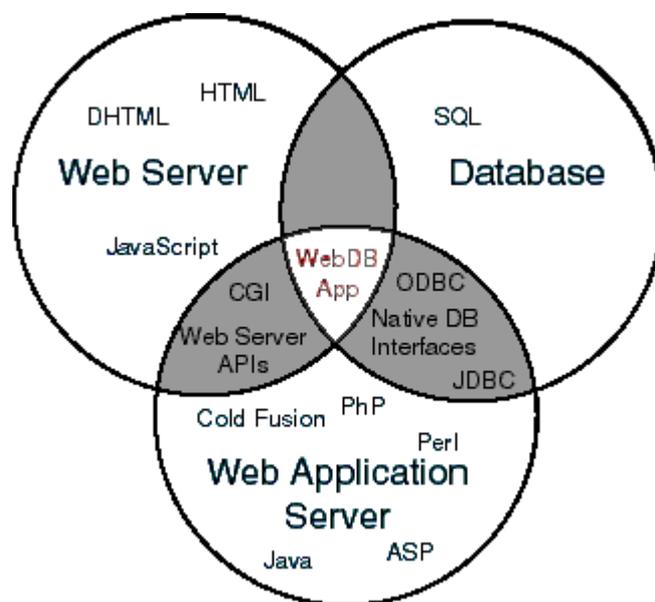


Рис. 1. CGI – Common Gateway Interface

Спецификация CGI позволяет браузеру вызвать тот или иной исполняемый модуль или скрипт на Web-сервере, который мог бы обратиться с запросом к базе данных, построить в HTML-кодах страницу результатов и передать ее обратно Web-серверу, который же, в свою очередь, отсылал бы результаты браузеру. CGI-приложения могут содержать вызовы других программных (написанных, например, на C++) или командных (.bat, .cmd) файлов. С помощью CGI-скриптов, а точнее на языке PERL (Practical Extraction and Reporting Language), построено немало интерактивных Web-приложений. К сожалению, каждый такой скрипт выполняется как иной, нежели Web-сервер, процесс, что быстро "съедает" ресурсы даже достаточно "навороченной" по сегодняшним меркам машины, особенно при большом количестве заходов на сервер.

Базы знаний

Возможны различные подходы к организации баз знаний: экспертные системы, фреймовое представления знаний, табличные алгоритмы и т.д. Представление знаний на основе табличных алгоритмов получило наибольшее распространение в САПР ТП. Декларативное задание правил в виде информационно-логических таблиц, таблиц соответствий, алгоритмических таблиц, таблиц решений и других форм табличных алго-

ритмов позволяет достаточно просто записывать (модифицировать) технологические правила и организовать их хранение в базе знаний. Доступ к базам знаний достаточно просто осуществить, используя дерево проекта PDM-системы. Если в процессе функционирования САПР ТП появляется необходимость в корректировке или в дополнении технологических правил, то в этом случае используется модуль сопровождения базы знаний. Таким образом, последовательно накапливаются правила, отражающие как обще технологические правила, так и локальные технологические правила, учитывающие специфику предприятия. Создание и использование базы знаний создает основу для пассивной адаптации САПР ТП к проблемной среде и для последовательного повышения уровня автоматизации системы в процессе ее функционирования. База знаний организуется на основе объектно-ориентированного подхода. Объекты, образующие базу знаний, включаются в дерево проекта и могут быть просмотрены либо средствами "SmarTeam", либо специальными приложениями, позволяющими, кроме того, выполнить принятие решения по заданным входным условиям.

Ведение проекта

Сложность решения задачи управления процессами автоматизированного проектирования технологии характеризуется такими факторами, как существование большого количества файлов с моделями различных видов и программных средств их обработки; необходимость организации хранения разнородной информации; трудность отслеживания логической связи между файлами; необходимость учета факторов, связанных с контролем реализации стадий жизненного цикла изделия.

PDM-системы осуществляют ведение проекта изделия и позволяют выводить на экран дерево проекта. Каждая вершина дерева – это папка, содержащая модели объектов или образы документов. Для каждой папки возможна организация ссылок на другие папки. Для каждой папки имеется учетная карточка, в которой, кроме идентификационных атрибутов, фиксируется любые атрибуты, по которым необходимо организовать поиск объектов. Каждый объект, входящий в дерево проекта, в своей учетной карточке имеет поле для фиксации состояния объекта: "У автора", "На общем столе", "Утвержден", "На изменении" и т.д. Таким образом, обращение к учетной карточке дает возможность сразу определить состояние объекта. В учетной карточке фиксируются даты начала работы над объектом и даты завершения работы над ним. Эти атрибуты позволяют руководителю отслеживать жизненный цикл любого документа. Каждый объект дерева проекта принадлежит какому либо классу объектов, например, классу "Маршрутная карта", "Операционная карта", "Операционный эскиз" и т. д. Поиск объектов по их классам позволяет ускорить нахождение нужного объекта в дереве проекта. Таким образом, использование дерева проекта позволяет обеспечить высокую степень наглядности и удобство работы с проектом при наличии многопользовательского режима работы.

Управление документооборотом

Организация взаимодействия между проектантами и контроль их деятельности в "SmarTeam" обычно ведется с помощью компоненты "SmarFlow", реализующей технологию "workflow". Эта технология основана на составлении диаграммы делового процесса, в которой фиксируется последовательность прохождения документов. Использование этой компоненты позволяет организовать согласованное взаимодействие пользователей и обеспечить жесткий контроль процесса проектирования ТП и его утверждения в соответствующих подразделениях предприятия. Необходимо отметить, что процесс согласования ведется над комплексом технологических документов, нахо-

дящимся в электронном архиве, а не блуждающим по отделам предприятия. PDM-система дает возможность распараллелить процесс согласования документов и синхронизировать проведение изменений на основе приема RedLine (красная линия).

Исследования, проведенные на кафедре технологии приборостроения СПбГУ ИТМО, показали, что применение системы "SmarTeam" позволяет в 1,5–2,5 раза сократить трудоемкость и стоимость проектирования ТП и повысить качество разрабатываемой технологической документации. Использование PDM–систем открывает перспективу создания САПР технологических процессов нового поколения.

Литература

1. Яблочников Е.И. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении / Учебное пособие. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 92 с.
2. Яблочников Е.И. Организация единого информационного пространства технологической подготовки производства с использованием PDM SmarTeam // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2001. №3. С. 22–29.

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ДЕТАЛИ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ CAD/CAPP СИСТЕМ

В.С. Кишкурно

Научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун

Решение задачи информационной интеграции автоматизированных систем конструкторской и технологической подготовки позволяет строить интегрированные системы проектирования-технологии. Своим возникновением эта задача обязана множеству различных способов представления изделия в автоматизированных системах. Важной особенностью интеграции CAD/CAPP является ярко выраженная зависимость правил формирования модели в CAPP системе от производства, для которого разрабатывается техпроцесс. В статье описана модель представления информации об изделии, на основе которой решается задача информационной интеграции с учетом непрерывности процесса обработки изделия на технологичность.

Современные условия существования предприятий ставят вопрос о необходимости создания сквозных автоматизированных комплексов проектирования и подготовки производства – интегрированных систем проектирования–технологии (ИСПТ). Экономическая целесообразность внедрения ИСПТ заключается в повышении качества процесса подготовки (технической, конструкторской) производства. Качество достигается за счет устранения ошибок, вносимых человеком, и снижения времени на перепроектирование.

Основные принципы интеграции общей подготовки производства заключаются в создании методов связывании островов автоматизации:

- отдельных систем черчения и САПР (CAD);
- автоматизированных систем подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ;
- автоматизированных систем управления производством (АСУП);
- автоматизированных систем проектирования техпроцессов(CAPP).

Важная особенность ИСПТ заключается в том, что она не может быть монолитной системой и должна обеспечивать гибкую реконфигурируемость. Это дает возможность эффективной настройки под конкретный вариант использования и передачи информации, в том числе между различными реализациями системы, например, между проектировщиками и исполнителями, работающими в различных системах. Существующие ИСПТ, как правило, предоставляют пользователю единое проектное конструкторско-технологическое информационное пространство. Компоненты связаны между собой набором информационных потоков. При этом до сих пор под единым информационным пространством часто понимается безбумажная технология. Для таких ИСПТ реализуются потоки информации, ориентированные на передачу частных данных о детали, но при этом в системы CAPP не передается информация о геометрии детали в целом. Некоторым особняком стоят системы для проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ, которые воспринимают информацию о геометрии сложных поверхностей детали. Неочевидность потока, передающего состав детали от системы конструкторской подготовки к системе технологической подготовки, заключается в различии представления детали в этих системах.

Основной задачей обработки изделия на технологичность является придание изделию такого комплекса свойств, который обеспечивает необходимое качество изделия при оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени на технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание, ремонт и утилизацию в конкретных условиях производства, эксплуатации.

Процесс проектирования изделия итеративен, это влечет за собой многократное перепроектирование техпроцесса и, в том числе, многократную обработку на технологичность [1]. Результат обработки на технологичность влияет на последующие итера-

ции проектирования как один из факторов, на основании которого принимается решение о коррекции изделия и необходимости очередной итерации проектирования.

Теоретически технолог и конструктор готовят два разных представления модели одной и той же детали. Проектирование технологической системы (ТС) для детали ведется на прикладных уровнях, в то время как проектирование детали ведется обычно на одном из геометрических уровней.

Введем определение структурированной модели представления детали (рис. 1). Модель состоит из нескольких уровней, каждый из которых содержит определенный набор средств описания детали. Эти средства включают в себя некоторое множество элементов (словарь) и действий над ними. Словарь уровня $n-1$ является алфавитом для уровня n .

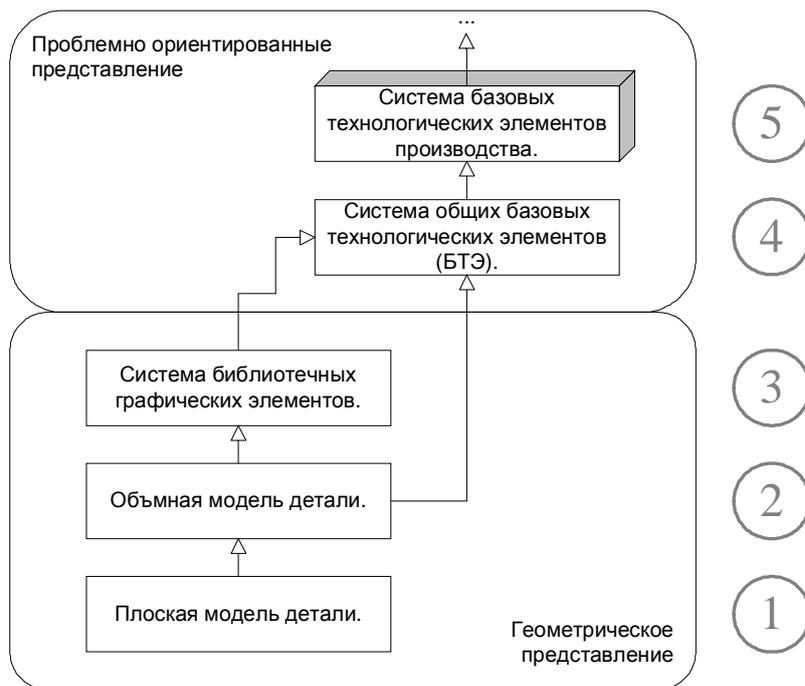


Рис. 1. Структурированная модель представления информации о детали

Конструкция деталей должна обеспечивать их изготовление с применением по возможности минимального количества типов технологического оборудования. Эта задача решается установлением таких соотношений между основными размерными характеристиками деталей, при которых исключается применение дополнительного количества типоразмеров однотипного технического оборудования. При этом требования при отработке изделия на технологичность обращаются главным образом к конструкторам и формулируются в виде рекомендаций по конфигурации, размерам и свойствам поверхностей элементов деталей [2]. Отработка конструкции изделия на технологичность должна производиться разработчиком с привлечением технологов предприятия-изготовителя.

Однако на этапе проектирования изделия не всегда известны особенности производства, где она будет изготавливаться. С этой точки зрения представляется необходимым произвести анализ изделия и его составляющих после конструкторского проектирования. Такой анализ следует проводить на этапе перехода от представления изделия в системе CAD к его представлению в системе CAPP как часть решения задачи интеграции этих систем [3]. Таким образом можно учесть конкретные производственные условия.

Очевидно, задачи интеграции CAD и CAPP систем и отработки изделия на технологичность имеют между собой много общего. Поэтому для решения задачи интегра-

ции CAD/CAPP систем применимы методы из области обработки изделия на технологичность. К таким методам можно отнести методы выбора показателей технологичности, типизации технологических решений. Применение этих методов позволит оптимально сформировать библиотеку базовых технологических элементов (БТЭ), которая определяет производство. Такая библиотека создается единожды и в дальнейшем модифицируется по мере изменений на производстве. Для элементов формируются коэффициенты, определяющие степень технологичности применения операции при изготовлении детали. На основе этих коэффициентов стандартными методами строятся оценки технологичности изготовления изделия в целом.

Системы проектирования технологических процессов (ТП) рассматривают деталь как результат работы ТС, которую они проектируют. Этот результат есть система БТЭ, полученных в результате выполнения технологических операций. Следовательно, в качестве метода логической интеграции можно рассматривать анализ геометрии детали на наличие в ней элементов, подобных получаемым в результате выполнения технологических операций. Фактически это список БТЭ детали, на основе которых проектируются элементы ТС.

По результатам такого анализа решаются следующие задачи:

- подготовить начальный список операций для проектирования техпроцесса;
- оценить технологичность изготовления детали для конкретного производства;
- учесть особенности представления информации, принятые для входного потока CAPP системы и исключить человеческий фактор на этапе их ввода в систему.

В целом это позволяет подготовить начальное представление изделия в CAPP с учетом отработки на технологичность.

Описанная модель представления информации о детали является основой для построения метода проблемной интеграции автоматизированных систем конструкторского и технологического проектирования изделия. Показано, что такая интеграция требует преобразования моделей с повышением уровня представления. В результате может быть получено некоторое множество моделей, которые будут геометрически эквиваленты. Для выбора оптимального результата предложено использовать критерий технологичности полученного ТП для производства, на котором ведется ТПП.

Литература

1. Энгельке У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП. М.: Машиностроение, 1990.
2. Киселев Г.А., Гуленков В.Ю. Гибкие производственные системы в машиностроении. М.: Издательство стандартов, 1987
3. Падун Б.С., Кишкурно В.С. Информационная интеграция CAD и CAPP систем.
4. Миронов Ю.Д., Михельсон-Ткач В.Л. Проблемы технологичности конструкций изделий машиностроения. М.:Издательство стандартов, 1976

ЭЛЕМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И.И. Свердлина

Научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун

Рассмотрение проблемы обеспечения точности изделия как однонаправленного процесса, связывающего проектные работы с изготовлением, приводит к существенным потерям в точности и дополнительным временным затратам на их устранение. Это требует разработки новых методов управления точностью изделия, основанных на организации обратных связей. В статье описан метод управления точностью изделия, основанный на введении элементов управления проектированием технологических процессов. Такой подход позволит при разработке процесса прогнозировать возникновение погрешностей и вводить корректирующие воздействия, способствующие их предотвращению.

Реализация любой технологии является взаимосвязью двух основных образующих потоков – материального и информационного. Подготовка и реализация материального потока есть задача конструкторской, технологической подготовок производства (КПП, ТПП), а также производственного процесса изготовления изделия по разработанной технологии. Информационный поток представляет собой определенное алгоритмически заданное изменение параметров процесса во времени. Следовательно, любой технологический процесс (ТП) должен сопровождаться информацией о последовательности изменения состояния процесса во времени.

Необходимой составляющей информационного потока является управление, представляющее собой организацию целесообразных управляющих воздействий (УВ), направленных на достижение заданных показателей качества изделия. Обеспечение качества изделия невозможно без знания показателей о состоянии процесса и изделия, поэтому недостаточно одного информационного потока, характеризующего последовательность материальных изменений. Необходимо дополнение еще одним потоком, который должен нести информацию о текущем состоянии ТП и изделия. Такой поток реализуется введением обратных связей ОС [1–3].

Структурно управление процессами изготовления изделия с организацией трех уровней ОС представлено на рис. 1.

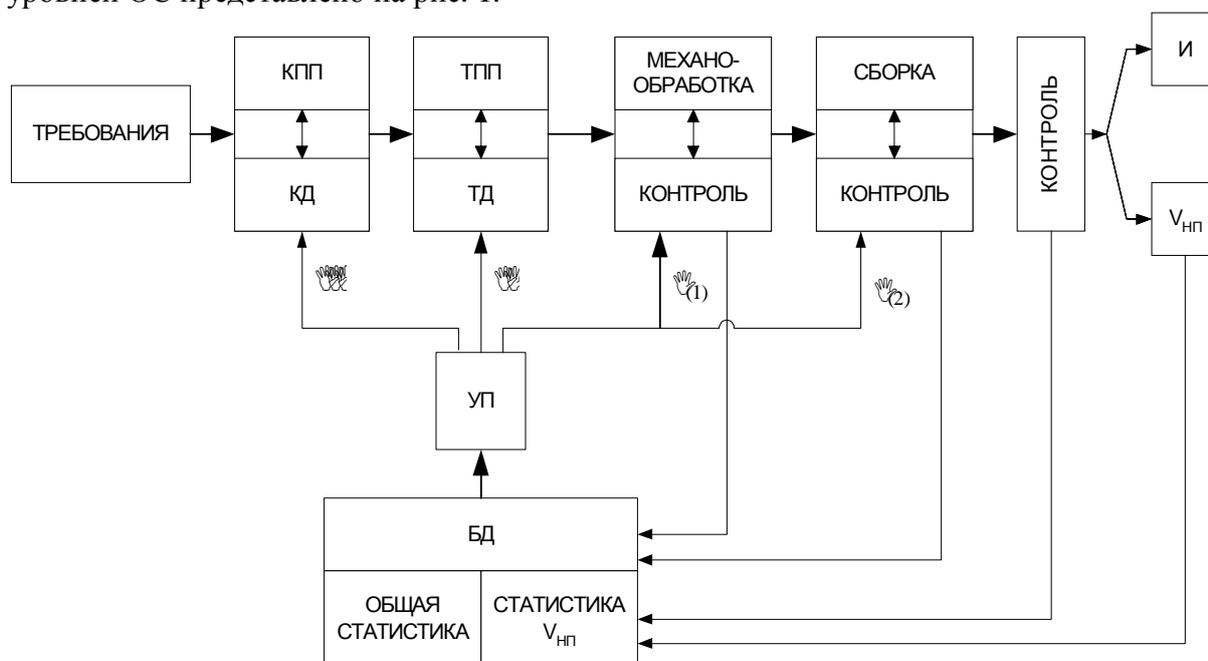


Рис. 1. Структурная схема управления ТП: КД – конструкторская документация, ТД – технологическая документация, И – изделие, V_{нп} – объем незавершенного производства на предприятии

В ходе развития производства и расширения номенклатуры выпускаемых изделий предприятием разрабатываются системы унификации конструкции изделий и ТП их изготовления. Поэтому при разработке нового изделия оно соотносится с соответствующим классом (типом) изделий предприятия, оценивается степень соответствия нового изделия/детали унифицированным и производится поиск унифицированного ТП в возможной последующей его доработкой для данного изделия/детали.

Таким образом, управление точностью изделия на этапе ТПП можно представить как один из методов проектирования ТП – заимствование с изменением структуры ТП-аналога [4].

При управлении точностью изготовления изделия d необходимо ввести в традиционную схему решения задачи ТПП новую составляющую, позволяющую на основании анализа накопленной статистики (рис. 1) учесть возможные нежелательные отклонения, компенсация которых обеспечит получение изделия заданной точности. Такой новой переменной ТПП, делающей его управляемым и адаптивным к динамичным изменениям рабочей среды, являются УВ (рис. 2).

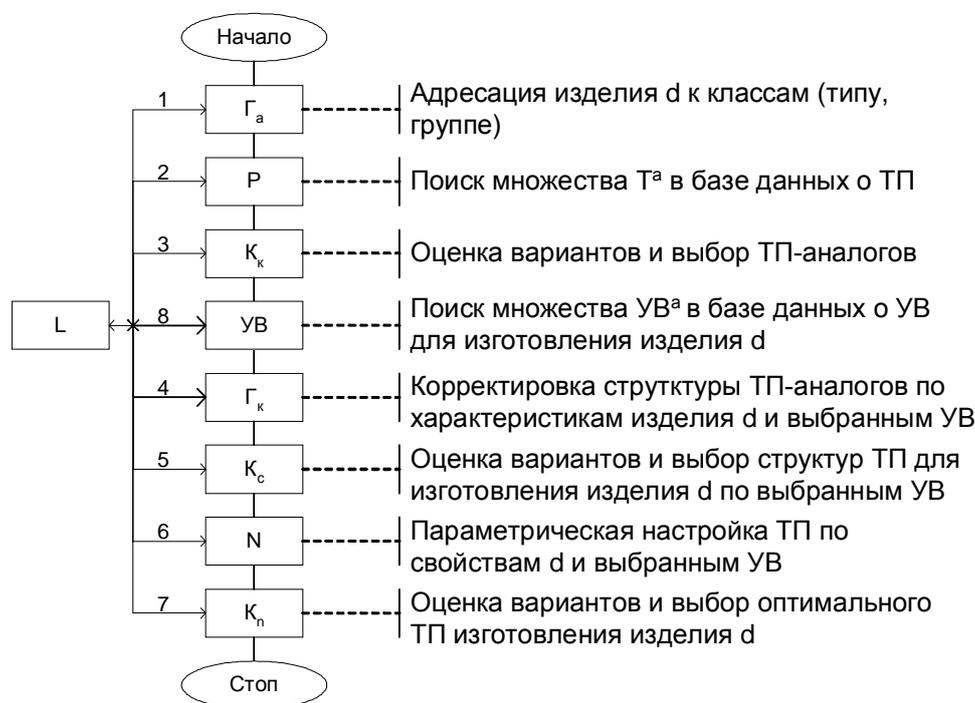


Рис. 2. Схема проектирования ТП методом заимствования с изменением структуры ТП-аналога с элементами управления процессом

Процесс формирования параметров начинается, как и в традиционной схеме [4], с формирования общих характеристик изделия, по которым оно будет адресоваться к группе (классу) изделий (1). Если известно, какой унифицированный ТП необходим для изготовления данного изделия, то этот этап пропускается. Если в БД нет изделия, максимально отвечающего требуемому, то отыскивается изделие-аналог.

Так как за комплексной деталью закреплен унифицированный ТП-аналог, то в БД ТП из множества T^a отыскивается соответствующий ТП-аналог (2). Новая деталь может адресоваться к нескольким комплексным деталям, тогда выбирается та комплексная деталь, которая имеет наибольший коэффициент адресации k_a [4]. Если множество элементов d совпало с множеством элементов комплексной детали класса, то d полностью включается в комплексную деталь, и можно к детали d применить ТП-аналог данной комплексной детали.

Эффективным ТП будет называться тот ТП, для которого коэффициент адресации k_a будет наибольшим (3).

После того как определен класс детали d и унифицированный ТП-аналог по совокупности характеристик d и найденного ТП, из БД выбираются принимаемые ранее для данной совокупности признаков УВ (8). Таких УВ может быть несколько вариантов, поэтому технологу необходимо будет выбрать оптимальное сочетание параметров d , ТП и УВ (5). Для этого необходимо ввести понятие критерия оптимальности $k_{ув}$, который представляет собой отношение требуемого точностного параметра δT_T к полученному действительному точностному параметру с применением УВ δT_{TP} ($\delta T_{TP} = f(Y)$).

$$k_{ув} = \frac{\delta T_T}{\delta T_{TP}} = 1, \quad (1)$$

где δT_{TP} – значение производственного поля допуска, δT_T – заданное значение поля допуска.

Если $k_{ув} < 1$, это означает, что δT_{TP} с примененными УВ значительно превышает δT_T с учетом заложенного процента брака, и применение данного УВ не решает поставленной задачи управления. Если $k_{ув} > 1$, это означает, что примененные УВ значительно и необоснованно ужесточают δT_{TP} по сравнению с δT_T .

В связи с выбранным УВ при необходимости производится новый расчет режимов резания, нормирование времени, размерных характеристик ТС, корректировка структуры унифицированного ТП-аналога и изделия или, при необходимости, меняется его структура (6).

Формально описание данного метода с включением управления проектированием можно представить следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} LKN\Gamma_k PG_a(UB)d = t; \\ \Gamma_a d = G^a; \\ PG^a = T^a, t_i^a \in T^a, \\ N\Gamma_k T^a(UB^a) = T, t \in T, \\ dt_i^a = UB, UB \in UB^a \end{array} \right. , \quad (2)$$

где УВ – управление, принятое для конкретного ТП t изготовления изделия d , UB^a – множество УВ, принимаемых для унифицированного T^a , соответствующего данному классу изделий, к которому адресовалось конкретное изделие (остальные обозначения – [4]).

Такой метод обеспечения заданной точности изделия при управлении ТПП, в частности, позволяет оптимально использовать имеющиеся возможности парка оборудования предприятия, сократить время на отработку опытной партии изделия. Прогнозирование возможных ситуаций в производственной среде позволит сократить сроки на освоение и адаптацию новых видов изделий за счет применения накопленного производственного опыта.

Новизна описанного метода заключается в ведении обратных связей, учитывающих динамическое изменение состояния конкретного производства на этапе проектирования технологического процесса и технологической подготовки производства. Это достигается дополнением существующих методов проектирования технологических процессов новыми элементами управления. На основе предложенной концепции разработана модель адаптивного управления точностью в ходе технологической подготовки производства и проектирования технологических процессов.

Литература

1. Телешевский В.И. Принципы построения компьютеризированных систем обеспечения качества. //Автоматизация проектирования. Открытые системы. 1999. №1.
2. <http://www.osp.ru/ap/1999/01/21>.
3. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. и др. Адаптивное управление технологическими процессами, - М.: Машиностроение, 1980.
4. Zocher, K.-P.: Adaptive und Selektive Montage in der flexiblen Fertigung. In: 47 IWK TU Ilmenau, 2002
5. Митрофанов С.П., Куликов Д.Д., Миляев О.Н., Падун Б.С. Технологическая подготовка гибких производственных систем, Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987.

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

С.А. Гнездилова

Научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун

В работе рассматривается использование экспертных систем (ЭС) на предприятиях для решения технологических задач. Внедрение ЭС на производстве существенно сокращает сроки проектирования, что в дальнейшем ведет к снижению общего времени при изготовлении изделия.

Введение

В настоящее время ресурсы отечественных приборостроительных предприятий (парк оборудования, состав специалистов, организация работ, уровень автоматизации ТПП) не обеспечивают в должной мере выпуска продукции, отвечающей мировым стандартам и в сроки, определяемые темпами мирового научно-технического развития. Сегодня в приборостроении время жизни изделия может быть сопоставимо с временем, затрачиваемым на его проектирование и подготовку производства. Это иногда приводит к тому, что изделие, вследствие длительных сроков ТПП, фактически устаревает уже к моменту его запуска в серийное производство.

Основные сегодняшние проблемы ТПП в отечественном приборостроении состоят в следующем.

- Проектирование во многих случаях носит ручной характер, применяемые средства автоматизации используются для решения лишь отдельных задач, нет комплексного характера автоматизации.
- Коммуникации между специалистами и службами ТПП осуществляются в основном на бумажных носителях, что приводит к общему замедлению всех процессов ТПП.
- Решение задач обеспечения технологичности конструкции начинается на поздних стадиях проектирования изделия, что приводит к многочисленным изменениям в конструкторской документации.
- Допускается большое число ошибок при проектировании, следствием чего являются значительные финансовые и временные затраты на проведение необходимых изменений.
- Отсутствует эффективная специализация и кооперация с другими предприятиями при решении задач ТПП.

В результате затягиваются сроки запуска новых изделий в производство, неоправданно увеличиваются затраты, качество изделий заметно уступает западным образцам [1].

При отсутствии автоматизации длительные сроки проектирования и изготовления оснастки отрицательно сказываются на общем времени подготовки производства. Для повышения эффективности производства необходимо обеспечить достаточный уровень оперативности и обоснованности управляющих воздействий и проектных решений. С этой целью процессы управления и проектирования автоматизируются. Наиболее предпочтительная форма автоматизации – экспертные системы, так как они позволяют повысить качество технологической подготовки производства при неполной формализации правил технологического проектирования и управления.

Теоретическая часть и реализация

Экспертная система представляет собой компьютерную программу, которая моделирует не столько физическую природу определенной проблемной области, сколько механизм мышления человека применительно к решению задач в этой проблемной области.

ти; система, помимо выполнения вычислительных операций, формирует определенные соображения и выводы, основываясь на тех знаниях, которыми она располагает.

Существуют как узконаправленные экспертные системы, так и оболочки, пользуясь которыми, можно, не будучи программистом, создавать свои экспертные системы.

Оболочки экспертных систем представляют готовый "костяк", в котором имеются в наличии самые важные компоненты экспертной системы. В этот "костяк" также входят "знания об области применения" [2].

В настоящее время для решения технологических задач применяется ряд экспертных систем, ориентированных на следующие производственные задачи: планирование, анализ и диагностирование, управление, технологическое проектирование. Каждая экспертная система ориентирована на конкретную задачу (см. рис. 1). Например, для проектирования технологических процессов используется система TECHCARD, для нормирования операций и расчетов режимов резания – TECHEXP, для диагностирования оборудования – ЕМУСИН. Каждая из этих систем имеет свой набор правил обучения и управления данными.

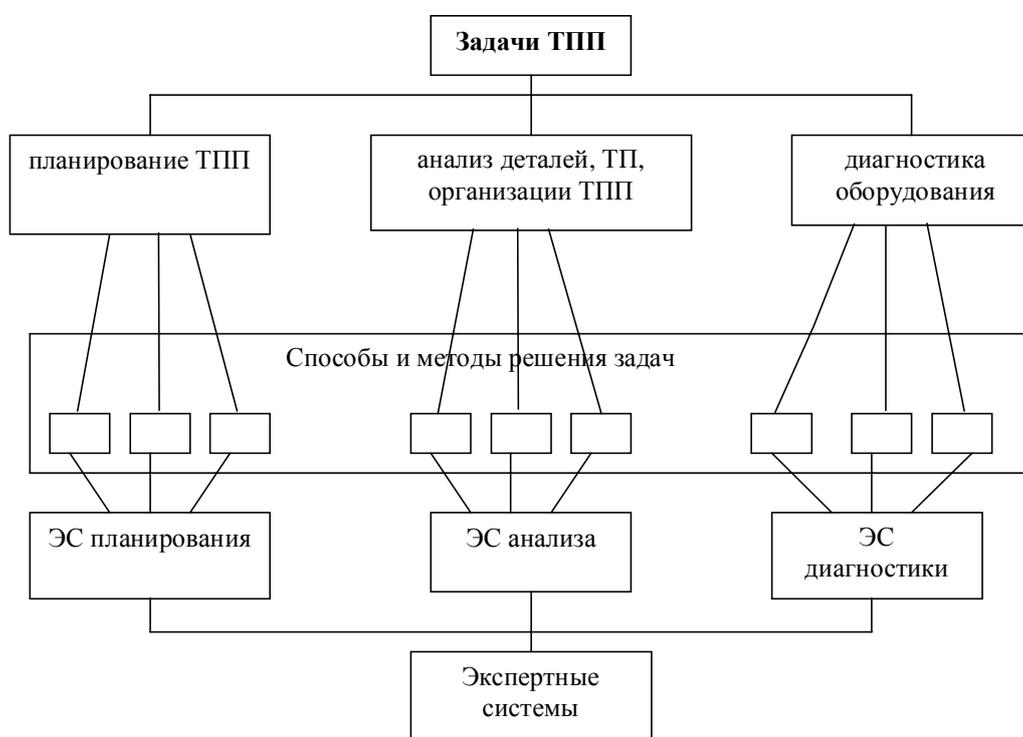


Рис. 1. Соответствие задач ТПП и экспертных систем.

В планировании производства существуют различные методы решения задач, которые ориентированы на различные специфические ситуации. Каждая ситуация описывается оригинальным составом данных и решений. Цель метода – учесть каждую технологическую операцию с ее индивидуальными ограничениями и обеспечить минимизацию незапланированных затрат. Нетрудно заметить, что существует тенденция увеличения сложности задачи по мере возрастания числа полностью спланированных технологических операций, к тому же по возможности установленные сроки выполнения операций не должны изменяться. Чтобы противодействовать этой тенденции, целесообразно решение задачи начинать с тех операций, которые накладывают самые большие ограничения по запросам дефицита, сроков и затрат.

На основе анализа загрузки имеющихся ресурсов устанавливаются сроки производственной программы и определяется подготовительное время для каждой операции.

В качестве примера рассмотрим экспертную систему для виртуального предприятия по проектированию и изготовлению пресс-форм. При внедрении экспертной системы на виртуальное предприятие после поступления заказа на головное предприятие экспертная система, обладающая специализированной базой данных и базой знаний в области проектирования и изготовления оснастки, проводит анализ вновь поступившего заказа на основе экспертных оценок. Оцениваются стоимость заказа, время выполнения заказа и возможность его выполнения в заданные сроки. Первые две оценки зависят от конкретного заказа, а последняя – от всех заказов, которые были приняты или рассматриваются на возможность их исполнения.

На все эти виды оценок влияют следующие параметры:

- сложность пресс-формы,
- время проектирования,
- время изготовления оснастки,
- себестоимость пресс-формы.

Сложность пресс-формы выступает здесь главным критерием, так как в зависимости от сложности пресс-формы рассчитывается время проектирования и изготовления оснастки, а также себестоимость пресс-формы.

Сложность пресс-формы зависит от большого числа факторов. К этим факторам относятся: габариты изделия; число гнезд в форме; число поверхностей разъема; сложность формообразующих поверхностей; качество формообразующих поверхностей; точность изготовления деталей формы; наличие горячеканальной системы и др.

Заказы, поступающие на предприятие, группируются: выбираются одинаковые задания на изготовление, с похожими характерными чертами. Система анализирует все задания на изготовление относительно этих свойств и относит их к стадии завершения подготовки планирования. Незапланированные технологические операции система перемещает по оси времени без соблюдения сроков ограничения. Таким образом, обеспечивается полное планирование всех технологических операций [2,3].

В заключительной стадии улучшения планирования система ищет потенциалы оптимизации.

Для решения задач анализа применяются системы анализа и диагностирования, которые отвечают за: анализ данных, причин неисправностей средств производства и использования средств производства, за диагностирование причин несоблюдения сроков выполнения заказов, за отслеживание занятости станков (машин) и загруженности заданиями, за анализ расходов (рассмотрение возможности использования менее дорогой технологии производства).

Каждая из перечисленных выше экспертных систем должна обладать своей базой данных и базой знаний, своим набором правил, чтобы отвечать предъявляемым к ней требованиям. Например, в системе ТЕСНЕХР экспертные знания представляются в виде формул и таблиц. Формулы широко используются там, где требуемое значение можно получить путем обычных математических вычислений из других параметров. Так, для получения минимальных размеров заготовки можно взять габаритные размеры детали из чертежа и прибавить припуски на обработку. Если такой математической зависимости нет, то можно задать различные значения нужного параметра при разных условиях, в результате чего получается таблица, очень похожая на таблицы, приводимые в технологических справочниках.

Если в базу знаний введены таблицы и формулы для расчета определенного аргумента, то экспертная система сможет определить его значение, как только для этого будет достаточно информации (т.е. все необходимые исходные аргументы получат свои значения). Получив задание, ТЕСНЕХР в первую очередь определяет, какие формулы и таблицы можно использовать для получения нужного результата. Каждая формула всегда имеет ровно один результат, а таблицы могут иметь и несколько (например, таблица

для расчета полей допусков имеет два результата). После выбора формул и таблиц проверяются их условия; если условие ложно, то соответствующая таблица или формула отбрасывается. В идеале в конце должна остаться только одна формула или таблица, из которой и получается требуемое значение [4].

Экспертная система для планирования производством должна иметь базу, содержащую информацию о технологических операциях, оборудовании, оснастке. Правила данной системы необходимо ориентировать на выполнение поставленной задачи с учетом отведенных сроков. Система TECHCARD позволяет создавать базы данных по стандартному и специальному оборудованию и оснастке; операциям. Данные базы используются технологами при написании технологических процессов, что существенно облегчает написание ТП с точки зрения удобства и быстроты.

Экспертная система, отвечающая за анализ и диагностирование, содержит информацию о заказах, загруженности оборудования, материале (имеющемся на складе).

В процессе проектирования оснастки должны выполняться работы по формированию запросов на поиск аналогов, их систематизации и анализу. Отобранные аналоги должны быть использованы при проектировании изделий. При поиске аналога также необходима своя экспертная система, содержащая базы данных оснастки, технологических операций и переходов. Затем проводится проверка спроектированного изделия на соответствие техническому заданию на его проектирование и достигнутых показателей технологичности. База данных может быть создана в среде CAD/CAM Cimatron.

Заключение

По мнению специалистов [5], в недалекой перспективе экспертные системы будут играть ведущую роль во всех фазах проектирования, разработки, производства, распределения, продажи, поддержки и оказания услуг. Их технология, получив коммерческое распространение, обеспечит революционный прорыв в интеграции приложений из готовых интеллектуально - взаимодействующих модулей. [6]

Использование экспертных систем приносит значительный экономический эффект и сокращает время выпуска нового изделия.

Экспертная система, направленная на решение конкретных технологических задач, помимо традиционных требований, предъявляемым ко всем экспертным системам, должна отвечать требованиям:

- распределение заданий на изготовление к средствам производства,
- размещение производственного оборудования,
- важна ориентация на общие знания и ориентация на конкретную организацию.

Литература

1. Яблочников Е.И. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. Учебное пособие, СПб, ИТМО, 2002.
2. Horst Wildemann Expertensystemen in der Produktion, München: gfmt, Ges, für Mänagement und Technologie, 1989.
3. Bernhard Mechler. Intelligente Informationssysteme , Addison - Wesley (Deutschland) GmbH, 1995.
4. Куприянчик А.М., Гинзбург И.М., Печков Ф.И. Techcard. Версия 4.2. Руководство пользователя. Минск, Репринт, 2001.
5. F. Hayes-Roth, N. Jacobstein. The State of Knowledge-Based Systems. Communications of the ACM, March, 1994, v.37, n.3, pp.27-39.
6. Попов Э.В. Экспертные системы реального времени. // Открытые системы. 1995. № 02.

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Р.М. Шаймарданов

Научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун

В статье рассмотрены традиционные принципы организации взаимодействия различных подразделений на предприятии и предложены новые с использованием системы PDM/PLM. Разработана схема интеграции PDM/CAPP/CAD, показана ее практическая реализация и возникающие при этом проблемы и решения.

1. Организация управления. Требования к PDM

На машиностроительном предприятии "Арсенал" была поставлена задача внедрения современных информационных систем. Автор настоящей статьи входит в группу специалистов, проводящих внедрение PLM системы, и проводит работу по интеграции PDM и CAPP систем. При внедрении современных информационных систем меняется методология взаимодействия специалистов, изменяются стандарты предприятия и т.д., поэтому также необходимо производить реинжиниринг бизнес-процессов. Таким образом, необходимо провести предварительный анализ текущих процессов и выявить их недостатки.

Главные цели, которые хотят получить предприятия от внедрения информационных систем, – это сокращение сроков проектирования, сжатые сроки изготовления изделия с минимальными издержками и запасами на производстве. Соответствующим требованиям удовлетворяют следующие системы:

- управление жизненным циклом изделия – PDM/PLM;
- конструирование – CAD/CAE системы;
- проектирование технологии – CAPP/CAM системы;
- управление производственными ресурсами – MRP/ERP.

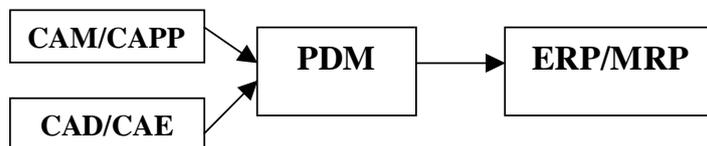


Рис. 1 Схема движения данных в производстве

Все они объединены процессами управления (Workflow), которые определены стандартами предприятия или отраслевыми стандартами. Необходимость интеграции этих систем обусловлена, во-первых, сквозным циклом проектирования-производства изделия, а также минимизацией времени и затрат.

Конструктор, перед тем как направить изделие в производство, должен согласовать его с технологами. После это документация в электронном виде отправляется технологу, который предварительно определяет требования к количеству основного и вспомогательного материала. Затем эта информация отправляется в ERP/MRP систему, чтобы определить предварительные планы закупок материала и загрузку оборудования. По этим данным можно также предварительно определить, какое время потребуется для изготовления изделия.

Существует мнение, что необходимо объединение уровней PDM и CAPP/CAM, и это может быть реализовано, если на производстве производятся все составляющие изделий. Однако на современных предприятиях стараются для минимизации издержек передавать производство некоторых частей на другие, специализированные предприятия. В этом случае излишняя функциональность (проектирование технологии) в системе PDM не применяется, однако интеграция необходима.

1.1 Интеграция на уровне управляющих процессов

Рассмотрим более подробно организацию управления между технологом и конструктором.

На рис. 2, 3 представлены две схемы прохождения согласования изделия между технологом и конструктором:

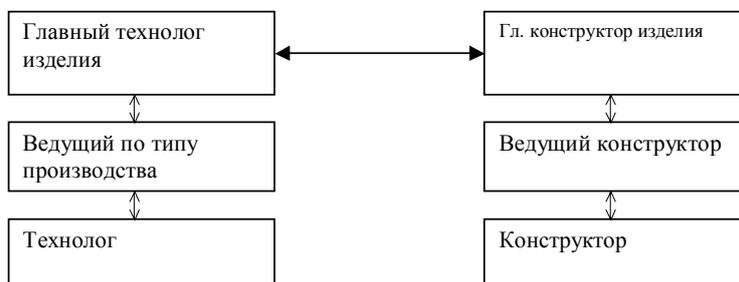


Рис. 2. Классическая схема согласования документов

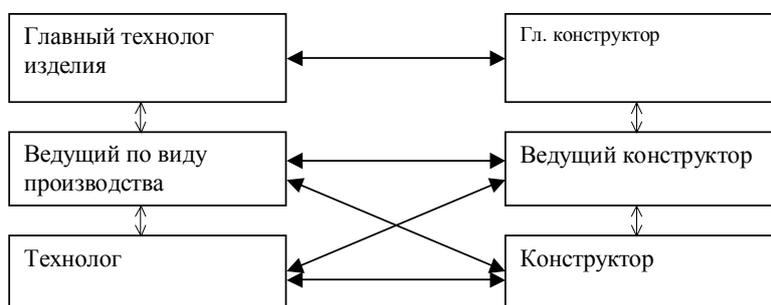


Рис. 3. Модифицированная схема согласования документов

На рис. 2 показана классическая схема, в которой технолог не может напрямую взаимодействовать с конструктором, и все замечания и изменения проходят через главного конструктора и технолога. Недостатки представленной схемы взаимодействия:

- высокая загрузка верхнего управляющего звена главного конструктора и технолога;
- долгий цикл прохождения документа;
- согласование возможно только после окончания проектирования всего изделия.

Ее достоинства:

- низкий процент ошибок, т.к. главный технолог не пропустит неправильные замечания рядового технолога;
- хорошо прослеживается иерархия ответственных лиц.

На большинстве предприятий в России применяется схема, представленная на рис. 2. Это обусловлено применением старых стандартов предприятия, привычкой и низкой автоматизацией производства.

На второй схеме (рис. 3) представлена более неформальная система организации согласования конструкторской документации. В ней согласование проходят только окончательные версии документов.

Недостатки новой схемы взаимодействия:

- большой объем неформальной переписки;
- возрастает вероятность ошибки.

Ее достоинства:

- согласование возможно еще до окончания проектирования всего изделия, т.е. согласование может проходить на этапе после (во время) проектирования одной из деталей изделия;
- разгружается верхнее управляющее звено от несущественных операций;

- ввиду тесного взаимодействия технолога и конструктора повышается производительность труда и снижается время утверждения изделия отделом ОТТ, так как многие согласования проводятся еще на этапе проектирования.

Эта схема была предложена для работы с использованием современных средств управления жизненным циклом изделия. Она возможна исключительно в PDM/PLM системах, в которых предусмотрены удобные средства общения между инженерами, поддержка версионности, а также обеспечены права доступа к документам и их просмотр вне зависимости от их местонахождения.

1.2. Документооборот

Документация, как конструкторская, так и технологическая должна храниться в PDM системе. Необходимо их тесное взаимодействие, т.е. требования к материалам, поверхностям изделия из конструкторской документации должны быть легко доступны технологу, причем по возможности при создании ТП эти данные должны автоматически передаваться в программу проектирования ТП (CAPP, CAM). Необходимо отметить, что PDM система является центром концентрации ключевой конструкторской и технологической информации на предприятии, и уже из нее происходит выгрузка информации об изделии в ERP/MRP систему или же формирование СПТ (Спецификация технологическая) и передача в отдел планирования.

1.3. Поддержка жизненного цикла изделия

В PDM системе должен быть реализован жизненный цикл изделия, т.е. поддерживаться версии изделия, таким образом, мы можем получить доступ к документации более старой версии изделия, которая еще эксплуатируется и, например, требует ремонта или замены, какой либо части.

1.4. Защита данных

Необходимой составляющей PDM систем является поддержка авторизованного доступа к документам и наличие электронной подписи.

Если обобщать все вышеназванные пункты, то можно заметить, что на рынке не так много систем, которые удовлетворяют всем этим требованиям. И если со стороны российских производителей наблюдается технологическое отставание, которое постепенно ликвидируется, то западные системы, хоть и имеют развитые возможности, но, к сожалению, не поддерживают российские стандарты, и их приходится значительно дорабатывать. На машиностроительном предприятии проходит внедрение и опытную эксплуатацию PDM/PLM система SmarTeam. В частности, проводятся работы по интеграции этой системы в единое информационное предприятие и адаптации под российские стандарты [1–7].

2. Интеграция на уровне данных

Как уже было сказано, поддержка интеграции необходима для автоматической передачи данных между CAD/CAM/CAPP системами. При интеграции различных приложений мы избегаем так называемой "островковой" автоматизации и позволяем различным ИТР работать в команде с большей эффективностью. И если на уровне CAM/CAD систем интеграция поставляется вместе с PDM, то в отношении стыковки CAPP – PDM и CAPP – CAD систем приходится производить доработку.

Рассмотрим один из примеров такой интеграции, проведенной на машиностроительном предприятии ОАО МЗ "Арсенал":

2.1. Проблемы, возникающие при интеграции приложений. Модули интеграции собственной разработки

Необходимо отметить, что при попытке интеграции приложений группой внедрения на предприятии часто возникает основная проблема: отсутствие как таковой документированной возможности интеграции (от разработчика).

Возможно единственное решение - написание модулей интеграции собственной разработки. Но при этом возникают трудности – отсутствие API-интерфейса в приложениях, а также незаинтересованность разработчиков в предоставлении описания внутренней структуры приложения и/или БД. Наверное, с такими недостатками приложений встречаются многие интеграторы, так что приходится использовать API Windows, что приводит к сложным, громоздким решениям, которые к тому же не дают полной реализации поставленной задачи.

Другой вариант решения - обратиться к разработчику с просьбой открыть внутреннюю структуру данных, на что зачастую приходит неполный ответ или отказ в сотрудничестве. Возможно, это связано с тем, что разработчик намерен сам произвести подобный продукт и предлагать его на рынке. Хотя справедливости ради надо отметить, что фирма-разработчик, возможно, хочет сохранить свое ноу-хау и (или) не стесняться в будущем с поддержкой доработанного сторонней организацией продукта.

Тем не менее, учитывая насущность интеграции и пассивность в этом плане разработчиков, оптимальным (по оценке время/затраты) остается решение написания модулей интеграции силами группы внедрения предприятия.

2.2. *Определения интерфейса по данным между приложениями. Постановка задачи*

При постановке задачи интеграции приложений необходимо вначале определить следующие условия в информационных потоках:

- данные, которые будет проходить между приложениями;
- направление передачи данных;
- исключение избыточности, т.е. передача только необходимых данных, несоблюдение этого условия приводит к выдаче на дисплей компьютера избыточных данных и соответственно затрудняет восприятие пользователем;
- возможности интегрируемых приложений по приему и передаче данных (формат (структура) данных);
- определение прав доступа на данные.

2.3. *Интеграция с приложением: посредником, достоинства и недостатки*

Часто возникает ситуация, когда два пользователя используют три приложения, среди которых одно – общее. Очевидно, в таком случае использовать это общее приложение в качестве посредника (шлюза) для передачи данных.

На ОАО "МЗ Арсенал" пользователи-технологи используют программные продукты SolidWorks (3D моделирование) и TechCard (проектирование ТП), в то время как пользователи-конструкторы - SolidWorks (3D моделирование) и PDM SmarTeam. Используя общее приложение – SolidWorks – было решено организовать обмен информацией о детали/сборке/изделии (через свойства файла модели/четежа).

Перечислим некоторые достоинства этого решения:

- для обучения пользователей требуется меньшее количество средств,
- экономятся средства на дополнительные лицензии,
- обеспечивается синхронизация и единообразие инженерных данных, и его недостатки:
- трудозатраты на написание модулей и защиту данных.
- затруднительна полная передача неискаженных данных, так как промежуточное приложение может снижать информативность данных, или ограничивать возможности передачи данных определенных типов.

Очевидно, что преимущества с лихвой перекрывают недостатки.

3. Практическая реализация задач интеграции

3.1. Передача параметров в ТП через свойства файла модели

Как уже было описано, это так называемая реализация передачи данных с промежуточным звеном. Было создано 2 модуля:

- модуль записи данных в файл модели SolidWorks из системы PDM SmarTeam,
- модуль записи данных из файла модели SolidWorks в систему PDM Search, которая поставляется тесно интегрированной с системой проектирования ТП TechCard и может передавать параметры в БД TechCard.

На будущее запланировано написание модуля, который напрямую будет записывать данные в БД TechCard.

Важно отметить, что можно передавать большое количество параметров, но после тестовой эксплуатации количество передаваемых параметров было уменьшено, так как некоторые из них невозможно использовать в TechCard.

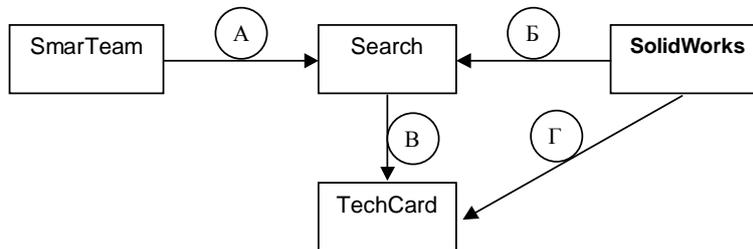


Рис. 4. Упрощенная схема работы системы :А – передача имени объекта, имени и месторасположения файла модели SolidWorks, создание изделия в Search, Б – передача свойств модели SolidWorks в Search, В – передача свойств модели в TechCard, Г – передача выбранных пользователем параметров модели в TechCard

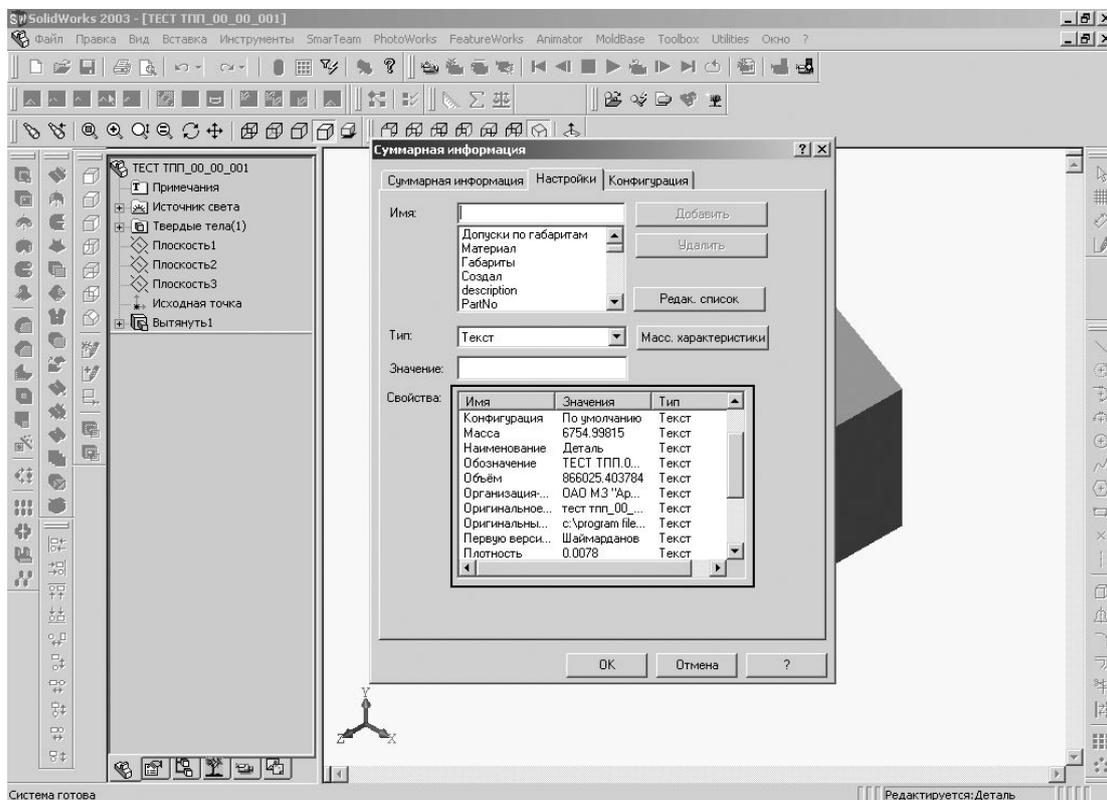


Рис. 5. Параметры в SolidWorks. В рамке обведены параметры, которые находятся в файле модели SolidWorks

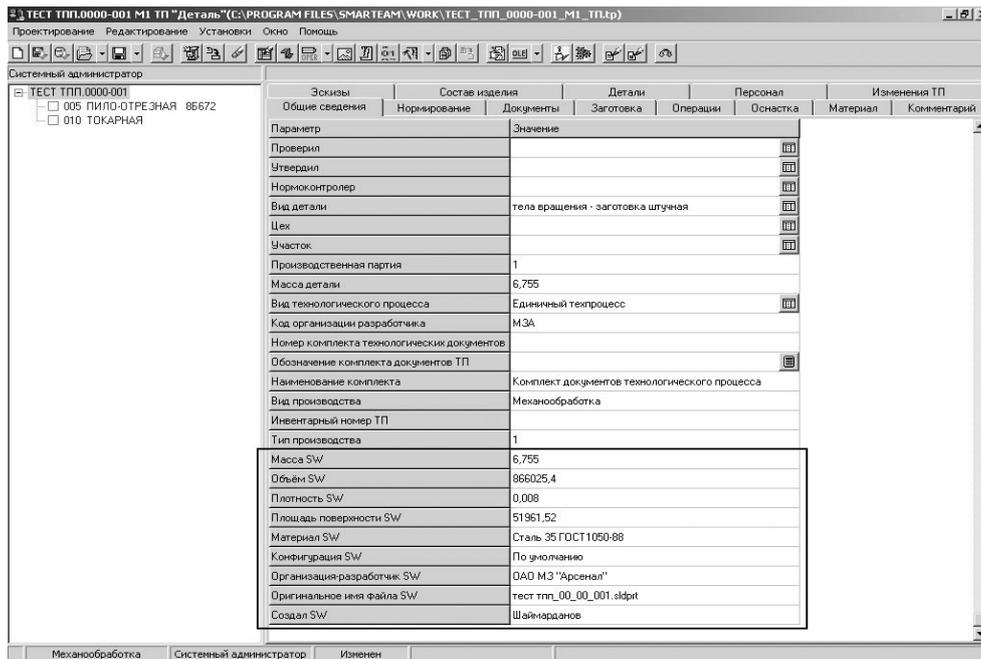


Рис. 6. Черным обведены новые понятия, которые перенесены из SolidWorks

3.2. Создание ТП из PDM системы

В этой части работы был создан новый класс в PDM SmarTeam и написаны новые формы, а также проведено подключение к чужой для SmarTeam базе TechCard. Эти манипуляции необходимы, чтобы правильно формировать имя технологического процесса и версию. Например, для первой версии ТП механообработки формировалось обозначение "Имя_ТП_М01_ТП", где "Имя_ТП" наследовалось от имени изделия, "М" обозначает вид производства (в данном случае механообработка), а "01" – версию ТП.

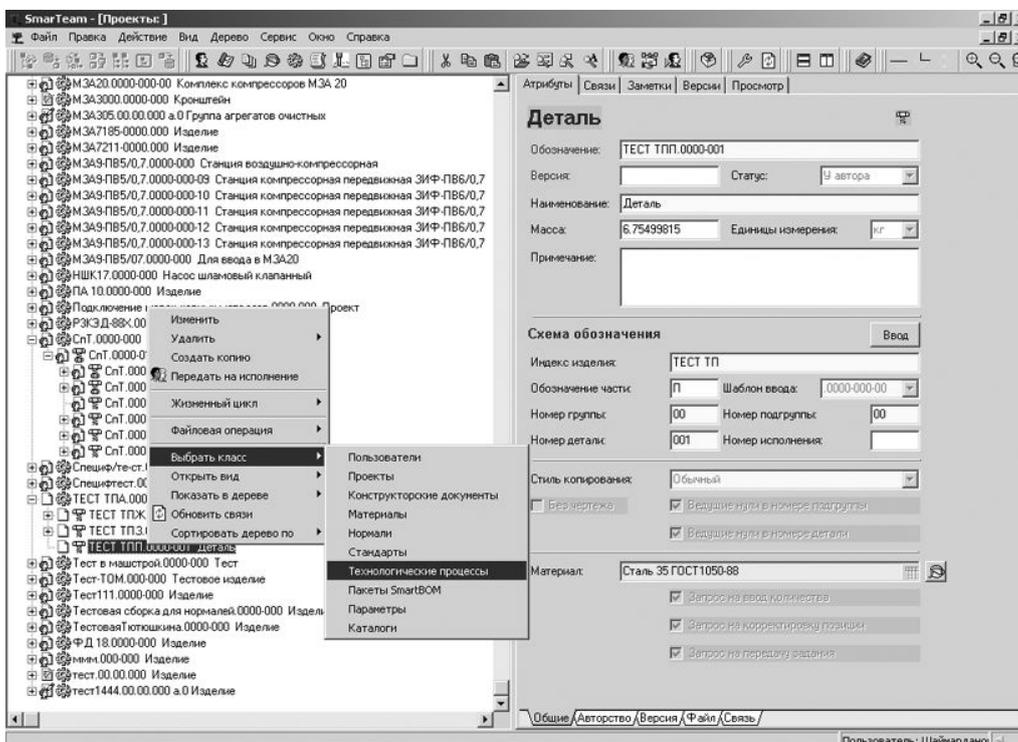


Рис. 7. Класс "Технологические процессы"

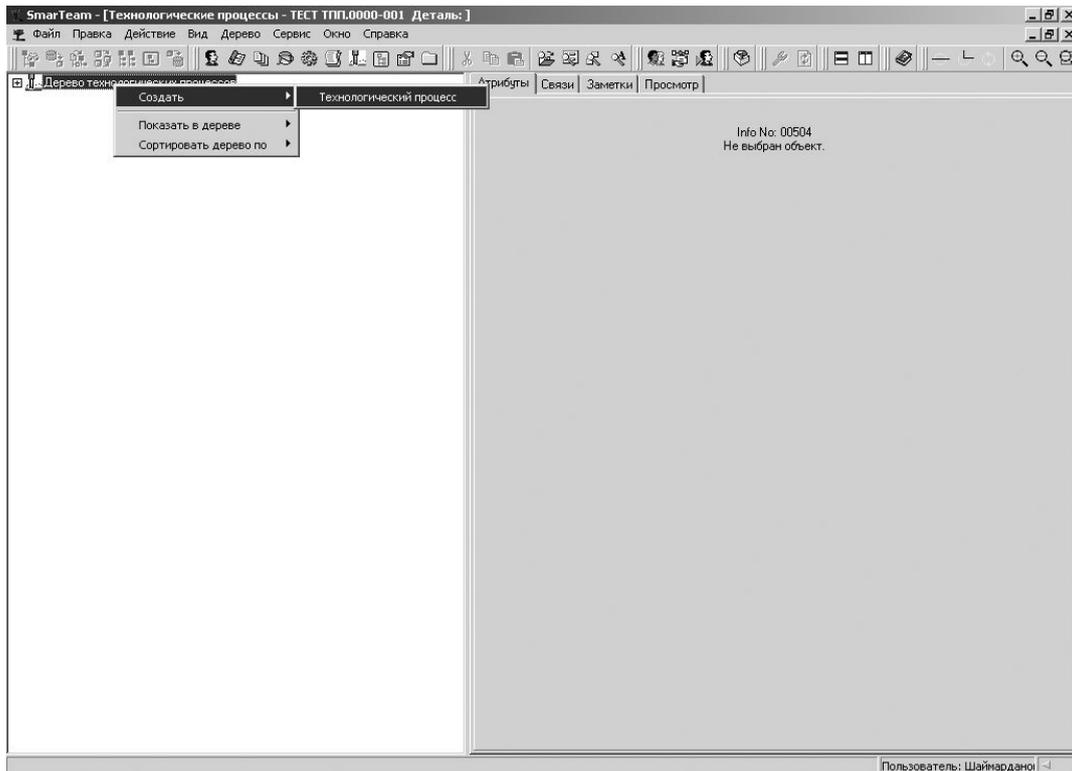


Рис. 8 Создание техпроцесса

На рис. 7,8 показан процесс создания ТП. На рис. 7 показан переход на вкладку класс "Технологические процессы", для этого была произведена модификация структуры БД и добавлен новый класс. На рис. 8 показано создание ТП в древе ТП, эта операция связана с вызовом программы, с помощью которой проводилась интеграция.

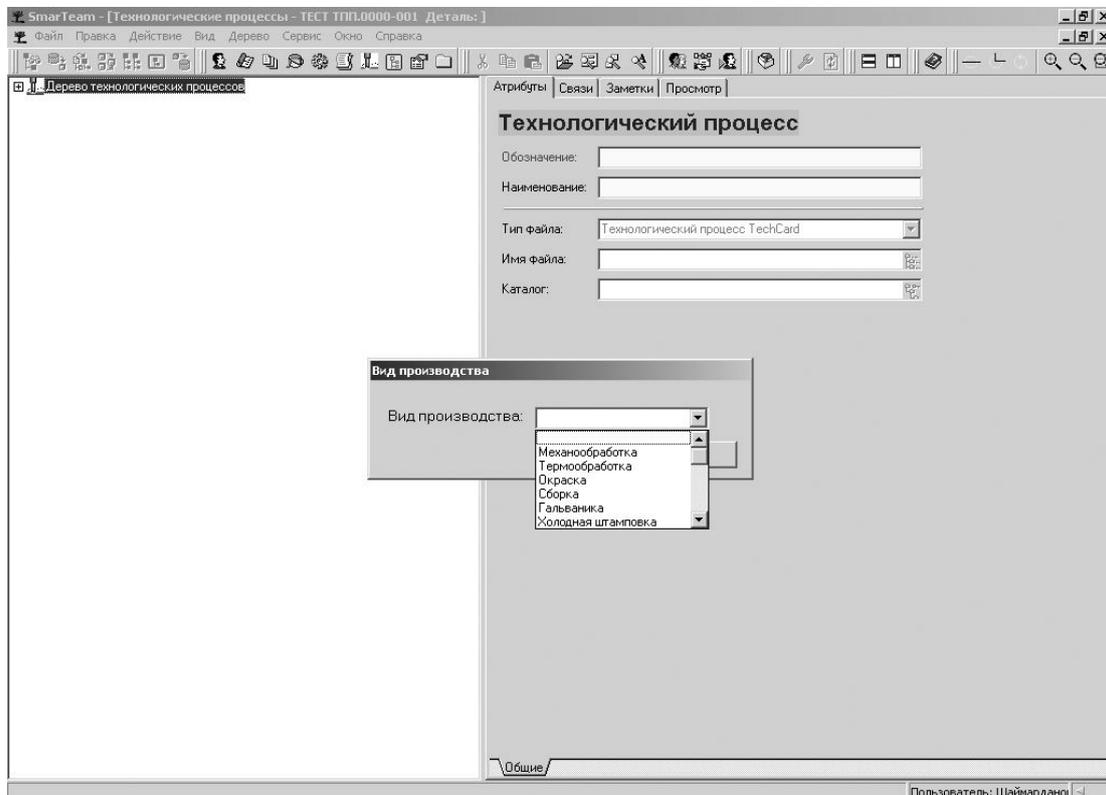


Рис. 9. Выбор вида производства

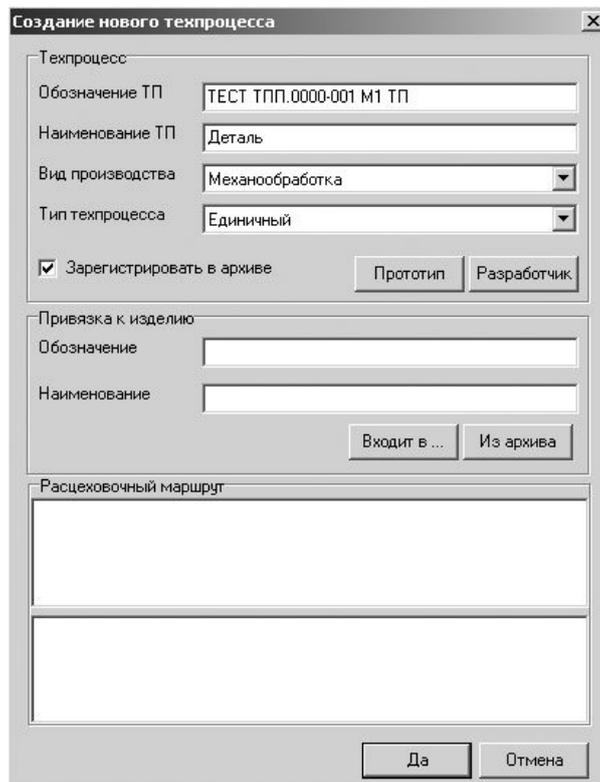


Рис. 10. Регистрация в TechCard

3.3. Интеграция CAD SolidWorks с системой проектирования ТП TechCard

Эта задача оказалась одной из самых сложных, так как пришлось много переписываться с разработчиками TechCard и использовать API Windows. Связываться с разработчиками было необходимо, потому что в TechCard предусмотрена интеграция только для создания эскизов в AutoCad, так что нужно было полностью переписать модуль взаимодействия с внешним CAD приложением (SolidWorks). Для записи данных в TechCard пришлось вписывать данные через API Windows прямо в формы. Последовательность работы иллюстрируется рис. 11–13.

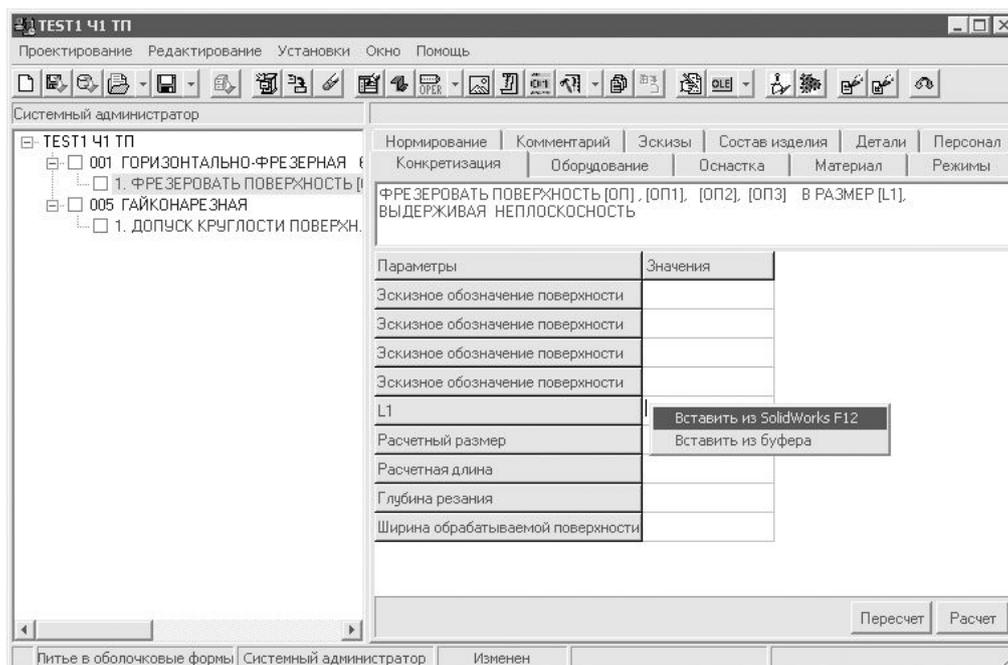


Рис. 11 Модификация контекстного меню средствами Api Windows

На рис. 11 представлено контекстное меню, которое подменило стандартный диалог Windows.

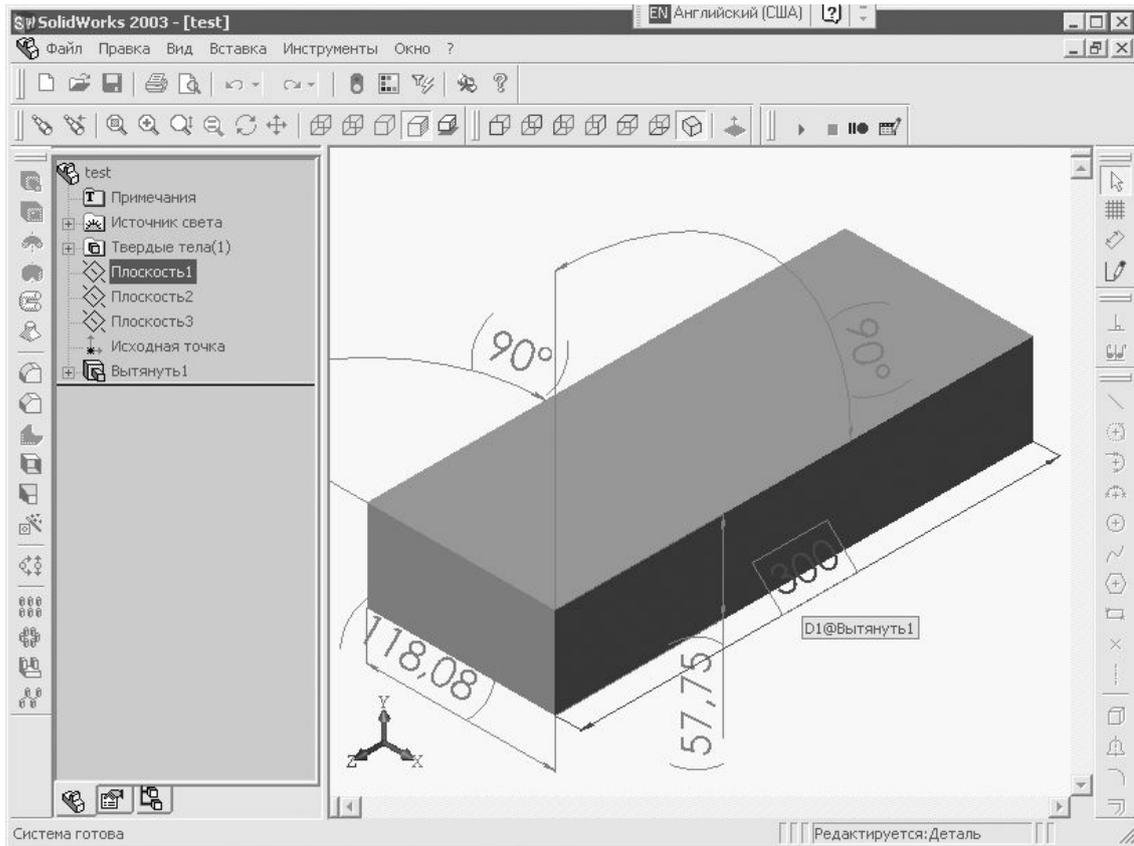


Рис. 12 Выбор размера в модели

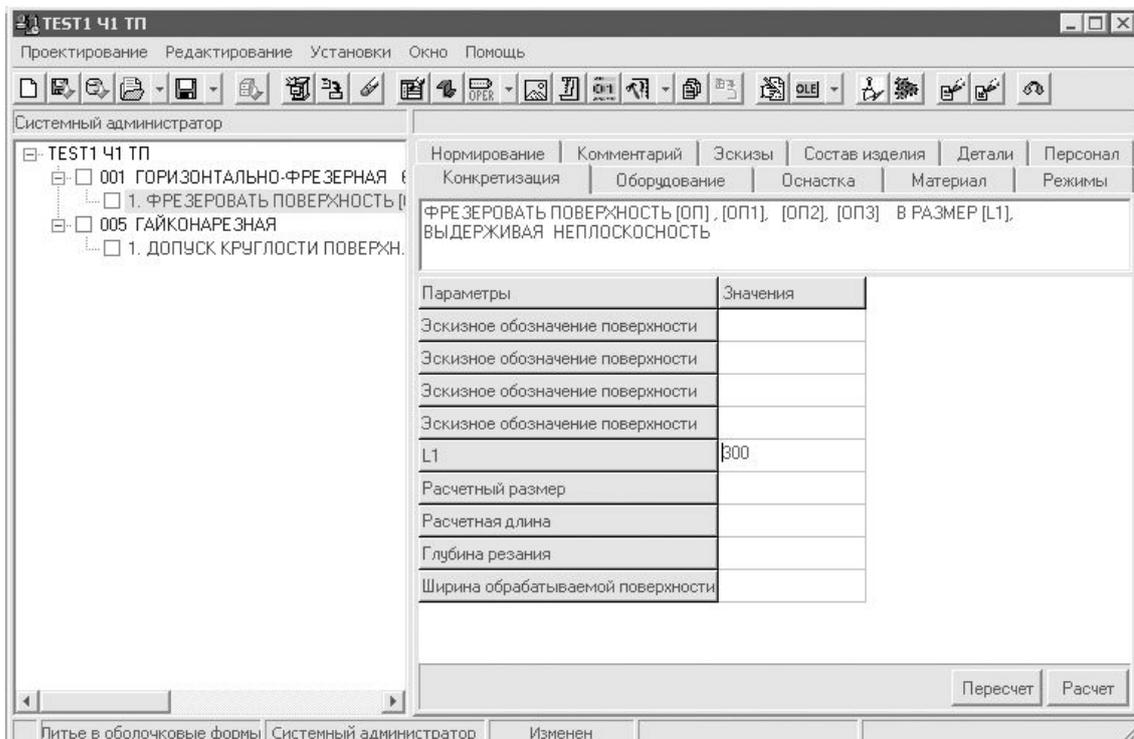


Рис.13 Вставка размера в TechCard

Заключение

В статье была показана часть проводимых на машиностроительном заводе "Арсенал" работ по внедрению PDM/PLM системы и ее интеграции с другими программными продуктами – в частности, проводимой автором интеграции с системой проектирования технологических процессов, а также связанный с этим реинжиниринг бизнес процессов. Работа была проведена с использованием инструментальной среды Borland C++ Builder. Результаты данной работы были успешно внедрены на ОАО МЗ "Арсенал".

Литература

1. Демченко В.С., Евдокимов А.А., Кучерявых В.М., Музычук И.А., Новиков К.А., Сироткин Я.А. Некоторые вопросы адаптации PDM-системы на машиностроительном предприятии. // Инновации в науке, образовании и производстве. Сб. трудов СПбГТУ под редакцией В.Г. Колосова, И.Л. Туккеля. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. С.92–100.
2. Евдокимов А.А., Королев С.Б., Музычук И.А., Сироткин Я.А. Управление объектами и ресурсами в среде CAD/CAM/CAE/PDM-систем и ее интеграция с ERP-системой. // Инновации в науке, образовании и производстве. Труды СПбГПУ №484 / Под редакцией В.Г. Колосова, И.Л. Туккеля. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002. С.99–109.
3. Королев С.Б., Кучерявых В.М., Музычук И.А., Сопов М.В. 9 с половиной идей. // САПР и графика. 2003. №4.
4. Кучерявых В.М., Музычук И.А., Сопов М.В. "Электронный инженер" - мифы и реальность. Сквозное наследование в ИТ-продуктах. // Компьютер-Информ. Санкт-Петербурог - Северо-Запад, №11(150).
5. Кучерявых В.М., Музычук И.А., Сопов М.В. Интеграция приложений в среде управления инженерными данными SmarTeam и психология пользователя. // Инновации в науке, образовании и производстве. Сб. трудов СПбГТУ под редакцией В.Г. Колосова, И.Л. Туккеля. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2003.

СИНТЕЗ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНО-СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ

Р.В. Ильенков

Научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун

Обоснована актуальность автоматизации проектирования технологической системы адаптивно-селективной сборки. Рассмотрена возможность автоматизации проектирования адаптивно-селективной сборки на основе анализа и синтеза функционально-целевых структур ГПС сборки.

Введение

В настоящее время в серийном производстве находит применение метод адаптивно-селективной сборки (АСС) [1], в котором введена обратная связь от сборочной установки к объекту производства деталей, позволяющая управлять стохастическим характером получения размеров деталей. АСС позволяет понизить незавершенное производство и применить методы селективной сборки при серийности ниже массовой. Реализация метода АСС требует применения (а зачастую и разработки) прецизионных измерительных и контрольных средств, сложных накопительных устройств, вычислительной техники. Подобные системы сборки характеризуются высокой стоимостью и сложностью, а их проектирование – сложностью и многовариантностью решений. Автоматизация проектирования АСС повысит качество проектных решений, уменьшит время и трудоемкость разработки.

Синтез технологической системы АСС

Для проектирования технологической системы АСС необходимо разработать теоретические и практические положения анализа и синтеза. В настоящее время перспективны две формы организации ГПС сборки – автоматизированные рабочие места (мини-ГПС) и гибкие автоматизированные цеха (макси-ГПС) [2]. Далее рассматривается первая форма организации ГПС сборки – адаптивно-селективные сборочные ячейки (АСС-ячейки). Современное рабочее место, представляющее собой высокоавтоматизированную сборочную ячейку (модуль или мини-ГПС), формируется по системным принципам и может рассматриваться как первичная форма организационной формы ГПС.

Целью структурного синтеза технологической системы АСС является получение функциональных, технологических, компоновочных, информационных схем, конструктивных решений, технологических маршрутов и т.п. Другой процедурой структурного синтеза является синтез технической документации, осуществляемый на стадиях технического и рабочего проектирования.

По трудности формализации структурный синтез АССЯ можно отнести к задачам второго (мощность множества вариантов структуры конечна и возможен полный перебор) или третьего (мощность множества вариантов структуры конечна, но полный перебор невозможен) уровней сложности.

Формализация процедур структурного синтеза осуществляется путем формализации знаний с помощью теории фреймов. Декларативной частью знаний о структуре АССЯ служат базовые элементы и макроэлементы сети фреймов, а процедурной частью – правила синтеза законченной структуры из элементов сети.

Функционально-целевые структуры ГПС

Выделение функционально-целевых структур ГПС позволяет решать две взаимосвязанные группы задач: формирование оценок технического уровня и разработку методов структурного синтеза [2].

По функционально-целевому назначению структуры ГПС можно разделить на две основные группы: производственно-технологические (ПТС) и организационно-технические (ОТС). Производственно-технологические, в свою очередь, делятся на технологические (ТС) и производственные (ПС), а организационно-технические – на компоновочные (КС) и информационно-управляющие (ИУС).

ТС характеризуют совокупность реализуемых технологических маршрутов, т.е. составы и последовательности (связи) технологических операций; ПС – состав (номенклатуру) основного технологического оборудования и его количество, которое зависит от программы выпуска и производительности; КС – состав транспортного оборудования, взаиморасположение и взаимосвязь основного и транспортного оборудования; ИУС – состав и взаимосвязи устройств управления и переработки информации.

Если названные структуры представить в виде ориентированных графов, то значения вершин и ребер можно представить в виде табл.1.

граф	вершины	ребра
технологический	технологические операции	последовательность выполнения технологических операций
производственный	станки	потоки обрабатываемых деталей (гипотетические)
производственно-технологический	станки, выполняющие операции	
компоновочный	элементы основного и вспомогательного оборудования	транспортные связи в ГПС
информационно-управляющий	элементы и устройства управления и переработки информации	потоки управляющей, контрольно-диагностической информации
организационно-технический	распределение потоков управляющей и контрольно-диагностической информации по элементам основного и вспомогательного оборудования	

Таблица 1. Функционально-целевые графы

Синтез технологической структуры

Исходной информацией для синтеза технологического процесса сборки является технологическая модель сборочного узла (ТМСУ). ТМСУ вводится в процессе диалога с технологом. Вводятся технологическая схема сборки, параметры структурных элементов узла, ограничения и требования на сопряжения и т.д. Вспомогательные сборочные операции определяются на основании информации о сопряжениях структурных элементов узла, либо (отсутствующие) вводятся в диалог.

Укрупненно технологический граф (ТГ) адаптивно-селективного сборочного процесса можно представлен на рис. 1.

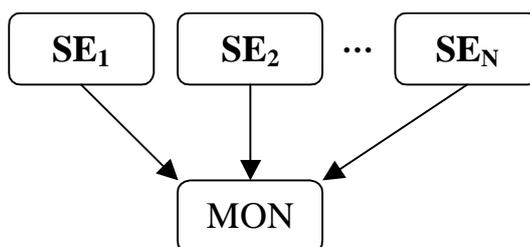


Рис. 1. Технологический граф АСС

Вершинами здесь являются совокупности технологических операций сборки, связанные с выдачей структурных элементов узла, собираемого методом селективной сборки ($SE_1 - SE_N$), или с формированием сборочных комплектов и осуществления собственно операций сопряжения и закрепления (MON). Ребрами графа являются операции транспортирования структурных элементов к сборочной установке.

В зависимости от выбора способа выдачи структурных элементов и осуществления узловой под сборки вершины укрупненного графа заменяются соответствующими подграфами, варианты которых, представлены на рис. 2–6.

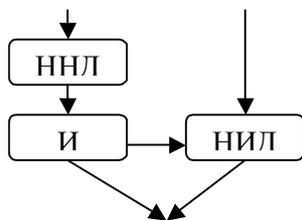


Рис. 2. Общий случай подграфа SE: БД или ПД с ПН и ННД

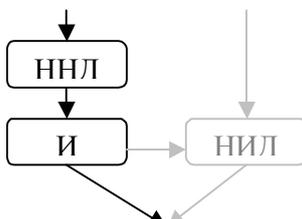


Рис. 3. Частный случай: БД без ПН с ННД

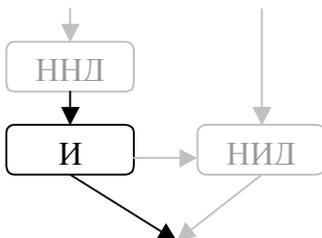


Рис. 4. Частный случай: БД без ПН и без ННД

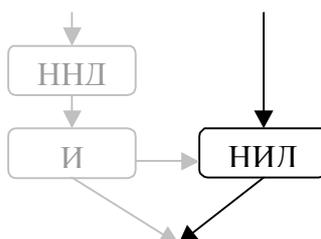


Рис. 5. Предварительное измерение БД или ПД

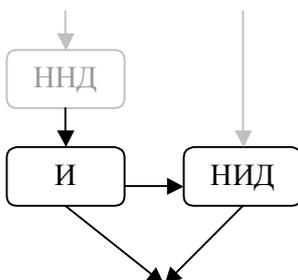


Рис. 6. БД или ПД с ПН и без ННД

Здесь ННД – это операции, связанные с накоплением неизмеренных деталей, И – измерение деталей, НИД – накопление измеренных деталей, БД – базовая деталь, ПД – присоединяемая деталь, ПН – промежуточный накопитель.

На накопление в неизмеренном и измеренном виде могут подаваться неориентированные детали. На измерение и в промежуточный накопитель подаются предварительно или окончательно ориентированные детали, на сборку – исключительно окончательно ориентированные детали.

Синтез производственно-технологического графа (ПТГ) состоит в сопоставлении вершинам технологического графа (основным и вспомогательным технологическим сборочным операциям) оборудования, осуществляющего эти операции. Различные варианты ПТГ получаются вследствие выбора различных вариантов ТГ (различные способы выемки структурных элементов) и комбинаций связей сопоставления операций единицам оборудования (включая агрегирование операций). Так, накопление неизмеренных деталей может осуществляться в магазинах, бункерах, кассетах и т.д. либо совмещаться с процессами перемещения поворотными столами или конвейерами. Накопление измеренных деталей происходит в кассетах с сохранением информации о деталях в запоминающих устройствах (ЗУ), бункерах с физическим разделением на селективные группы, ЗУ на спутниках и т.д. Перемещение деталей может осуществляться с помощью РТК, лотков, конвейера, поворотного стола, вручную. При этом можно сопоставлять одной единице оборудования несколько различных операций. Например, РТК или ручное перемещение может осуществлять предварительную или окончательную ориентацию, поворотный стол – перемещение и накопление как неизмеренных, так и измеренных деталей, а РТК и поворотный стол – перемещение деталей к ННД, НИД, измерительной и сборочной установкам.

Множество вариантов ТС получается в результате синтеза всех вариантов организации технологических модулей выдачи структурных элементов.

Множество вариантов ПТС получается в результате синтеза для каждого варианта ТС всех вариантов выбора оборудования, осуществляющего операции. Сперва для каждой операции находится оборудование, способное ее осуществить с учетом наложенных ограничений. Затем находятся все варианты покрытия операций агрегатами, способными выполнять несколько операций и т.д.

Компоновочная структура

Тип КС устанавливается в зависимости от серийности производства, в котором будет использоваться проектируемая ГПС сборки, и принципа межоперационного транспортирования. КС ГПС для мелкосерийного производства строятся по принципу межоперационного транспортирования деталей "станок-склад-станок" и делятся на централизованные и децентрализованные. Преимущественным правилом построения ГПС мелкосерийного производства является сочетание централизованного склада-накопителя с пристаночными накопителями ограниченной емкости.

КС ГПС для крупносерийного производства строятся по принципу межоперационного транспортирования деталей "станок-станок" и подразделяются:

по типу межстаночной связи:

- с непосредственной связью;
- с межстаночными накопителями.

по способу базирования и транспортирования:

- спутниковые;
- беспутниковые.

и т.д.

Конфигурации транспортных маршрутов могут быть: линейными, замкнутыми, сетевыми, реверсивными, параллельными, комбинированными.

При проектировании КС, как правило, руководствуются стремлением минимизировать три основных параметра: время простоев в ожидании обслуживания, транспортные перемещения и размеры занимаемой производственной площади.

Так как маршруты перемещения деталей в АСС-ячейке заданы технологической схемой сборки и постоянны, то синтез КС технологической системы АСС заключается в выборе количества технологических модулей выдачи структурных элементов, сборочных установок, организации транспортно-складской системы.

Информационно-управляющая структура

ИУС адаптивно-селективной сборки представляет собой структуру АСУ ГПС, т.е. состав устройств управления, выдачи и переработки информации и конфигурацию связей между ними. В структуре системы управления можно выделить три типа элементов [3]:

- элементы первого типа – комплекс технических средств, предназначенный для реализации задач управления ГПС; к этому типу элементов относятся управляющие вычислительные комплексы, измерительные устройства;
- элементы второго типа – средства передачи данных между ПТС и ОТС, представляющие сетевой интерфейс;
- элементы третьего типа – организационное, информационное, алгоритмическое и программное обеспечения задач управления.

Синтез ИУС заключается в выборе средств, осуществляющих основные задачи управления АСС-ячейки. Этими задачами являются:

- управление перемещением неизмеренных и измеренных деталей;
- управлением промежуточным накопителем;
- определение границ групп допусков для распределения размеров измеренных деталей;
- осуществление обратной связи на оборудование изготовления деталей;
- обмен информацией между технологическими модулями выдачи структурных элементов;
- накопление и обработка статистики;
- сохранение информации об измеренных деталях.

Для всех технологических модулей выдачи структурных элементов выбираются средства управления и программное обеспечение для РТК, осуществляющего перемещение деталей; измерительной установки, измеряющей требуемые параметры детали и передающей информацию на спутник детали или другие технологические модули. При наличии промежуточного накопителя выбираются средства управления и программное обеспечение, осуществляющие накопление деталей с сохранением информации о размере или номере группы допуска, выдачу деталей требуемой группы допуска, оптимальную стратегию управления накоплением деталей различных номеров групп допуска.

Выбирается управляющий вычислительный комплекс для сборочной установки, контрольно-диагностической системы. Выбирается вычислительный комплекс, осуществляющий накопление и переработку информации о размерах деталей, производящий определение границ групп допусков, осуществляющий обратную связь на оборудование изготовления деталей.

Состав модулей программного обеспечения определяется функциями, решаемыми на тех или иных вычислительных комплексах.

Заключение

Проектирование технологической системы АСС на основе синтеза функционально-целевых структур и ее анализ позволит повысить качество и снизить стоимость про-

ектных решений, уменьшить время и трудоемкость проектирования, исключить уже на ранних этапах проектирования трудно устранимые и неустранимые впоследствии ошибки структурного синтеза, позволит оценить заранее предварительные стоимость, производительность и технологические характеристики проектируемой производственной системы сборки.

Литература

1. Qualitätssichernde Fertigungsgestaltung und –steuerung. Teil 5. Qualitätssicherung durch Adaptive und Selektive Montage. Dozent Dr.-Ing. Klaus-Peter Zoher,
2. TU-Ilmenau, 1995;
3. Лищинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения: Справочник – М.: Машиностроение, 1995.

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЕМ ВОЗДУХ/ТОПЛИВО В ИНЖЕКТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.Н. Герасимов, С.А. Мигуш

Научный руководитель: – дт.н., проф. В.О. Никифоров

Исследуется задача оптимизации работы двигателя внутреннего сгорания. Получен алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания и произведен анализ его свойств. Произведено моделирование системы, экспериментально подтвердившее выводы, полученные аналитическим путем.

Введение

В настоящее время все ведущие мировые автопроизводители разрабатывают способы снижения расхода топлива, повышения мощности двигателя, увеличения его КПД и снижения количества вредных выбросов в атмосферу путем оптимизации параметров работы ДВС. Современный уровень развития теории автоматического управления позволяет успешно решать задачи такого типа с помощью методов адаптивного и оптимального управления.

Одной из важнейших характеристик работы двигателя, влияющих на вышеперечисленные показатели, является соотношение воздух/топливо. Известно, что для полного сгорания 1кг бензина необходимо 14.7 кг воздуха (так называемое стехиометрическое соотношение) [2]. В инженерной практике и автомобилестроении получил распространение коэффициент избытка воздуха, показывающий отклонение реального соотношения воздух/топливо от идеального (λ -коэффициент) [2]. Оптимальные показатели работы двигателя достигаются при $\lambda=1$, таким образом, регулирование соотношения воздух/топливо и стабилизация λ являются важнейшими задачами при управлении инжекторным двигателем внутреннего сгорания.

В связи с отсутствием точного аналитического описания ДВС, сильной зависимости характеристик и параметров работы системы от режима и условий работы двигателя, целесообразным представляется применение алгоритмов адаптивного управления. В ряде работ решена задача управления соотношением воздух/топливо с использованием методов адаптации [7-11]. Однако, во всех этих работах используются методы идентификационного адаптивного управления, то есть управления, основанного на идентификации неизвестных параметров объекта. Данный метод имеет ряд существенных недостатков.

1. Качество управления напрямую зависит от параметрической сходимости, которая, в свою очередь, зависит от свойств возбуждающих входных сигналов. Идентифицируемый сигнал должен обладать некоторыми определенными качествами, например, частотным богатством, что не всегда достижимо на практике.

2. Алгоритмы управления и идентификации имеют разные цели, что неизбежно ведет к внутренним рассогласованиям в системе.

3. На идентификацию параметров затрачивается дополнительное время, что недопустимо в системах повышенного быстродействия, каковой является система управления ДВС.

В данной работе предлагается метод прямого адаптивного управления соотношением воздух/топливо, лишенный вышеуказанных недостатков.

Постановка задачи

Часть распыляемого форсункой топлива осаждается на стенках впускного коллектора, образуя пленку [7,8]. Эта пленка накапливает и поставляет топливо в цилиндр в результате процесса испарения. Таким образом, в цилиндр попадает топливо из двух

источников: впрыснутое форсункой и испаренное со стенок коллектора. Точной аналитической модели, описывающей данный процесс, не существует. Однако, экспериментальные данные показывают, что его можно описать следующей моделью:

$$\mu_{fc} = \frac{K}{Tp + 1}u + (1 - K)u, \quad (1)$$

где K – коэффициент, показывающий, какая часть распыляемого топлива осаждается в пленку ($0 < K < 1$); u – количество топлива, распыляемого форсункой, [кг/с]; T – постоянная времени процесса осаждения топлива, [с]; p – оператор дифференцирования.

С учетом (1), модель, описывающая динамику формирования соотношения воздух/топливо может быть представлена в виде [1]:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{1}{T}x + Ku, & (2) \\ y = v(t)(x + du), & (3) \end{cases}$$

где x – масса топливной пленки, образующейся на стенках цилиндра, управление u – масса впрыснутого в цилиндр топлива, $v(t) = C/(P_m \omega)$ – измеряемый сигнал, C – известный коэффициент, $a = 1/T$, $b = K/T$, $d = (1 - K)$ неизвестные коэффициенты. Задачей управления принимается стабилизация выходной переменной y на единичном уровне, т.е. поддержание оптимального соотношения воздух/топливо.

Наблюдатель массы топливной пленки

Для оценки неизмеряемой переменной состояния x вводится наблюдатель

$$\dot{\xi}_1 = -\xi_1 + \frac{1}{v(t)}y, \quad (4)$$

$$\dot{\xi}_2 = -\xi_2 + u. \quad (5)$$

В этом случае состояния x может быть представлена в форме

$$x = \psi_1 \xi_1 + \psi_2 \xi_2 + \sigma, \quad (6a)$$

где неизвестные параметры ψ_1 и ψ_2 находятся из уравнений

$$\psi_1 = 1 - a, \quad \psi_2 = b + d(a - 1), \quad (7a)$$

а экспоненциально затухающая функция времени σ подчиняется дифференциальному уравнению

$$\dot{\sigma} = -\sigma.$$

Для доказательства параметризации (6a), (7a), введем оценку ошибки

$$\sigma = x - \psi_1 \xi_1 - \psi_2 \xi_2$$

и продифференцируем последнее выражение с учетом (4) и (5):

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \dot{x} - \psi_1 \dot{\xi}_1 - \psi_2 \dot{\xi}_2 = -ax + Ku - \psi_1 \left(-\xi_1 + \frac{1}{v(t)}v(t)(x + du) \right) - \psi_2(-\xi_2 + u) = \\ &= Ku + \xi_1 - du - x - a\xi_1 + adu + b\xi_2 - bu + ad\xi_2 - d\xi_2 - adu + du = -\sigma. \end{aligned}$$

Модель ошибки и настраиваемый регулятор

Введем ошибку управления

$$e = 1 - y, \quad (8)$$

и, с учетом параметризации (6), (7), можно получить следующую модель ошибки

$$e = d(\omega(t)^T \theta - vu), \quad (9)$$

где $\theta^T = [1/d - \psi_1/d - \psi_2/d]$ – вектор неизвестных параметров, $\omega^T = [1 \ v\xi_1 \ v\xi_2]$ – вектор известных функций (регрессор). Анализ модели (9) мотивирует следующий выбор настраиваемого регулятора:

$$u = \frac{1}{v} \omega(t)^T \theta(t), \quad (10)$$

где $\theta(t)$ – вектор настраиваемых параметров, вырабатываемых алгоритмом адаптации. Подставляя (10) в (9), получаем следующую замкнутую модель ошибки

$$e = d\omega^T(t)\tilde{\theta}^T(t), \quad (11)$$

где $\tilde{\theta}(t) = \theta - \theta(t)$ – параметрическая ошибка.

Алгоритм адаптации

Модель (11) хорошо известна в теории адаптивного управления [3,4]. Алгоритм адаптации данной модели имеет вид:

$$\dot{\theta} = \gamma \omega e, \quad (12)$$

где $\gamma > 0$ коэффициент адаптации. Свойства устойчивости данного алгоритма могут быть доказаны с помощью функций Ляпунова вида

$$V = \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta}.$$

Вычисляя ее производную по времени в силу уравнений (11) и (12), получим

$$\dot{V}(\tilde{\theta}) = \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} = -\frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^T \dot{\theta} = -\tilde{\theta}^T d\omega e = -de^2 \leq 0,$$

откуда следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $\tilde{\theta} = 0$ и выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. Расширяя (12), получаем модель параметрических ошибок.

$$\dot{\tilde{\theta}} = -d\gamma \bar{P}(t)\tilde{\theta},$$

где

$$\bar{P}(t) = \omega(t)\omega^T(t).$$

Последняя модель может быть использована для анализа параметрической сходимости. Данный алгоритм адаптации несет в себе следующий физический смысл: он представляет собой градиентную минимизацию мгновенной квадратичной ошибки.

Закон управления (10), (12) обладает следующими свойствами:

- 1) все сигналы обратной связи являются ограниченными;
- 2) $e(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$;
- 3) Если регрессор $\omega(t)$ удовлетворяет требованию незатухающего возбуждения, то $\tilde{\theta}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Результаты моделирования

Свойства полученного алгоритма адаптивного управления были исследованы в среде моделирования MATLAB. Ниже представлены результаты моделирования.

α , град .

λ .

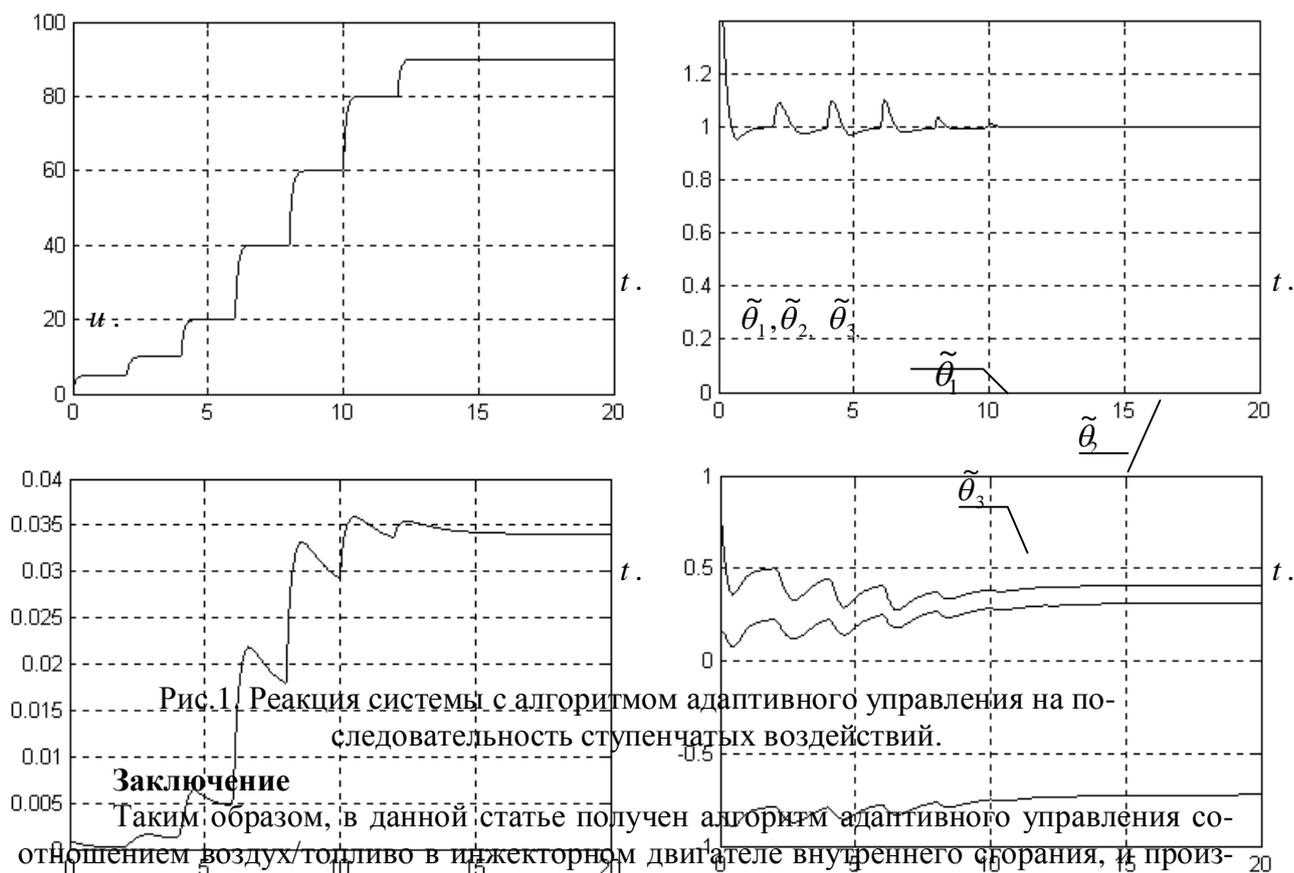


Рис.1. Реакция системы с алгоритмом адаптивного управления на последовательность ступенчатых воздействий.

Заключение

Таким образом, в данной статье получен алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания, и произведен анализ его свойств. Кроме того, произведено моделирование системы, экспериментально подтвердившее выводы, полученные аналитическим путем.

Список литературы

1. Герасимов Д.Н, Мигуш С.А., Никифоров В.О., Математическая модель инжекторного двигателя. Сборник трудов XXXII научной и учебно-методической конференции, посвященной 300-летию Санкт-Петербурга. Санкт-Петербург, 2003.
2. Ефимов А.Н., Вырубов Д.С., Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Москва, Машиностроение. 1980.
3. Никифоров В.О., Ушаков А.В., Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. Санкт-Петербург. 2003.
4. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков.А.Л, Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. Санкт-Петербург. «Наука».2003.
5. Kim Y.-W., Rizzoni G., V. Utkin Automotive engine diagnostics and control via nonlinear estimation. *IEEE Control Systems*, 1998.
6. Simons M.R., Locatelli M., Onder C.H., Geering H.P. A nonlinear wall-wetting model for the complete operating region of a sequential fuel injected SI engine. *SAE paper* No. 1260, 2000, pp. 1–10.
7. Turin R.C., Geering H.P. On-line identification of air-to-fuel ratio dynamics in a sequentially injected SI engine. *SAE paper* No. 930857
8. Turin R.C., Geering H. Model-based adaptive fuel control in an SI engine. *SAE paper* No. 940374.
9. Tseng T.-C., Cheng W.K. An adaptive air/fuel controller for SI Engine throttle transients. *SAE paper* No. 1999-01-0552.
10. Glielmo L., Cristofaro F., Giuseppe C., Caraceni A. An algorithm for the calibration of wall-wetting model parameters. *SAE paper* No. 2003-01-1054
11. Arie I., Pianese C., Rizzo G., Cioffi V. An adaptive estimator of fuel film dynamics in the intake port of a spark ignition engine. 2003.

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЕМ ВОЗДУХ/ТОПЛИВО В ИНЖЕКТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.Н. Герасимов, С.А. Мигуш

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.О. Никифоров

Исследуется задача оптимизации работы двигателя внутреннего сгорания. Получен алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания и произведен анализ его свойств. Произведено моделирование системы, экспериментально подтвердившее выводы, полученные аналитическим путем.

Введение

В настоящее время все ведущие мировые автопроизводители разрабатывают способы снижения расхода топлива, повышения мощности двигателя, увеличения его КПД и снижения количества вредных выбросов в атмосферу путем оптимизации параметров работы ДВС. Современный уровень развития теории автоматического управления позволяет успешно решать задачи такого типа с помощью методов адаптивного и оптимального управления.

Одной из важнейших характеристик работы двигателя, влияющих на вышеперечисленные показатели, является соотношение воздух/топливо. Известно, что для полного сгорания 1 Кг бензина необходимо 14.7 Кг воздуха (так называемое стехиометрическое соотношение) [2]. В инженерной практике и автомобилестроении получил распространение коэффициент избытка воздуха, показывающий отклонение реального соотношения воздух/топливо от идеального (λ – коэффициент) [2]. Оптимальные показатели работы двигателя достигаются при $\lambda=1$, таким образом, регулирование соотношения воздух/топливо и стабилизация λ являются важнейшими задачами при управлении инжекторным двигателем внутреннего сгорания.

В связи с отсутствием точного аналитического описания ДВС, а также сильной зависимостью характеристик и параметров работы системы от режима и условий работы двигателя целесообразным представляется применение алгоритмов адаптивного управления. В ряде работ решена задача управления соотношением воздух/топливо с использованием методов адаптации [7–11]. Однако во всех этих работах используются методы идентификационного адаптивного управления, т.е. управления, основанного на идентификации неизвестных параметров объекта. Данный метод имеет ряд существенных недостатков.

- Качество управления напрямую зависит от параметрической сходимости, которая, в свою очередь, зависит от свойств возбуждающих входных сигналов. Идентифицируемый сигнал должен обладать некоторыми определенными качествами, например, частотным богатством, что не всегда достижимо на практике.
- Алгоритмы управления и идентификации имеют разные цели, что неизбежно ведет к внутренним рассогласованиям в системе.
- На идентификацию параметров затрачивается дополнительное время, что недопустимо в системах повышенного быстродействия, каковой является система управления ДВС.

В данной работе предлагается метод прямого адаптивного управления соотношением воздух/топливо, лишенный вышеуказанных недостатков.

Постановка задачи

Часть распыляемого форсункой топлива осажается на стенках впускного коллектора, образуя пленку [7,8]. Эта пленка накапливает и поставляет топливо в цилиндр в

результате процесса испарения. Таким образом, в цилиндр попадает топливо из двух источников: впрыснутое форсункой и испаренное со стенок коллектора. Точной аналитической модели, описывающей данный процесс, не существует. Однако экспериментальные данные показывают, что его можно описать следующей моделью:

$$\mu_{fc} = \frac{K}{Tp+1}u + (1-K)u, \quad (1)$$

где K – коэффициент, показывающий, какая часть распыляемого топлива осаждается в пленку ($0 < K < 1$); u – количество топлива, распыляемого форсункой, [Кг/с]; T – постоянная времени процесса осаждения топлива, [с]; p – оператор дифференцирования.

С учетом (1) модель, описывающая динамику формирования соотношения воздух/топливо, может быть представлена в виде [1]:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{1}{T}x + Ku, & (2) \\ y = v(t)(x + du), & (3) \end{cases}$$

где x – масса топливной пленки, образующейся на стенках цилиндра, управление u – масса впрыснутого в цилиндр топлива, $v(t) = C/(P_m \omega)$ – измеряемый сигнал, C – известный коэффициент, а $a = 1/T$, $b = K/T$, $d = (1-K)$ – неизвестные коэффициенты. Задачей управления принимается стабилизация выходной переменной y на единичном уровне, т.е. поддержание оптимального соотношения воздух/топливо.

Наблюдатель массы топливной пленки

Для оценки неизмеряемой переменной состояния x вводится наблюдатель

$$\dot{\xi}_1 = -\xi_1 + \frac{1}{v(t)}y, \quad (4)$$

$$\dot{\xi}_2 = -\xi_2 + u. \quad (5)$$

В этом случае состояние x может быть представлено в форме

$$x = \psi_1 \xi_1 + \psi_2 \xi_2 + \sigma, \quad (6a)$$

где неизвестные параметры ψ_1 и ψ_2 находятся из уравнений

$$\psi_1 = 1 - a, \quad \psi_2 = b + d(a - 1), \quad (7a)$$

а экспоненциально затухающая функция времени σ подчиняется дифференциальному уравнению

$$\dot{\sigma} = -\sigma.$$

Для доказательства параметризации (6a), (7a), введем оценку ошибки

$$\sigma = x - \psi_1 \xi_1 - \psi_2 \xi_2$$

и продифференцируем последнее выражение с учетом (4) и (5):

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \dot{x} - \psi_1 \dot{\xi}_1 - \psi_2 \dot{\xi}_2 = -ax + Ku - \psi_1 \left(-\xi_1 + \frac{1}{v(t)}v(t)(x + du) \right) - \psi_2(-\xi_2 + u) = \\ &= Ku + \xi_1 - du - x - a\xi_1 + adu + b\xi_2 - bu + ad\xi_2 - d\xi_2 - adu + du = -\sigma. \end{aligned}$$

Модель ошибки и настраиваемый регулятор

Введем ошибку управления

$$e = 1 - y, \quad (8)$$

и, с учетом параметризации (6), (7), можно получить следующую модель ошибки

$$e = d(\omega(t)^T \theta - vu), \quad (9)$$

где $\theta^T = [1/d - \psi_1/d - \psi_2/d]$ – вектор неизвестных параметров, $\omega^T = [1 \ v\xi_1 \ v\xi_2]$ – вектор известных функций (регрессор). Анализ модели (9) мотивирует следующий выбор настраиваемого регулятора:

$$u = \frac{1}{v} \omega(t)^T \bar{\theta}(t), \quad (10)$$

где $\bar{\theta}(t)$ – вектор настраиваемых параметров, вырабатываемых алгоритмом адаптации. Подставляя (10) в (9), получаем следующую замкнутую модель ошибки:

$$e = d\omega^T(t)\tilde{\theta}^T(t), \quad (11)$$

где $\tilde{\theta}(t) = \theta - \bar{\theta}(t)$ – параметрическая ошибка.

Алгоритм адаптации

Модель (11) хорошо известна в теории адаптивного управления [3,4]. Алгоритм адаптации данной модели имеет вид

$$\dot{\bar{\theta}} = \gamma \omega e, \quad (12)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации. Свойства устойчивости данного алгоритма могут быть доказаны с помощью функций Ляпунова вида

$$V = \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta}.$$

Вычисляя ее производную по времени в силу уравнений (11) и (12), получим

$$\dot{V}(\tilde{\theta}) = \frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} = -\frac{1}{\gamma} \tilde{\theta}^T \dot{\bar{\theta}} = -\tilde{\theta}^T d\omega e = -de^2 \leq 0,$$

откуда следует устойчивость по Ляпунову состояния равновесия $\tilde{\theta} = 0$ и выполнение условия $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. Расширяя (12), получаем модель параметрических ошибок.

$$\dot{\tilde{\theta}} = -d\gamma \bar{P}(t)\tilde{\theta},$$

где

$$\bar{P}(t) = \omega(t)\omega^T(t).$$

Последняя модель может быть использована для анализа параметрической сходимости. Данный алгоритм адаптации несет в себе следующий физический смысл: он представляет собой градиентную минимизацию мгновенной квадратичной ошибки.

Закон управления (10), (12) обладает следующими свойствами:

- 1) все сигналы обратной связи являются ограниченными;
- 2) $e(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$;
- 3) Если регрессор $\omega(t)$ удовлетворяет требованию незатухающего возбуждения, то $\tilde{\theta}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Результаты моделирования

Свойства полученного алгоритма адаптивного управления были исследованы в среде моделирования MATLAB. Результаты моделирования представлены на рис. 1..

Заключение

Таким образом, в данной статье получен алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания, и произведен анализ его свойств. Кроме того, произведено моделирование системы, экспериментально подтвердившее выводы, полученные аналитическим путем.

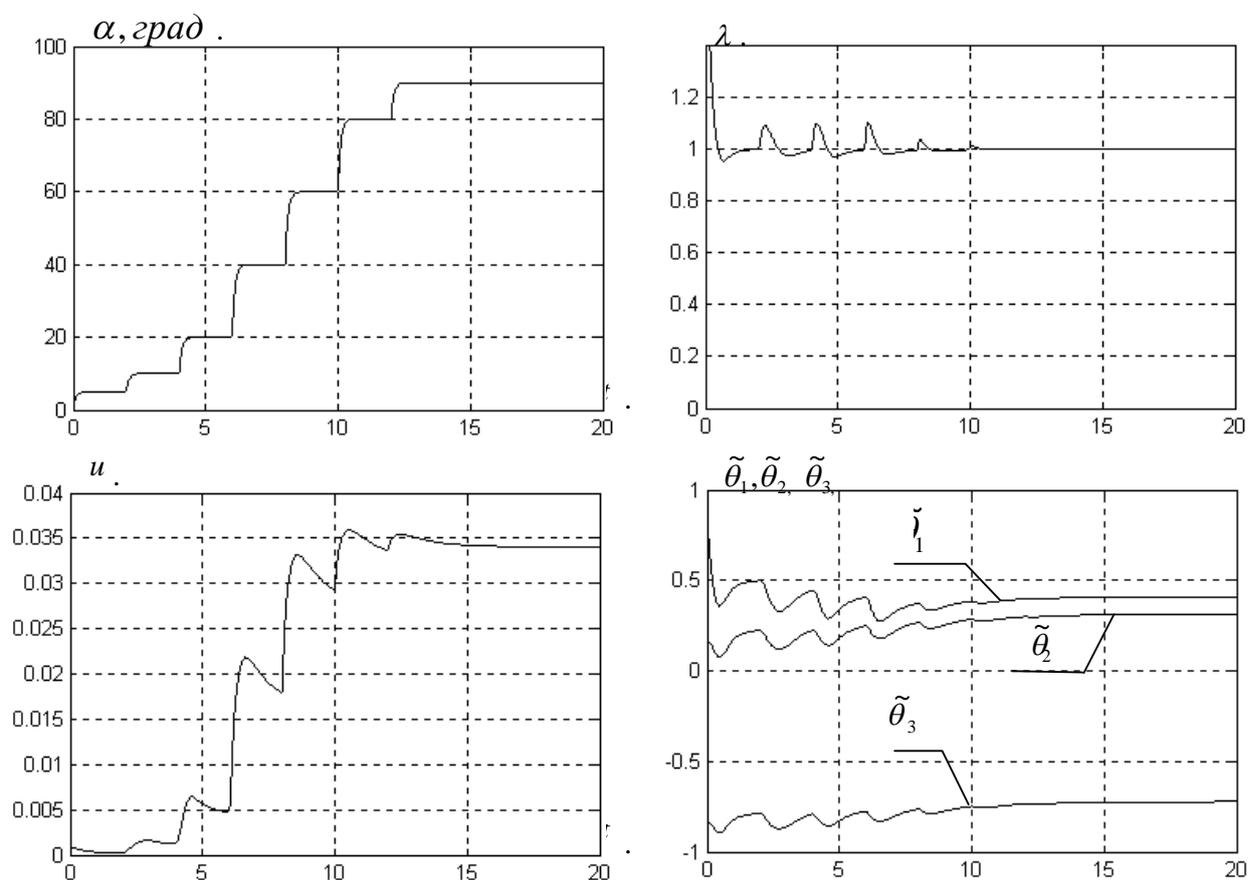


Рис. 1. Реакция системы с алгоритмом адаптивного управления на последовательность ступенчатых воздействий

Литература

1. Герасимов Д.Н, Мигуш С.А., Никифоров В.О., Математическая модель инжекторного двигателя. Сборник трудов XXXII научной и учебно-методической конференции, посвященной 300-летию Санкт-Петербурга. Санкт-Петербург, 2003.
2. Ефимов А.Н., Вырубов Д.С., Двигатели внутреннего сгорания. Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Москва, Машиностроение. 1980.
3. Никифоров В.О., Ушаков А.В., Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. Санкт-Петербург. 2003.
4. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков.А.Л, Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. Санкт-Петербург. «Наука».2003.
5. Kim Y.-W., Rizzoni G., V. Utkin Automotive engine diagnostics and control via nonlinear estimation. *IEEE Control Systems*, 1998.
6. Simons M.R., Locatelli M., Onder C.H., Geering H.P. A nonlinear wall-wetting model for the complete operating region of a sequential fuel injected SI engine. *SAE paper* No. 1260, 2000, pp. 1–10.
7. Turin R.C., Geering H.P. On-line identification of air-to-fuel ratio dynamics in a sequentially injected SI engine. *SAE paper* No. 930857
8. Turin R.C., Geering H. Model-based adaptive fuel control in an SI engine. *SAE paper* No. 940374.
9. Tseng T.-C., Cheng W.K. An adaptive air/fuel controller for SI Engine throttle transients. *SAE paper* No. 1999-01-0552.
10. Glielmo L., Cristofaro F., Giuseppe C., Caraceni A. An algorithm for the calibration of wall-wetting model parameters. *SAE paper* No. 2003-01-1054
11. Arie I., Pianese C., Rizzo G., Cioffi V. An adaptive estimator of fuel film dynamics in the intake port of a spark ignition engine. 2003.

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А.В. Аржаник

Научный руководитель – к.т.н., доц. А.В. Лямин

В работе рассматривается система технического зрения для навигации подвижного робота в среде, оборудованной специальными маяками. Описана конструкция системы технического зрения на основе фотодатчика. Вращающийся фотодатчик обеспечивает роботу круговой обзор и определение направления и расстояния до маяков. Приводится алгоритм обработки информации, поступающей с датчиков системы технического зрения.

Введение

Мобильные роботы представляют собой весьма интересный объект для исследования. В последние годы происходит роботизация буквально всех сфер человеческой деятельности. Диапазон применения робототехники чрезвычайно широк. При этом мобильные роботы представляют собой нетривиальный объект с точки зрения управления им. Среди систем адаптации роботов наибольшей информативной ёмкостью обладают системы технического зрения (СТЗ). С помощью системы технического зрения осуществляется обнаружение, распознавание или идентификация объектов, определение их местоположения и координат. Именно от ее работы во многом зависит функционирование всей системы в целом.

Робот, рассматриваемый в данной работе, представляет собой двухприводную автономную тележку, несущую все необходимые датчики и систему управления движением. Движение и управление полностью осуществляется регулировкой напряжения на двигателях. Подробное описание конструкции и системы управления робота представлено в работе [1]. С анализом и теоретическим обоснованием алгоритмов управления представленного робота можно ознакомиться в работах [2–4].

Предложенная работа посвящена исследованию возможностей системы технического зрения, представляющей собой оптическую схему с фотодатчиками, в которой круговой обзор обеспечивается вращением фотоприемников вокруг вертикальной оси, для навигации мобильного робота в среде, оборудованной специальными маяками. В момент, когда маяк оказывается в поле зрения, по сигналу, снимаемому с фотоэлемента, считываются показания датчика угла поворота – азимут маяка относительно робота. По сравнению с системами технического зрения на основе видеокамер системы с фотодатчиками обладают высокой помехозащищенностью и быстродействием, мало нагружают вычислительную систему.

Описание конструкции системы технического зрения

Среди задач управления движением робота, находящегося в среде, оборудованной специальными маяками, можно выделить несколько основных:

- наведение на маяк;
- проезд между двумя маяками;
- движение вокруг маяка.

Существенную роль в решении данных задач играет зрительная информация.

Основной задачей системы технического зрения является обнаружение активных маяков и определение их параметров: расстояния и направления. По этой информации определяются координаты и направление движение робота. Из анализа задач управления видно, что система технического зрения должна обладать способностью наблюдать за группой маяков, обновлять свои показания не менее десяти раз в секунду, определять положение маяков с точностью до $\pm 0.5^\circ$, обладать помехозащищенностью от сигналов видеокамер и фотовспышек. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет сканирующая система зрения.

Структурную схему системы технического зрения можно представить в следующем виде (рис. 1):

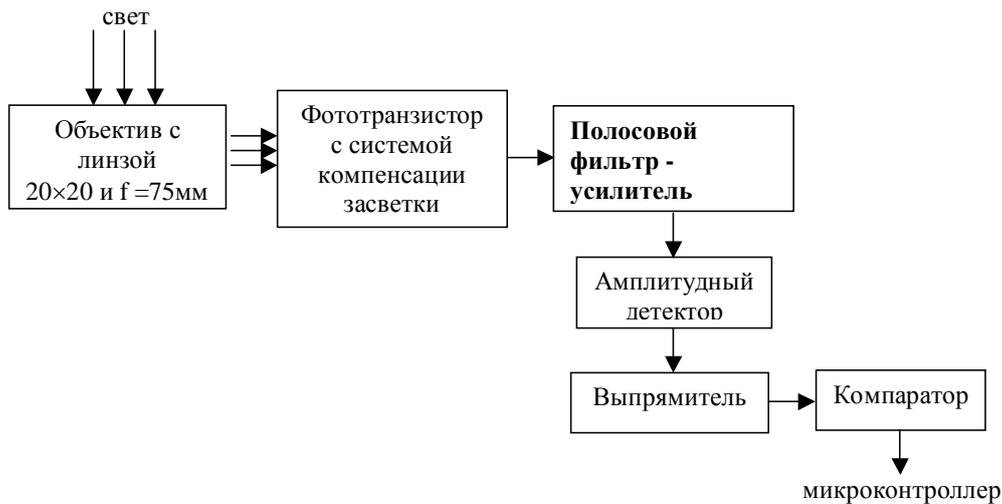


Рис. 1. Структурная схема системы технического зрения

Фотодатчик, обладающий узким углом зрения (около $\pm 0.5^\circ$) вращается с постоянной скоростью в горизонтальной плоскости и осматривает окружающее пространство, контролируя состояние маяков за один оборот. Объектив воспринимает излучение маяка и концентрирует его на фототранзисторе. Рабочий режим фототранзистора стабилизирован и мало зависит от уровня освещения и его пульсаций. Далее сигнал усиливается и фильтруется. Полоса пропускания усилителя настроена на частоту излучения маяков. Детектор выделяет значение амплитуды каждого периода сигнала. Напряжение, пропорциональное амплитуде, сравнивается с опорным в компараторе и, если оно превосходит амплитуду шума, схема дает логический сигнал о том, что виден маяк. Система является двухканальной, направления зрения расположены под углом 180° друг к другу (рис. 3).

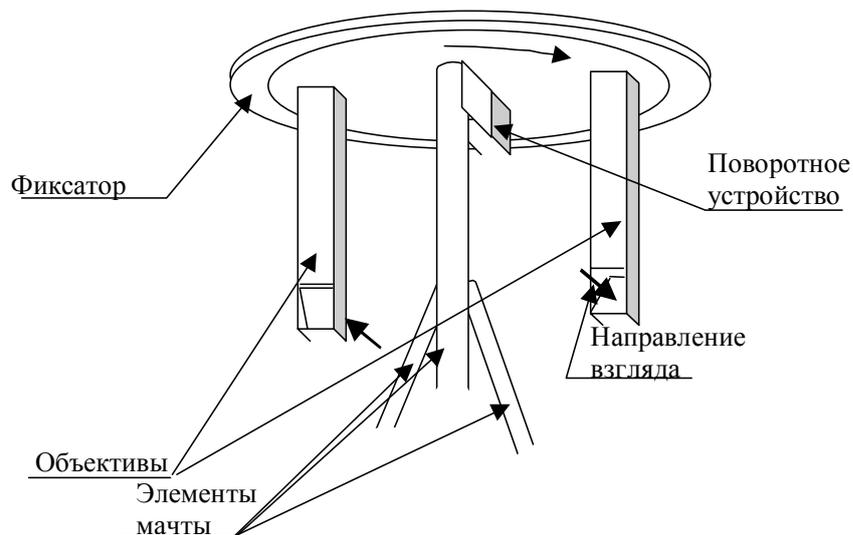


Рис. 2. Компоновочная схема системы зрения

Экспериментально были выработаны следующие критерии оптико-электронной части системы зрения:

- 1) фотоприемник должен быть установлен в фокусе линзы (настройка на бесконечность);

- 2) для увеличения диапазона резкого зрения по расстоянию необходимо применять короткофокусные линзы;
- 3) не стоит стремиться получать узкую апертуру, полезный сигнал в этом случае носит импульсный характер, т. е. спектр расширяется, падает его различимость. Вполне достаточно, чтобы одновременно в поле зрения не попадало два маяка;
- 4) чувствительность восприятия сигнала растет пропорционально площади линзы.

Направление движения на маяк уточняется программно, путем экстраполяции сигнала, также программно определяется, видит глаз один маяк или несколько одновременно. Дальность до маяка оценивается по длительности импульса с фотодатчика. Изначально объектив сделан дальнотворким, поэтому изображение маяка вблизи становится нерезким, а импульс фотодатчика длинным. Скорость вращения фиксатора до 15 об/с. Таким образом, скорость обновления информации может достигать 30 раз в секунду. Дальность работы системы зрения до 20 м.

Алгоритмы обработки информации системы технического зрения

Система технического зрения предоставляет системе планирования параметры обнаруженных маяков: расстояние до маяка ρ и угол, под которым виден маяк δ . Проблемой для системы планирования, пользующейся данными от СТЗ, является то, что маяки не имеют никакой идентификации: при перемещении робота один маяк может загоразивать другой, т.е. маяки могут возникать и исчезать от оборота к обороту; упорядоченность маяков может изменяться при смене позиции робота; условия работы робота таковы, что возможно возникновение ложных маяков, вспышки фотоаппаратов, отражение от стен и т.д. Для идентификации маяков и для борьбы с импульсными помехами разработан алгоритм обработки информации, поступающей с датчиков системы технического зрения.

Модель оценки

Одним из вариантов определения очередной программной точки движения робота является анализ пришедших от СТЗ данных без учета предыдущих измерений (по принципу "видим маяк, идем на него"). Но в ситуации, когда робот видит маяки в линию, т.е. видит только один маяк, на какой из них надо ехать после их расхождения, неизвестно. В результате такой двойственности могут возникнуть проблемы, приводящие к неверному движению робота. Альтернативным вариантом является включение в алгоритм обработки зрительной информации устройства прогнозирования следующего положения маяка на основе анализа старых измерений.

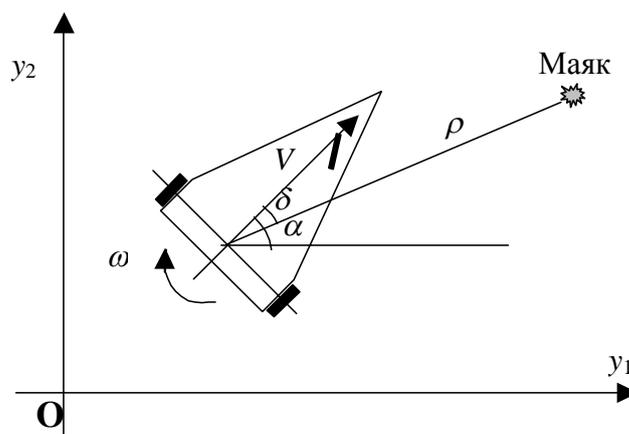


Рис. 3. Вывод модели оценки

За каждый оборот головы с СТЗ поступает информация о направлении на маяк – угол δ и расстояние до маяка ρ . Для модели оценки необходимо найти изменение этих параметров во времени (рис. 3):

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= \cos(\delta) \cdot V, \\ \dot{\delta} &= \sin(\delta) \cdot V + \omega,\end{aligned}\tag{1}$$

где V , ω – соответственно линейная и угловая скорость центра масс робота.

Модель оценки описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\hat{\rho}(n+1) &= \rho_n + h \cos(\delta_n) \cdot V_n \\ \hat{\delta}(n+1) &= \delta_n + h \cdot \left(\frac{\sin(\delta_n) \cdot V_n}{\rho_n} + \omega_n \right).\end{aligned}\tag{3}$$

Алгоритм обработки информации

Алгоритм обработки зрительной информации содержит два критерия отбора импульсов, поступающих с фотодатчиков. Первый – это фильтрация по ширине импульсов, что позволяет бороться с кратковременными случайными помехами. Вторым критерий – проверка на соответствие оценки параметров – кроме отсеивания помех, позволяет идентифицировать маяки, т.е. определять положение одного и того же маяка на двух последовательно идущих тактах.

Блок-схема алгоритма обработки информации представлена на рис. 4. Алгоритм работает следующим образом. После перехода сигнала фотодатчика в активное состояние запоминаются значения таймера, отвечающего за измерение угла поворота фиксатора. В памяти накапливается массив, размер которого равен количеству видимых маяков. В массиве хранится угол, под которым виден маяк, а также угловая ширина изображения маяка. Информация о ширине позволяет определять дальность до маяка. Эти параметры являются исходными для алгоритма.

Поступившие с выхода СТЗ данные сначала отбираются по ширине импульса. Сигналы, ширина которых меньше некоторой заданной (ρ_{min}), считаются помехой. В устройстве оценки для всех зарегистрированных видимых маяков осуществляется расчет (прогнозирование) значений их параметров на следующем такте, учитывая перемещение робота. Сигналы, прошедшие отбор по ширине, поочередно сравниваются с полученными оценками. Если разница не превышает некоторой погрешности (коэффициенты подобия – d_δ, d_ρ), то считаем, что обнаружены новые параметры зафиксированного маяка. В таблице видимых маяков при этом соответствующая запись обновляется. Если же соответствия не обнаружено, то в таблицу добавляется новая запись.

Еще одним важным параметром алгоритма является количество подтверждений h_n . Его значение увеличивается на единицу при обновлении записи о маяке и уменьшается на единицу, если подтверждение не получено. Таким образом, этот параметр позволяет бороться с импульсными помехами и является критерием достоверности полученной информации, т.к. вероятность появления одинаковой помехи в одной и той же точке очень мала.

Эффективность работы алгоритма во многом зависит от выбора его параметров: минимальной ширины импульса ρ_{min} , коэффициентов подобия d_δ, d_ρ и количества подтверждений h_n .

Минимальная длина импульса, который воспринимается как полезный сигнал, определяется длиной импульса от самого дальнего маяка, а также ошибкой измерения ширины импульса, вызванной, в основном, тепловым шумом фотоэлементов.

Коэффициент подобия определяется многими параметрами: шагом квантования скорости, ошибкой измерения центра импульса и ширины импульса, но главным обра-

зом – ошибкой устройства оценки и, в частности, ошибкой преобразовании метода Эйлера.

Количество подтверждений рекомендуется выбирать в пределах от 2 до 5. Увеличение значения этого параметра приводит к увеличению времени принятия решения и, следовательно, к уменьшению быстродействия. Уменьшение значения приводит к снижению точности.

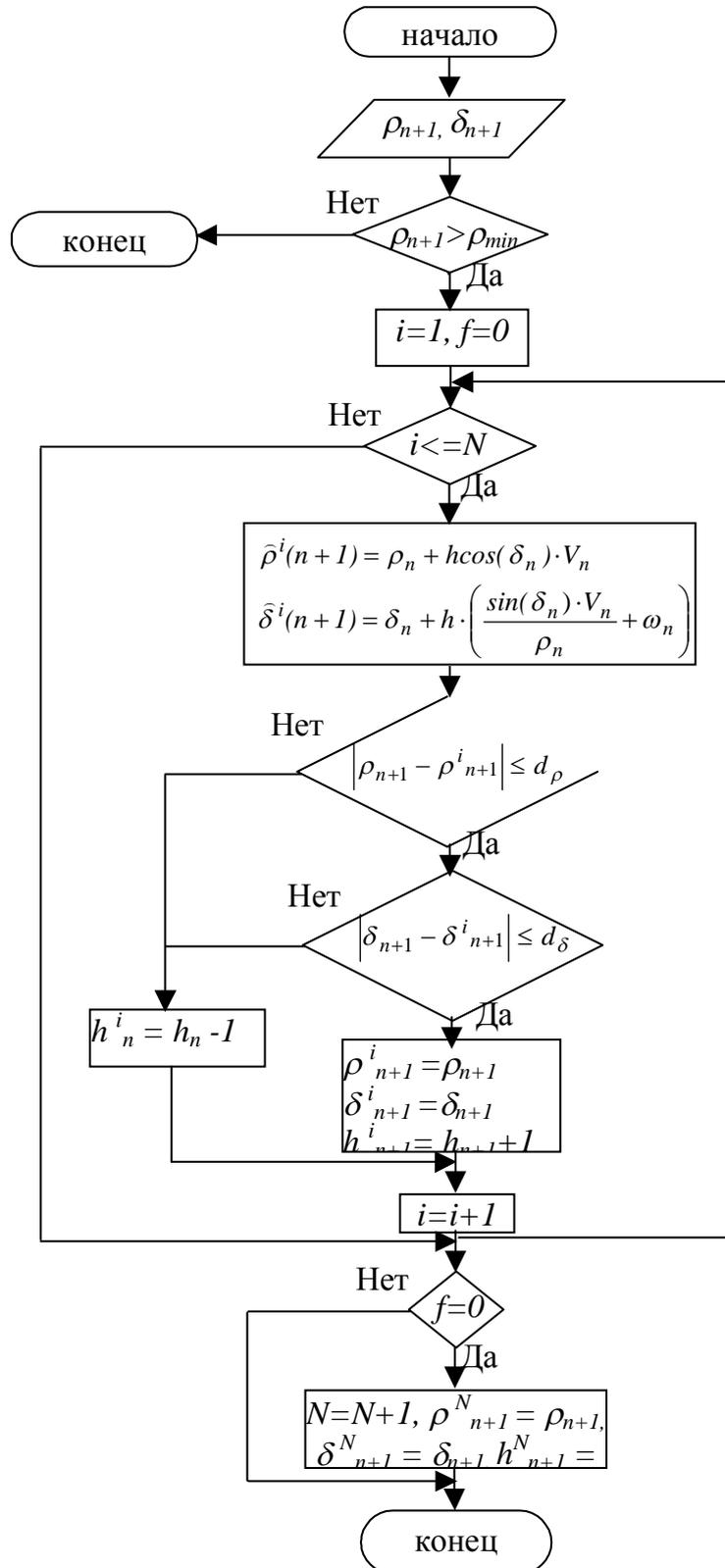


Рис. 4. Алгоритм обработки цифровой информации

Заключение

Описанная система технического зрения показала свою успешную применимость в качестве устройства для кругового пеленга направления на маяки во время участия в соревнованиях "Мобильные роботы", проводимых в Москве в Институте механики МГУ им. Ломоносова. Качество выполнения заданий во многом зависит от точности определения количества маяков и их местонахождения, поэтому задачами дальнейших исследований являются усовершенствование СТЗ и алгоритмов обработки зрительной информации.

Литература

1. Аржаник А.В., Вашенков О.Е., Лямин А.В., Штефан В.И. Мобильный робот "Невская стрела". // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – М.: Новые технологии, 2004, №2. – с. 23-26
2. Лямин А.В., Мирошник И.В. Динамические модели многоприводных колесных роботов // Анализ и управление нелинейными колебательными системами / Под. ред. Г.А. Леонова, А.Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 1998. С.201-214.
3. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмакова Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. – СПб.: Наука, 2001. – 227с., ил. 91 (Серия " Анализ и синтез нелинейных систем")
4. Бобцов А.А., Дударенко Н.А., Лямин А.В. Тракторное управление двухприводным роботом с использованием методов адаптации и самообучения // Мобильные роботы и мехатронные системы: Доклады научной школы-конференции. - Москва, 2000. - с. 114-126

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ЧАСТИЧНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

А.В. Галушкин, М.Н. Дударев, А.Д. Лебедев, В.А. Таюрский
Научный руководитель – д.т.н., проф. И.В. Мирошник

В работе решается задача частичной стабилизации нелинейного объекта в условиях, когда стабилизируемые переменные состояния неизмеримы. В качестве частного случая рассматривается задача синтеза управления электродвигателем. Получен нелинейный алгоритм управления, а также предложена схема его реализации в виде мультиструктурной системы. Приведены результаты моделирования.

1. Введение

В стандартных задачах теории управления представление о желаемом поведении системы связывается со стабилизацией по всем переменным состояниям. Тем не менее, во многих прикладных задачах требуется лишь частичная стабилизация системы, а стабилизация по всем переменным сопряжена с дополнительными трудностями реализации или вообще неосуществима [4, 6, 7]. Примеры задач частичной стабилизации дают системы траекторного движения роботов и подвижных объектов, гироскопические системы, системы управления двигателями внутреннего сгорания и проч [1, 4, 6].

Частичная стабилизация системы, как правило, осуществляется с помощью алгоритмов замкнутого управления и предполагает наличие текущей информации обо всех переменных системы. В тех случаях, когда стабилизируемые переменные неизмеримы, при некоторых дополнительных условиях можно воспользоваться стратегией разомкнутого управления. Однако для существенно нелинейных объектов алгоритм управления часто оказывается достаточно сложным для практической реализации. Возникает необходимость аппроксимации алгоритма с использованием известных методов – от простейшей линеаризации до нейросетевого описания.

В работе решается задача частичной стабилизации нелинейного объекта в условиях, когда стабилизируемые переменные состояния неизмеримы (раздел 2). В качестве частного случая рассматривается задача синтеза управления движущим моментом электродвигателя (раздел 3), являющаяся упрощенным прототипом задачи управления двигателем внутреннего сгорания [6]. Особенностью системы является отсутствие измерений момента, что обуславливает необходимость реализации регулятора (алгоритма управления) в виде прямых связей. Упрощение алгоритма достигается за счет его аппроксимации с использованием сплайн-функций (раздел 4). Это приводит к стратегии логико-динамического (или мультиструктурного [5]) управления и позволяет вместо достаточно сложного нелинейного алгоритма управления применить набор последовательно переключаемых линейных алгоритмов. Приведены результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенных методов частичной стабилизации.

2. Общая постановка задачи и синтез прямых связей

Рассмотрим нелинейную динамическую систему (объект управления), которая состоит из двух динамических блоков S^1 и S^2 (рис. 1), описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$S^1 : \dot{x}^1 = f^1(x^1, x^2). \quad (1)$$

$$S^2 : \dot{x}^2 = f^2(x^1, x^2) + g(x^1, x^2)u, \quad (2)$$

где x^1 и x^2 – векторы состояния указанных блоков, u – скалярное управляющее воздействие, f^1, f^2 и g – гладкие вектор-функции соответствующих размерностей.

Будем полагать, что измеряемыми переменными системы являются только координаты вектора x^1 , а задачей управления является стабилизация объекта по переменным вектора x^2 , т.е. асимптотическое выполнение условия

$$x^2 = x^{2*}, \quad (3)$$

где $x^{2*} = const$ – заданное значение (задающее воздействие системы).

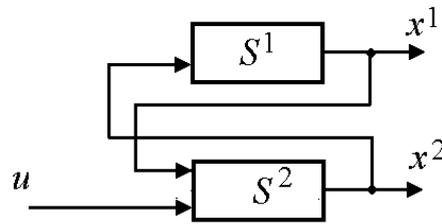


Рис. 1. Составная система управления

Для решения задачи рассмотрим частично статический режим, в котором $x^2 = x^{2*}$ и, следовательно $\dot{x}^2 = 0$. Из уравнения (2) получаем

$$f^2(x^1, x^{2*}) + g(x^1, x^{2*})u = 0, \quad (4)$$

Допуская, что последнее уравнение разрешимо относительно u , т.е. существует

$$u = U(x^1, x^{2*}), \quad (5)$$

находим

$$U(x^1, x^{2*}) = -g^+(x^1, x^{2*})f^2(x^1, x^{2*}). \quad (6)$$

Выражения (5)–(6) описывают алгоритм управления, представляющий собой нелинейные прямые связи системы (1)–(2), в которых используются известные значения x^1 и x^{2*} . Отметим, что в отличие от традиционных прямых связей, известных в теории линейных и нелинейных систем [5–6], алгоритм (6) зависит от части переменных состояния – компоненты $x^1(t)$.

После подстановки (5)–(6) в уравнение (2) находим уравнение блока S^2 в виде.

$$\dot{x}^2 = f_c^2(x^1, x^2, x^{2*}), \quad (7)$$

где

$$f_c^2 = (I - g(x^1, x^2)(g^+(x^1, x^{2*})))f^2(x^1, x^{2*}) \quad (8)$$

Для анализа устойчивости частичного положения равновесия введем в рассмотрение ошибку стабилизации

$$e = x^{2*} - x^2, \quad (9)$$

и после дифференцирования (9) по времени получим модель ошибки

$$\dot{e}^2 = -f_c^2(x^1, x^{2*} - e, x^{2*}) \quad (10)$$

Асимптотическая устойчивость модели (10) для любых $x^1(t)$, являющихся решением системы (1)–(2), является необходимым и достаточным условием асимптотической устойчивости положения равновесия и, следовательно, решения задачи частичной стабилизации. Локальные условия устойчивости могут быть получены после линеаризации модели (10) в окрестности точки $e = 0$.

Полученный алгоритм управления (5)–(6) является существенно нелинейным, и поэтому во многих случаях его практическая реализация сопряжена со значительными трудностями. В таких случаях точная формула (6) заменяется упрощенными выражениями, представляющие собой различные варианты аппроксимации. Простейшее выражение может быть получено в результате линеаризации формулы в окрестности точки $(x^1, x^{2*}) = (\bar{x}^1, \bar{x}^{2*})$ и принимает вид

$$u = C_0 + C_1(x^1 - \bar{x}^1) + C_2(x^{2*} - \bar{x}^{2*}), \quad (11)$$

где C_0, C_1, C_2 – постоянные коэффициенты. Так как линеаризация, как правило, не обеспечивает достаточной точности реализации выражения (6), то следует воспользоваться сплайн-функциями, что предусматривает разбиение пространства на области, в каждой из которых рассчитываются свои значения коэффициентов C_0, C_1, C_2 . Эта методика для одного из частных случаев изложена в разделе 4.

3. Система управления моментом нелинейного электродвигателя

Будем рассматривать задачу управления моментом нелинейного электродвигателя, математическая модель которого представлена уравнениями

$$J\dot{\omega} = M - K_L\omega, \quad (12)$$

$$TM + M = K_u u - K_\omega(\omega), \quad (13)$$

где ω – угловая скорость, M – вращающий момент, u – управляющее воздействие (входное напряжение), J – приведённый момент инерции, K_L, T, K_u – постоянные коэффициенты, $K_\omega(\omega)$ – нелинейная функция скорости вида:

$$K_\omega(\omega) = K_1\omega + K_2\omega^2, \quad (14)$$

K_1, K_2 – постоянные коэффициенты. Модель представлена на рис. 2

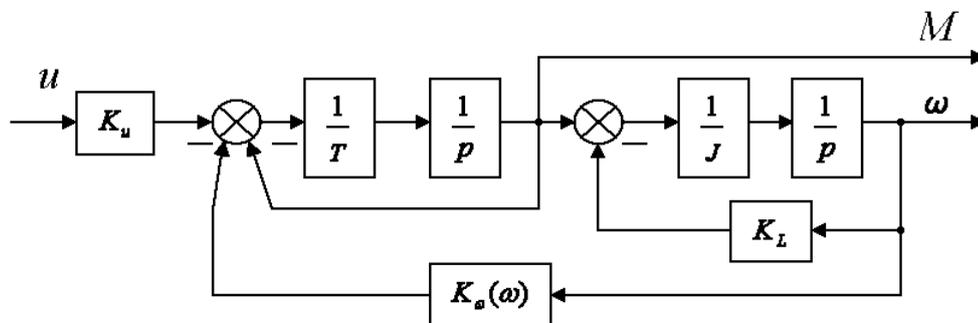


Рис. 2. Структурная схема электродвигателя

Отметим, что модель электродвигателя можно привести к форме Коши. Однако в силу специфики рассматриваемого объекта, в дальнейшем удобно воспользоваться описанием вида (12)–(13).

Задача управления заключается в стабилизации вращающего момента M на заданном уровне M^* , т.е.

$$M = M^*, \quad (15)$$

причем значение момента не измеряется, а измеряемой переменной состояния является только угловая скорость ω . Таким образом, задача относится к классу задач частичной стабилизации, рассмотренных в разделе 2, и, следовательно, решается по приведенной выше методике.

Рассмотрим установившийся режим работы электродвигателя, в котором выполняется тождество (15). Уравнения системы (12)–(13) принимают вид

$$J \cdot \dot{\omega} = M^* - K_L\omega, \quad (16)$$

$$M^* = K_u \cdot u - K_\omega(\omega), \quad (17)$$

Первое из них описывает изменение угловой скорости, а второе – нелинейную статическую характеристику электродвигателя (рис. 3а).

Из уравнения (17) находим нелинейный алгоритм разомкнутого (по моменту) управления

$$u = \frac{1}{K_u} M^* + \frac{1}{K_u} K_\omega(\omega), \quad (18)$$

представленный связями по известным значениями M^* и ω (рис. 4). Для линейно-квадратичной нелинейной зависимости (14) найдем

$$u = \frac{1}{K_u} M^* + \frac{K_1}{K_u} \omega + \frac{K_2}{K_u} \omega^2. \quad (19)$$

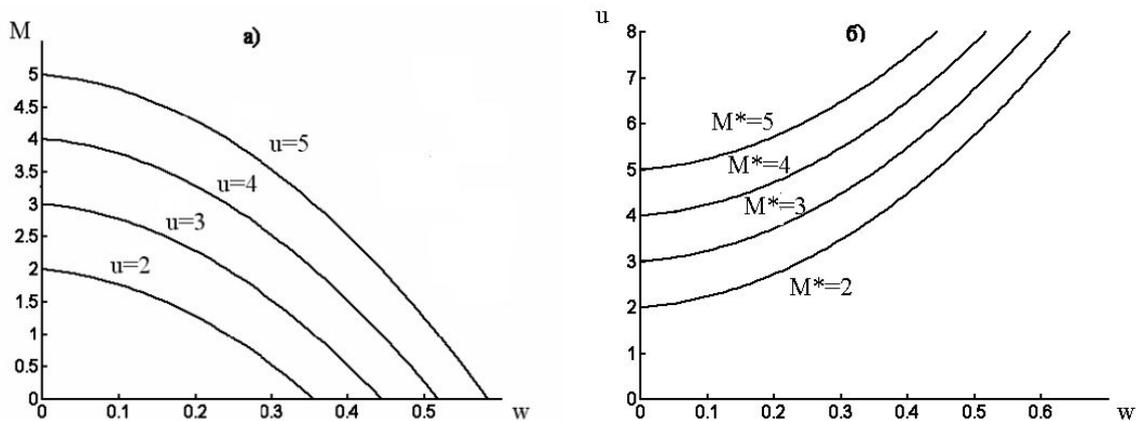


Рис. 3. Статическая характеристика электродвигателя (а) и характеристика регулятора (б)

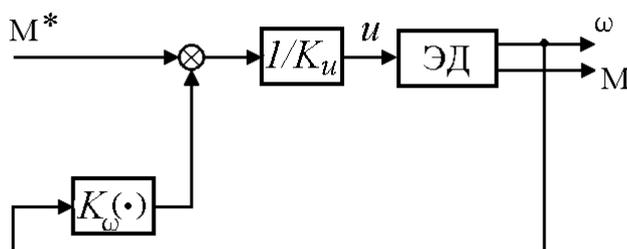


Рис. 4. Регулятор момента

Для анализа устойчивости системы по переменной M подставим (18) в (13). Получим

$$T\dot{M} + M = M^*. \quad (20)$$

Очевидно, что модель (20) является асимптотически устойчивой относительно положения равновесия M^* , а, следовательно, и полная модель системы (12)–(13) является частично асимптотически устойчивой.

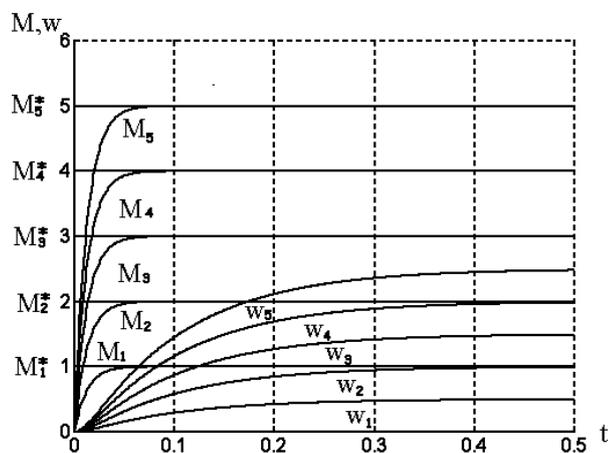


Рис. 5. Переходные процессы системы с регулятором момента

Результаты моделирования системы (12)–(13) с алгоритмом управления (19) и различными постоянными задающими воздействиями M^* приведены на рис. 5. Графики переходных процессов показывают хорошую сходимость момента M на валу двигателя к задающему значению несмотря на то, что процессы изменения угловой скорости ω продолжают развиваться, что подтверждает достижение частичной устойчивости системы.

4. Сплайн-аппроксимация и мультиструктурная система управления моментом

Как отмечалось в разделе 2, в общем случае реализация нелинейного алгоритма (6) может представлять определенные трудности. Для их преодоления можно воспользоваться аппроксимацией алгоритма с использованием сплайн-функций, что приводит к стратегии логико-динамического, или мультиструктурного, управления. Для рассматриваемого здесь случая, когда зависимость (19) линейна по моменту M^* , процедура синтеза управления предполагает следующее:

область изменения угловой скорости S_ω разбивается на зоны S_ω^m (подобласти), в каждой из которых выделяется центральная точка $\omega(m)$;

формула (19) линеаризуется в окрестностях центральных точек:

$$u = C_0(m) + C_1(m)(\omega - \omega(m)) + C_2 M^*, \quad (21)$$

т.е. находятся коэффициенты

$$C_0 = \frac{K_1}{K_u} \omega(m) + \frac{K_1}{K_u} \omega^2(m), \quad (22)$$

$$C_1 = \frac{K_1}{K_u} + 2 \frac{K_2}{K_u} \omega(m), \quad (23)$$

$$C_2 = \frac{1}{K_u}; \quad (24)$$

выражение (21) используется в качестве алгоритма управления в каждой из выделенных зон; для переключения значений коэффициентов C_0, C_1 используется алгоритм переключения структуры АПС (рис. 6), который определяет, какой из подобластей S_ω^m принадлежит текущая скорость вращения электропривода.

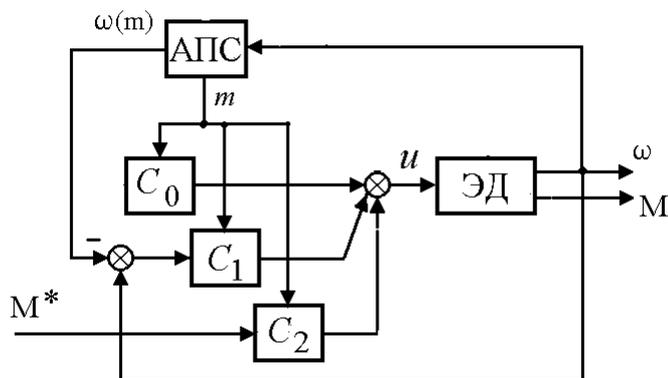


Рис. 6. Мультиструктурный регулятор момента

Результаты моделирования электродвигателя с мультиструктурным регулятором (21) показывают, что переходные процессы системы практически не отличаются от представленных на рис. 5. На рис. 7а приведены результаты моделирования системы для ступенчатого задающего воздействия M^* , а на рис. 7б – для линейно- нарастающих сигналов $M^* = 3 + t$ и $M^* = 5 + t$. Переходные процессы подтверждают устойчивость системы по моменту и достижение хорошей точности стабилизации.

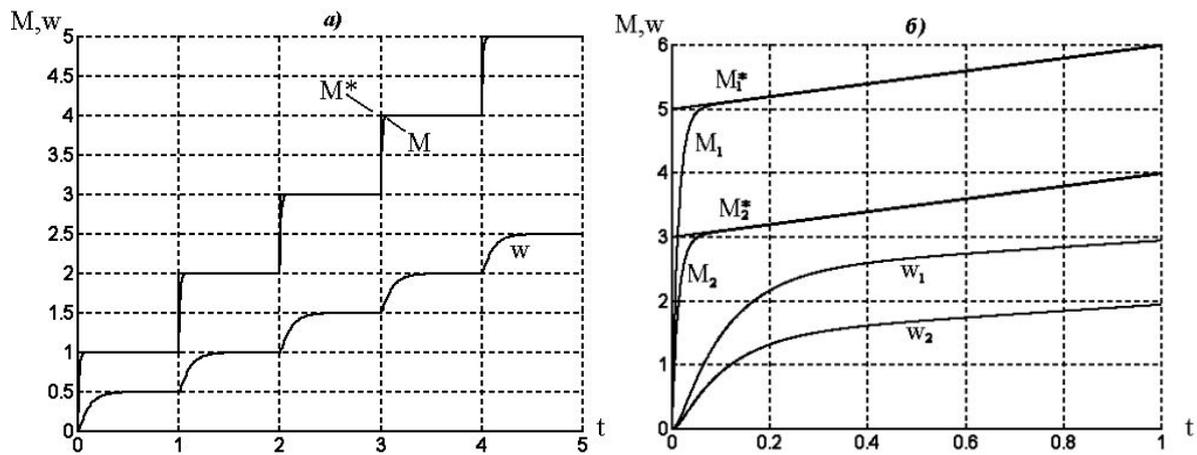


Рис. 7 Переходные процессы системы с мультиструктурным регулятором: (а) для ступенчатого и (б) для линейно нарастающего задающего воздействия

Литература

1. Алексеев В.П., Воронин В.Ф. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1990.
2. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.
4. Мирошник И.В., Фрадков А.Л., Никифоров В.О. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
5. Мирошник И.В., Бобцов А.А. Линейные системы автоматического управления, СПб: СПбГИТМО, 2001, 245 с.
6. Мирошник И.В. Нелинейные системы. Анализ и управление. СПбГИТМО: 2002,
7. Isidory A. Nonlinear control systems. 3 edition. NY: Springer-Verlag, 1995.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант 02–01–01164) и Комплексной программы 19 Президиума РАН (2003, раздел 1.4)..

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИНЖЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

С.А. Коновалов

Научный руководитель – д.т.н., проф. И.В. Мирошник

В работе рассматривается четырехтактный восьмицилиндровый двигатель инжекторного типа. Результатом исследований является полная (мгновенная) математическая модель двигателя как объекта управления, а также динамические и статические характеристики такой модели, полученные с использованием специализированного программного обеспечения. Приведены результаты модельных экспериментов, подтверждающие адекватность математического описания инжекторного двигателя.

1. Введение

При решении задач управления многоцилиндровыми двигателями внутреннего сгорания возникает необходимость в адекватных моделях двигателя как объекта управления, которые были бы представлены системой нелинейных дифференциальных уравнений. Основное применение нашли усредненные модели, что объясняется их относительной простотой и спецификой используемых процедур синтеза [4]. При построении усредненных моделей используются как некоторые приближенные характеристики двигателя, так и результаты усреднения точной модели, учитывающей процессы, происходящие в каждом цилиндре. Последний подход теоретически позволяет получить более точные результаты, однако требует достаточно подробного описания механических, термодинамических, изотермических и прочих процессов, происходящих в двигателе [1]. Проблема осложняется необходимостью учета взаимодействия процессов, происходящих в различных цилиндрах двигателя и находящихся в силу в различных фазах своего развития.

В работе рассматривается четырехтактный восьмицилиндровый двигатель инжекторного типа. Результатом исследований является полная (мгновенная) математическая модель, представленная системой нелинейных дифференциальных уравнений с переключаемой структурой, а также динамические и статические характеристики такой модели, полученные с использованием специализированного программного обеспечения. Приведены результаты модельных экспериментов, подтверждающие адекватность математического описания инжекторного двигателя.

2. Описание модели

Рассматриваемый образец инжекторного двигателя (ИД) внутреннего сгорания состоит из восьми рабочих цилиндров, входного и выходного коллекторов, а также механической части, представленной клапанами цилиндров и кривошипно-шатунным механизмом. Работа клапанов каждого цилиндра связана с перемещением его поршня $y_j(t)$ или фазой (тактом) его работы, представленной угловой переменной φ_j (табл. 1 и рис.1). Для четырехтактного двигателя эта переменная изменяется от 0 до 4π . Работа клапанов всех цилиндров синхронизирована и обеспечивает последовательное подключение цилиндров к коллекторам двигателя с фазовым сдвигом $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ [3], что опережает сдвиг происходящих в них процессов.

Модель рассматриваемого двигателя состоит из модели движения коленчатого вала (КВ) с кривошипно-шатунным механизмом (КМ), модели процессов в каждом из восьми цилиндров и модели процессов, протекающих во входном коллекторе (рис.2). При построении модели двигателя используются известные физические законы с учетом указанной выше последовательности смены фаз (тактов) работы отдельных цилиндров и их взаимодействия через входной коллектор. Такая модель представляет собой

нелинейную многоканальную динамическую систему. Ее входными (управляющими) воздействиями служат угол поворота дросселя α и угол упреждения зажигания α_{ign} [2], а выходными переменными – угловая скорость вращения вала ω и момент двигателя M .

Режим	Впуск	Сжатие	Рабочий ход	Выхлоп
φ	$0 \div \pi$	$\pi \div 2\pi$	$2\pi \div 3\pi$	$3\pi \div 4\pi$
Впускной кл. (i_1)	1	0	0	0
Выпускной кл. (i_2)	0	0	0	1

Таблица 1. Работа клапанов: $i=1$ – открытое положение, $i=0$ – закрытое положение

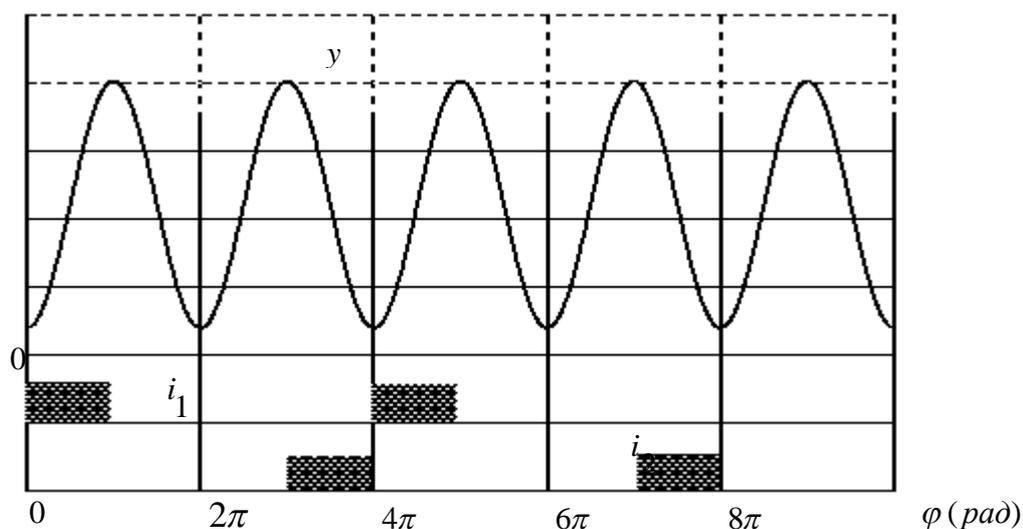


Рис. 1. Перемещение поршня одного цилиндра и циклограммы работы клапанов

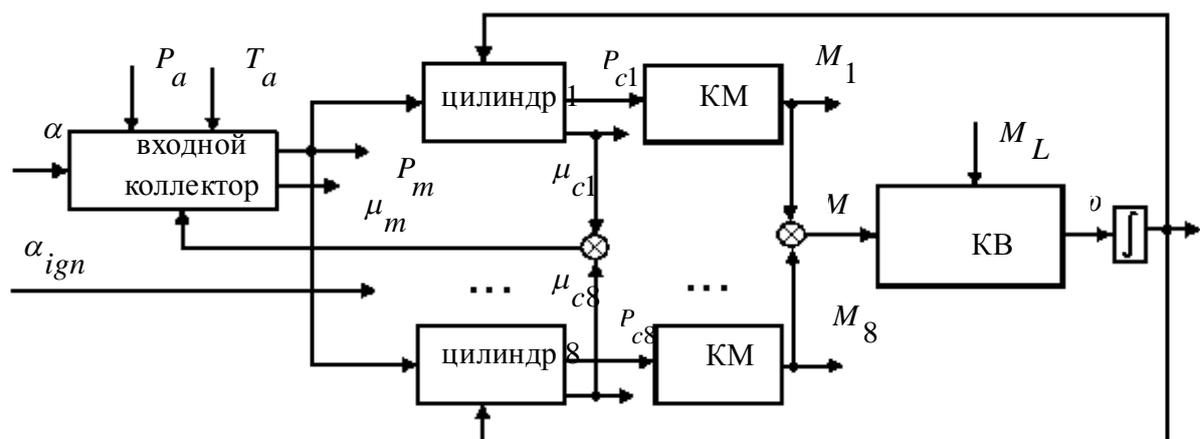


Рис. 2. Схема модели 8-мицилиндрового ИД

Динамика коленчатого вала. Движение вала описывается уравнениями $\dot{\varphi}(t) = \omega(t)$, (1)

$$J\dot{\omega}(t) = M(t) - M_L(t), \quad (2)$$

где φ – угол поворота КВ, ω – скорость, M – момент двигателя, который является суммой моментов M_j , создаваемых в каждом цилиндре [1], т.е.

$$M = \sum_{j=1}^8 M_j, \quad (3)$$

M_L – внешний момент, представленный моментом нагрузки $M_{L0} = const$ и моментом трения $M_f(t)$.

$$M_L(t) = M_{L0} + M_f(t) = M_{L0} + k_f \omega. \quad (4)$$

Кривошипно-шатунный механизм и цилиндры. Момент M_j , создаваемый j -ым цилиндром, вычисляется как

$$M_j = 0.42\pi R_c^2 R_s P_{cj} \sin \varphi_j, \quad (5)$$

где P_{cj} – давление в цилиндре, φ_j – угол поворота КВ:

$$\varphi_j = \varphi + \frac{\pi}{2}(j-1). \quad (6)$$

Из уравнения идеального газа найдем давление:

$$P_{cj} = \frac{R_{af} T_{cj}}{V_{cj}(t)} m_{cj}, \quad (7)$$

где T_{cj} – температура газа в цилиндре, m_{cj} – масса газа. Переменный (рабочий) объем цилиндра V_{cj} рассчитывается по формуле [1]:

$$V_{cj}(t) = \pi R_p^2 y_j(t), \quad (8)$$

где длина рабочего хода поршня:

$$y_j(t) = y_0 + 0.5Y_0(1 - \cos \varphi_j). \quad (9)$$

Динамика изменения массы вещества в цилиндре описывается выражением

$$\dot{m}_{cj} = \mu_{cj}. \quad (10)$$

Здесь поток массы топливной смеси во время впуска вычисляется как:

$$\mu_{cj} = \eta_c S_{in} \varphi_1(\delta P_{cj}), \quad (11)$$

а поток отработавших газов во время выпуска –

$$\mu_{cj} = \eta_c S_{ex} \varphi_1(\delta \bar{P}_{cj}), \quad (12)$$

где $\delta P_{cj} = \frac{P_{cj}}{P_m}$ и $\delta \bar{P}_{cj} = \frac{P_a}{P_{cj}}$ относительные величины [4], а функция φ_1 может быть

приближенно представлена как:

$$\varphi_1(\delta P_{cj}) = C_{af} (1 - \delta P_{cj}^5). \quad (13)$$

Процессы изменения момента и массы в цилиндре показаны на рис. 3.

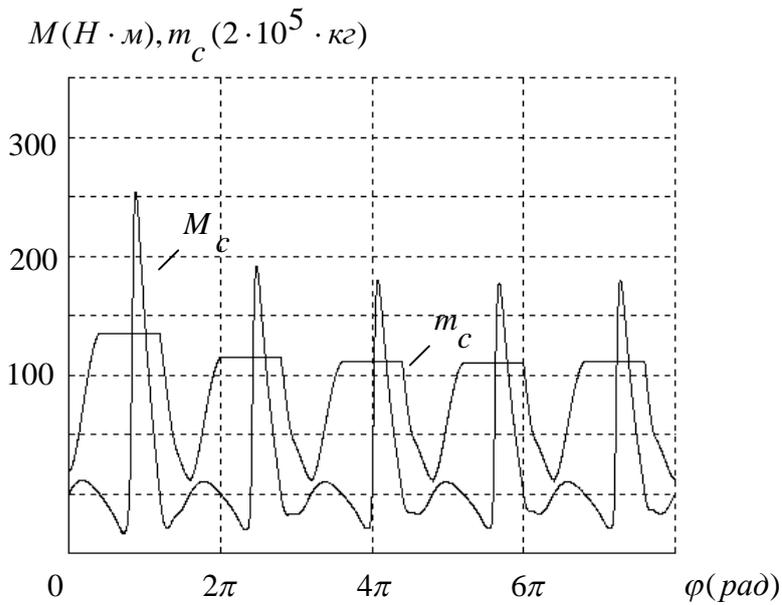


Рис. 3. Диаграммы момента и массы:
 $\alpha = 40^\circ, \alpha_{ign} = 30^\circ, \omega(0) = 400 \text{ 1/с}$

После воспламенения топливной смеси при $\varphi_j = 2\pi k - \alpha_{ign}$, начало которого определяется углом α_{ign} , температура T_{cj} в j -ом цилиндре определяется выражением

$$\tau_{ig} \dot{T}_{cj} + (T_{cj} - T_a) = k_{ig} m_{cj}, \quad (14)$$

где

$$\tau_{ig} = \frac{\tau_{ig0} m_{cj}}{(T_{cj} - T_a)^{1.2}}. \quad (15)$$

Процессы изменения массы m_c и температуры T_c топливной смеси приведены на рис. 4.

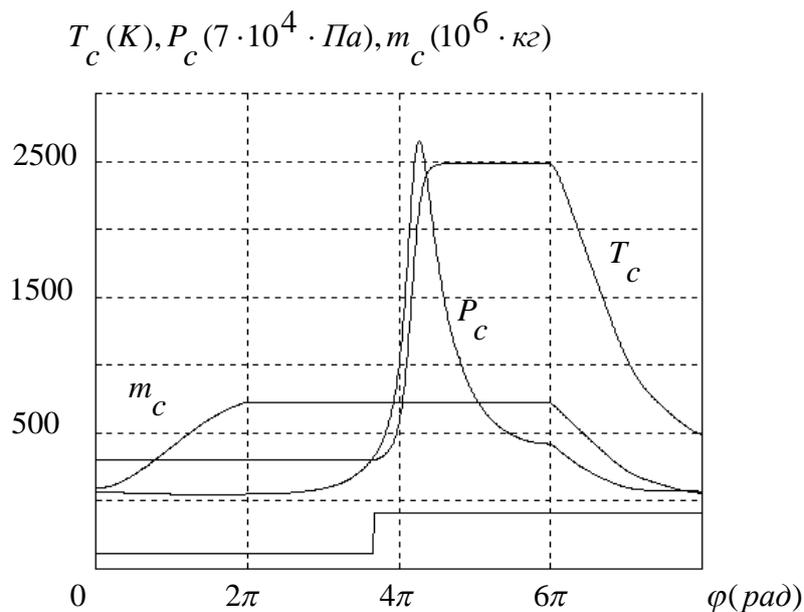


Рис. 4. Диаграммы массы, температуры и давления в цилиндре:
 $\alpha = 80^\circ, \alpha_{ign} = 30^\circ, \omega(0) = 400 \text{ 1/с}$

Дроссельная заслонка и входной коллектор. Давление в коллекторе вычисляется как:

$$P_m(t) = \frac{RT_a}{V_m} m_{am}(t), \quad (16)$$

где m_{am} – масса воздуха в коллекторе,

$$\dot{m}_{am} = \mu_{am}(t) - \mu_c(t). \quad (17)$$

Здесь μ_c – воздушный поток, поступающий в цилиндры,

$$\mu_c = \sum_{j=1}^8 \mu_{cj}, \quad (18)$$

μ_{am} – воздушный поток, поступающий в коллектор,

$$\mu_{am}(t) = \eta_m \varphi_1(\delta P_m(t)) \varphi_2(\alpha), \quad (19)$$

α - угол поворота дроссельной заслонки, $\delta P_m = \frac{P_m}{P_a}$ относительная величина, нелиней-

ные функции φ_1 и φ_2 задаются формулами:

$$\varphi_1(\delta P_m) = C_m (1 - \delta P_m^7) \quad (20)$$

и

$$\varphi_2(\alpha) = S_{th} \left(1 - \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha_0)} \right). \quad (21)$$

3. Результаты моделирования

С использованием программной среды MATLAB было разработано специализированное программное обеспечение для моделирования и исследования характеристик инжекторного двигателя. В основе программного обеспечения лежит математическая модель ИД, рассмотренная в п.2.

На рис. 5 показано изменение момента двигателя и давления во входном коллекторе при различных углах открытия заслонки, а на рис. 6 – для различных значений начальной скорости вала ω .

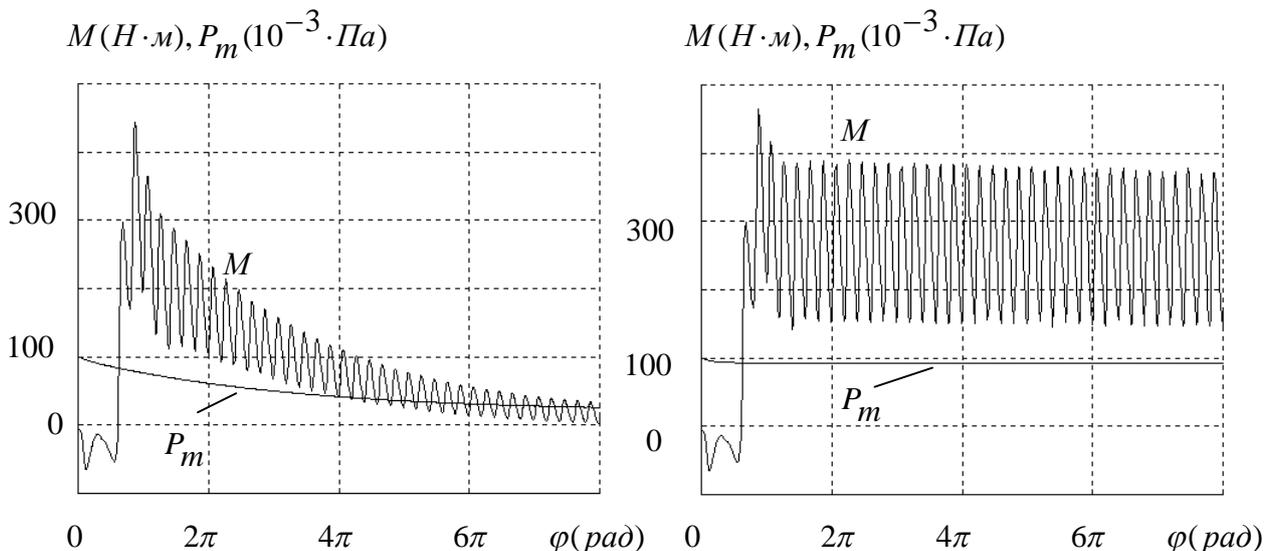


Рис. 5. Диаграммы момента двигателя и давления в коллекторе:
 $\alpha = 20,80^\circ, \alpha_{ign} = 30^\circ, \omega(0) = 400 \text{ 1/с}$

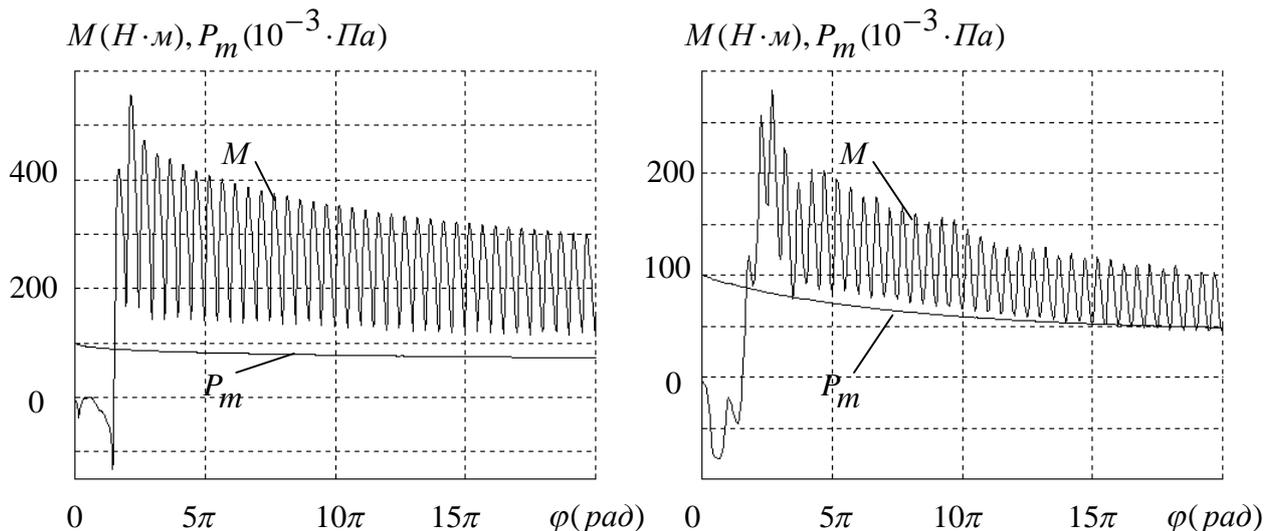


Рис. 6. Диаграммы момента двигателя и давления в коллекторе:
 $\alpha = 40^\circ$, $\alpha_{ign} = 30^\circ$, $\omega(0) = 200,600$ 1/с

Процесс разгона двигателя при фиксированном положении дроссельной заслонки $\alpha = 10-50^\circ$ проиллюстрирован на рис.7, здесь же показаны процессы изменения момента двигателя (фильтрованный сигнал) для начальной скорости вала $\omega(0) = 50$ 1/с.

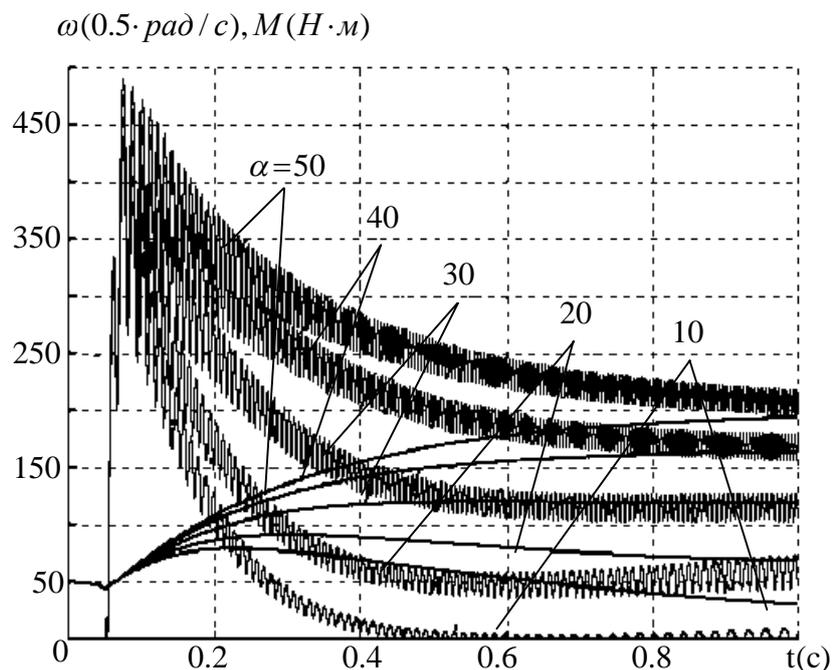


Рис. 7. Изменение момента и скорости (разгон двигателя)

Основным результатом моделирования являются статические характеристики двигателя, т.е. его моментная характеристика $M(\omega)$ и кривая изменения давления в коллекторе $P_m(\omega)$ (рис.8). Приведенные кривые демонстрируют удовлетворительное совпадение полученных результатов с экспериментальными данными, и, следовательно, подтверждают адекватность разработанной математической модели.

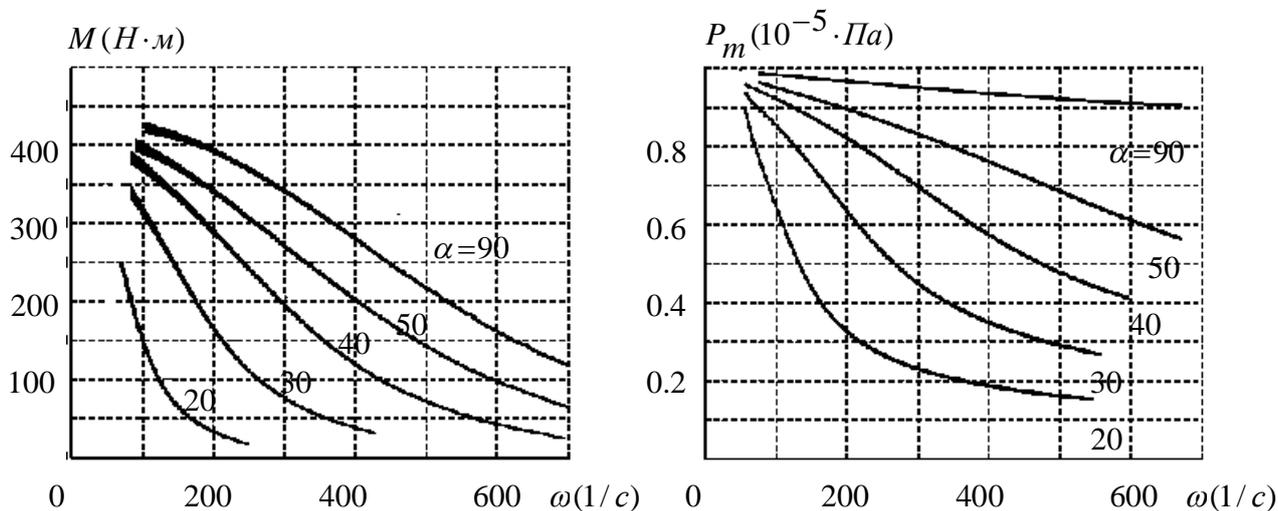


Рис. 8. Статические характеристики момента и давления в коллекторе.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана полная (мгновенная) математическая модель четырехтактного восьмицилиндрового двигателя инжекторного типа и получены динамические и статические характеристики данного типа двигателя. Модельные эксперименты подтверждают адекватность полученной модели и, следовательно, возможность ее использования для решения задач синтеза систем управления.

Литература

1. Алексеев В.П., Воронин В.Ф. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Росс Твег. Системы впрыска бензина. – М.: ЗАО КЖИ За рулём, 2003
3. Система управления двигателем ВАЗ-2112 (1,5л 16кл) с распределенным последовательным впрыском топлива под нормы токсичности ЕВРО-2. – М.: Издательский Дом Третий Рим, 2001.
4. Dobner D.J. A mathematical engine model for development of dynamic engine control. *SAE paper* No. 800054, 1980, pp.373–381.

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ

А.Н. Ефимова

Научный руководитель – к.т.н., проф. Н.Д. Фролов

На основе теории турбулентного течения рассматривается оптимизация микрогеометрии поверхности для решения задачи уменьшения гидродинамического сопротивления. Исследуется влияние различной формы ребер на поток на основе экспериментальных данных для нескольких типов ребер (“рубчиков”).

Введение

Для понимания турбулентности рассмотрим данные по некоторым внутренним поверхностям труб и попытаемся определить оптимальные параметры высоты и шага ребер путем исследования влияния их различной формы на движение потока. Для этого используются экспериментальные данные для нескольких типов ребер. Рассматривается поведение вязкого потока, направленного вдоль и поперек ребристой поверхности. Наблюдается изменение высоты этих потоков, показывается различие высоты выступа для различных конфигураций ребра. В соответствии с теоретическими концепциями реализуется систематическая экспериментальная оптимизация и достигается сокращение трения поверхности.

1. Теоретическая часть

Для начала рассмотрим представленные на рис. 1 экспериментальные результаты, важные для понимания турбулентности. Установившееся течение жидкости происходит в длинной прямой горизонтальной трубе постоянного диаметра d ; для простоты примем плотность ρ и вязкость жидкости μ постоянными. На длине L внутри трубы давление жидкости падает от p_1 до p_2 . Так как сила тяжести не влияет на давление в горизонтальной трубе, падение давления может быть обусловлено только трением, возникающим внутри движущейся жидкости.

Результаты, представленные на рис. 1, соответствуют трем видам труб. В двух случаях внутренняя поверхность трубы выполнена шероховатой с помощью равномерного расположения элементов шероховатости (это можно сделать, нанося резьбу или микрорельеф на стенку трубы). Третий вид трубы – с достаточно гладкой внутренней поверхностью: эта поверхность имеет естественную шероховатость, определяемую материалом трубы и методом изготовления. Этой шероховатости свойственна нерегулярность различных параметров. На рисунке указана относительная шероховатость каждой из трех труб, т.е. отношение типичной высоты элементов шероховатости k к диаметру трубы d .

Анализ результатов, представленных на рис. 1(б), проведем в два этапа; на первом рассмотрим левую часть рисунка, где кривые почти сливаются, на втором – область больших значений числа Рейнольдса, когда шероховатость труб играет существенную роль. Результаты, характеризующиеся отсутствием зависимости трения от шероховатости, наилучшим образом могут быть поняты при рассмотрении другого простого эксперимента с потоком в трубе.

Рис. 1, в иллюстрирует результаты наблюдений, полученные при введении в поток струйки краски в центре прозрачной трубы. Для относительно малых чисел Рейнольдса струйка распространяется вдоль оси невозмущенной (если не считать молекулярную диффузию краски). Это установившееся течение без перемешивания описывается как ламинарное, так как при этом деформация жидкости аналогична деформации тонких пластин (или слоев) в пачке, скользящих одна по другой. Ламинарное течение соответ-

ствует области А (рис. 1,б), в которой коэффициент трения убывает на логарифмическом графике фактически по линейной зависимости.

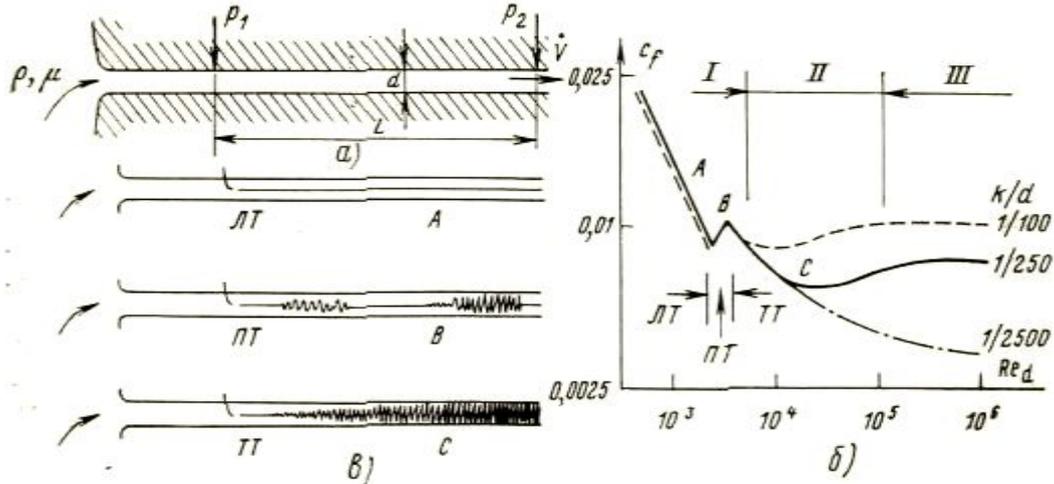


Рис. 1. Зависимость трения в трубах от турбулентности, иллюстрирующая роль шероховатости и перехода к турбулентности. а – экспериментальное определение трения при стационарном течении жидкости в длинной трубе: V – объемный расход жидкости; б – характеристики трения в безразмерном виде; коэффициент трения $c_f \sim (p_1 - p_2)/V^2$ в виде функции числа Рейнольдса $Re_d \sim V$ в логарифмическом масштабе. Показано изменение для трех уровней относительной шероховатости k/d , где k – эффективная высота шероховатости, d – диаметр трубы; I – гидравлически гладкая стенка; II – гидравлический режим при $k/d=1/100$; III – гидравлически вполне шероховатая стенка при $k/d=1/100$. ЛТ – область ламинарного режима течения; ПТ – область перехода к турбулентности; ТТ – область турбулентного режима течения; в – картина, наблюдаемая при визуализации течения, соответствующая режимам течения на рис. 1(б) (краситель вводится по оси трубы)

При высоких значениях числа Рейнольдса поведение окрашенной струйки совершенно иное. После того как струйка проходит невозмущенной некоторое расстояние в трубе, она начинает колебаться из стороны в сторону и, в конце концов, исчезает, переходя в размытое пятно, заполняющее все поперечное сечение. Это неустановившееся течение с перемешиванием было описано Рейнольдсом как волнистое; сейчас мы называем его турбулентным. Турбулентный режим соответствует области С на рис. 1,б, где коэффициент трения имеет заметно большее значение, чем то, которое было бы для ламинарного режима при тех же числах Рейнольдса.

2. Анализ систематической экспериментальной оптимизации

Нашей задачей является уменьшение гидродинамического сопротивления и оптимизация микрогеометрии поверхности. Установлено (в отделении исследования турбулентности, MULLER-BREBLAU-STR. 8, 10623 Берлин, Германия), что поверхности с крошечными ребрами, выровненными в направлении течения, могут уменьшать турбулентную стенку напряжения сдвига. Обычно сокращение трения поверхности получается около 5%. Это достигнуто систематической экспериментальной оптимизацией, которая реализовывалась в соответствии с теоретическими концепциями.

Ключевая особенность - использование испытательного резервуара. В нашем испытательном резервуаре ребра могут иметь боковой интервал приблизительно от 2 до 10 мм. Этот увеличенный размер поверхностных структур дает возможность испытательным поверхностям быть изготовленным с обычными механическими методами. Были проведены следующие испытания.

1) Были выполнены измерения напряжения сдвига с обычной конфигурацией ребра, т.е. с треугольными и полукруглыми углублениями. Выявлено сокращение гидродинамического сопротивления приблизительно 5%.

2) Приспосабливаемая поверхность с продольными ребрами лезвия и с разрезами была построена и проверена. И глубина углубления, и ширина разреза могли быть изменены отдельно и непрерывно в течение эксперимента. С закрытыми разрезами оптимальная глубина углубления для поверхности ребра могла быть определена как половина бокового интервала ребра. Для этой конфигурации получено сокращение трения поверхности 8,7 %. При тщательном устранении вредных влияний (вызванных небольшими промежутками и т.д.) достигнуто сокращение трения поверхности до рекордного значения 9,9 %.

3) Было проведено количественное сравнение между теорией и экспериментом. Теория основана при условии, что ребра препятствуют колеблющемуся турбулентному поперечному потоку около стенки. Таким образом, передача импульса и напряжение сдвига уменьшена. Упрощенная теоретическая модель, предложенная Luchini (1992), поддержана существующими экспериментами.

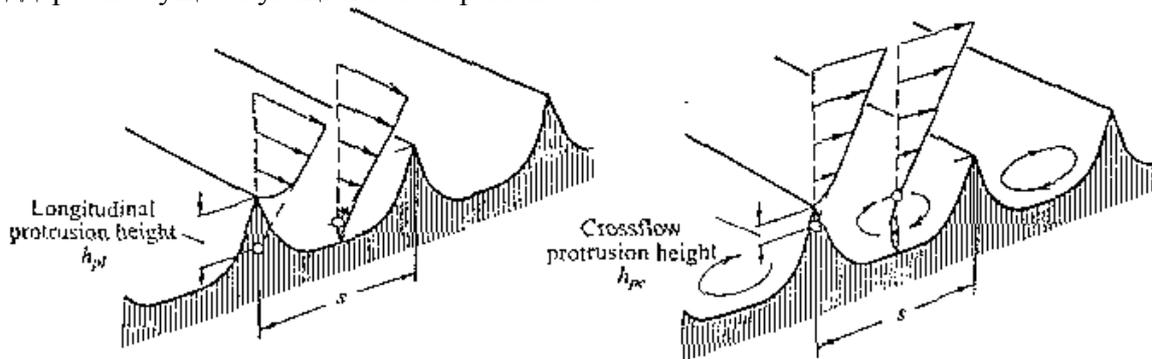


Рис. 2. Вязкий продольный и поперечный поток на ребристой поверхности $\Delta h = h_{pl} - h_{pc}$, направленный вдоль и поперек ребристой поверхности.

Рассмотрим влияние на поток различной формы ребер (используются экспериментальные данные для нескольких типов ребер). Изменение высоты этих потоков в зависимости от параметров h и s для различных типов ребер показано на рис. 3.

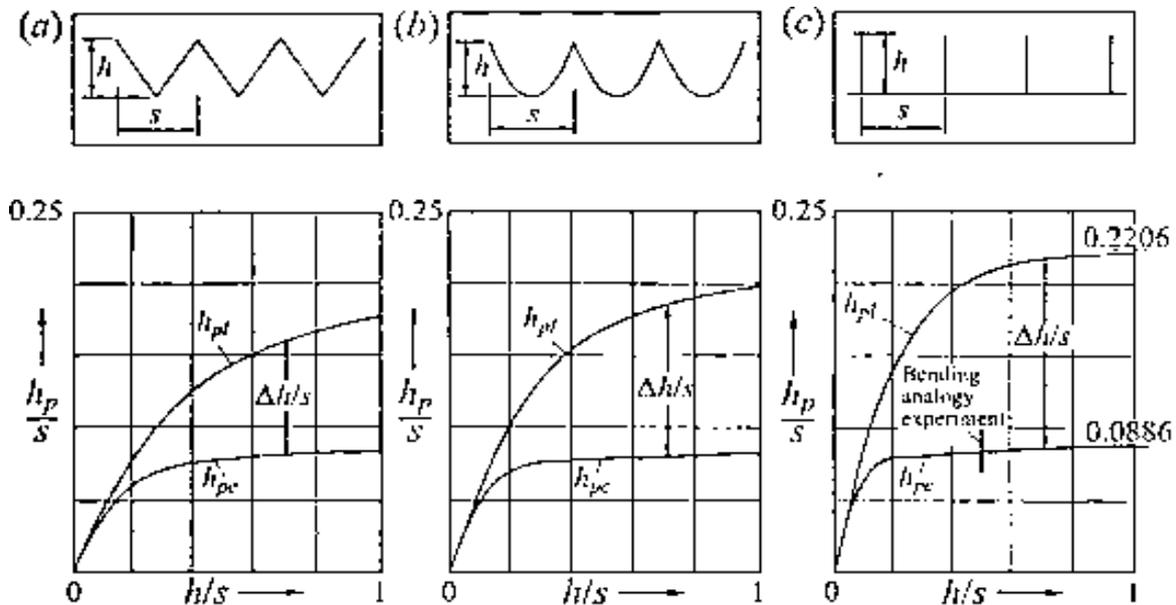


Рис. 3. Продольный (h_{pl}) и поперечный (h_{pc}) поток высоты выступа для ребер с (a) треугольной (b) параболической формой и (c) формой лезвия.

На рис. 4 изображены различия высоты выступа для различных конфигураций ребра в зависимости от значения $\Delta h/s$.

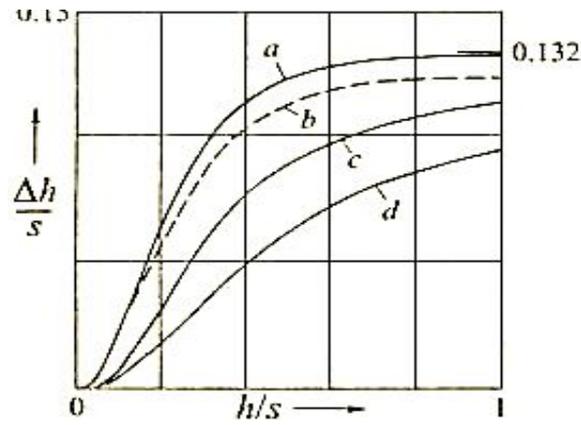


Рис. 4. Различия высоты выступа для различных конфигураций ребра: (а) лезвие ребра, бесконечно тонкое, (b) лезвие ребра, толщина лезвия 2 % бокового интервала ребра, (с) параболическая конфигурация углубления, (d) треугольного ребра

Для выбора оптимальной формы и параметров h и s микро рельефа моделируется кривая сокращения гидродинамического сопротивления и сравнивается с полученными экспериментальными значениями. Для разных случаев моделирования берем из графика (рис. 4) отношение $\Delta h/s$.

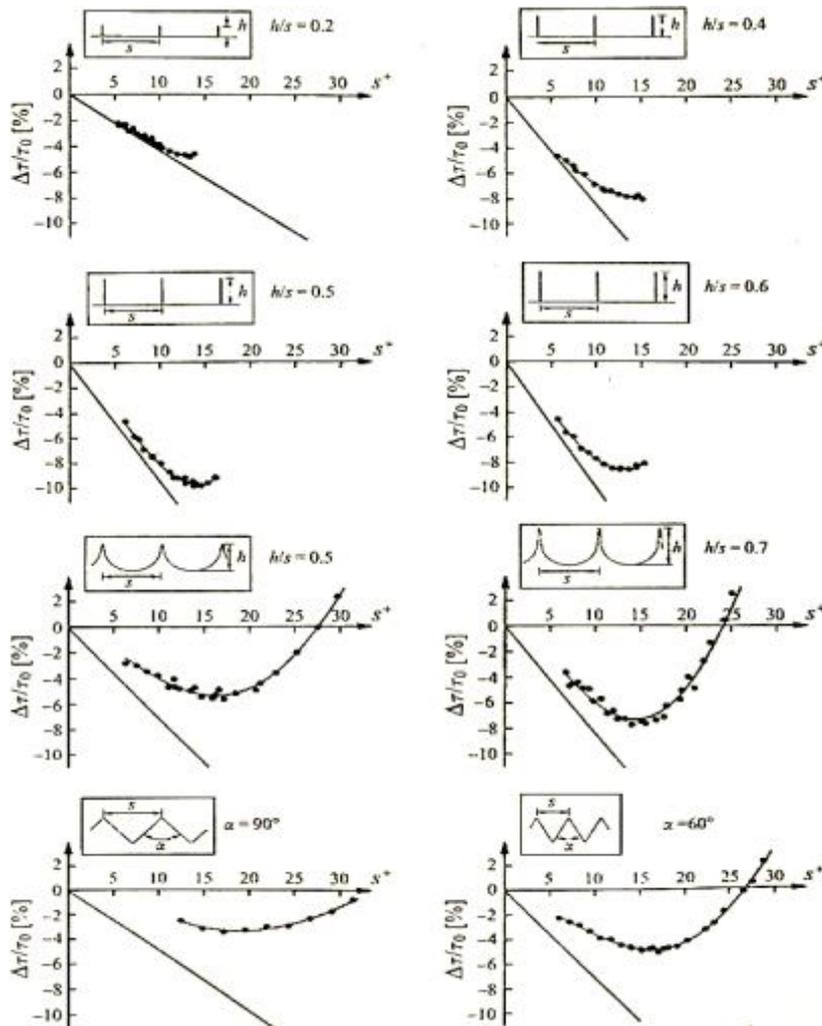


Рис. 5. Диагональная линия – предсказанный начальный наклон перетасенных кривых уменьшения по сравнению с измеряемыми данными. Только для ребер с формой лезвия (верхняя половина рисунка) толщина ребра была принята во внимание

Как видно из рис. 5, только для четырех верхних ребер с данной формой моделирование является в достаточной степени достоверным. Для нижних ребер моделирование по данной формуле является сильно упрощенным, но существует возможность развития исследования влияния данных форм микрорельефа.

Видно также, что небольшая величина отношения h/s улучшает ситуацию. Поэтому для труб большого диаметра нужно стремиться получить как можно меньшее отношение h/s .

Заключение

С использованием экспериментальных данных рассмотрено влияние на поток различной формы ребер на поверхности. Исследовано изменение высоты этих потоков в зависимости от параметров для различных типов ребер. Проведено сравнение смоделированной кривой сокращения гидродинамического сопротивления с полученными экспериментальными значениями.

Литература

1. А.Дж.Рейнольдс. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М. 1979.
2. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry.
3. J. Fluid Mech. (1997), vol. 338, pp. 59-87.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИЛЬФОНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

И. М. Кудрявцева

Научный руководитель – к.т.н. С.С. Гвоздев

В работе приведен алгоритм построения уравнений, описывающих поведение упругого чувствительного элемента сложной формы (на примере сильфона), определенного как объемное тело, в статике и динамике, при различных внешних воздействиях, с помощью аппарата эллиптических функций. С помощью полученных таким образом систем уравнений можно описать процесс деформации и определить динамические характеристики сильфона (представляющего собой твердое тело конечной длины и толщины), такие как внешние действующие силы и возникающие под их действием поля напряжений, в том числе и остаточных. Данный алгоритм также может быть использован для изучения других подобных пространственных элементов.

Введение

Объектом исследования являются цилиндрические гофрированные оболочки (сильфоны), которые находят широкое применение в промышленности при решении разнообразных технических задач (они используются: в качестве чувствительных элементов в различных измерительных и регулирующих приборах; как уплотнители в вакуумной технике; для защиты коммуникаций от воздействия агрессивных сред и так далее).

Творческим научным коллективом двух кафедр СПбГУ ИТМО совместно с теоретическим отделом фирмы ОАО "СПб-ТЕХНОЛОГИЯ" ведутся работы по исследованию упругих элементов приборов. В частности, разработаны математические модели, позволяющие описать изменения профиля сильфонных элементов в рабочем режиме [1], разработана аппаратура для испытаний и контроля [2–4].

Конструкция, размеры и основные параметры сильфонов должны соответствовать ГОСТ: 21482–76, 21754–81, 24553–81, но следует отметить, что на практике часто применяются нестандартные сильфоны. Это можно объяснить несоответствием ГОСТ реально требующимся параметрам функциональных элементов.

При проектировании сильфонов в основном ориентируются на таблицы ГОСТ и на заданные значения максимального давления и максимального прогиба [5].

С развитием компьютерной техники появилась возможность отказаться от различных упрощений и получить более точные решения задач, ранее не достигаемые ввиду большого объема вычислительных операций.

В данной работе кратко объясняются новые принципы построения математического описания сильфонов, которые в дальнейшем лягут в основу их компьютеризированного расчета.

С помощью абелевых функций нами было построено аналитическое описание процесса колебаний сильфона, при котором его ось преобразуется в дугу окружности или некую другую плоскую кривую (случай изгиба), и при осесимметричных сжатиях-растяжениях [6].

Построение алгоритма

В предлагаемом подходе сильфон рассматривается как цилиндрическая оболочка конечной длины и толщины. Внешние и внутренние образующие такого цилиндра представляют собой упругие кривые Эйлера или их модификации, определенные методом кинематической аналогии, где в качестве изображающей динамической системы был взят гироскопический шар Д.К. Бобылева. Данное описание позволяет изучить поля деформаций и напряжений, возникающих в толще реальных оболочек, и описать их

развитие при различных нагрузках, приводящих к возникновению волн деформаций и напряжений, рост амплитуды и частоты которых с необходимостью влечет за собой необратимые изменения геометрии оболочки и разрушение.

Алгоритм получения аналитического описания деформаций сальфона с помощью абелевых функций можно представить следующим образом.

1. Отобразить сальфон на сектор тора (только для изгибных деформаций) и получить уравнение, описывающее данное отображение в эллиптических функциях.

Аналитическое описание сальфона как гофрированной оболочки конечной длины и толщины, находящейся в состоянии покоя (см. рис.1), в эллиптических функциях представлено системой уравнений:

$$\begin{cases} x = b\{-u + 2[E(u + K) - E(K)]\} \\ y = -2 \varepsilon b \operatorname{cn}(u + K) \\ z = \pm \sqrt{a^2 - 4b^2 \varepsilon^2 \operatorname{cn}^2(u + K)} \end{cases}, \quad (1)$$

где b – отношение момента инерции гироскопа в шаре к силе, которой шару сообщается движение; $E(u)$ – эллиптический интеграл II рода; K – эллиптический интеграл I рода; ε – эксцентриситет эллипса, равный модулю эллиптических интегралов k ; $\operatorname{cn}(u)$ – эллиптический косинус; u – аргумент эллиптической функции Якоби; a – радиус осевой окружности сальфона.

Аналитическое описание гофрированной оболочки конечной длины и толщины, отображенной на сектор тора, представлено уравнением восьмого порядка, которое имеет вид:

$$B_1 z^8 + 4B_2 z^6 + 6B_3 z^4 + 4B_4 z^2 + B_5 = 0, \quad (2)$$

где $B = f(a, r, R)$, z – текущее значение координаты по оси OZ; a – радиус осевой окружности тора, r – половина толщины стенки тора; R – радиус осевой линии тора;

$$B_1 = 1,$$

$$B_2 = x^2 + y^2 + a^2 + r^2 - R^2,$$

$$B_3 = (x^2 + y^2)^2 + \left[\frac{2}{3}(a^2 + r^2) - 6R^2 \right] (x^2 + y^2) - \frac{4}{3} a^2 r^2 + (a^2 + r^2 - R^2),$$

$$B_4 = \frac{3}{4}(x^2 + y^2)^3 + \left[\frac{1}{4} - a^2 - r^2 - 3R^2 \right] (x^2 + y^2)^2 + [12a^2 r^2 - (a^2 + r^2 - R^2)(a^2 + r^2 + 3R^2)] (x^2 + y^2) + (a^2 + r^2 - R^2) [(a^2 + r^2 - R^2)^2 - 4a^2 r^2],$$

$$B_5 = (x^2 + y^2)^4 + [4(a^2 + r^2 - R^2) - 8(a^2 + r^2)] (x^2 + y^2)^3 +$$

$$+ [8a^2 r^2 - 10(a^2 + r^2 - R^2)^2 + 16R^2(a^2 + r^2 - R^2) + 16(a^2 + r^2)^2] (x^2 + y^2)^2 +$$

$$+ [(a^2 + r^2 - R^2)^3 (4 + 64a^2 r^2) - (8 + 32a^2 r^2)(a^2 + r^2)(a^2 + r^2 - R^2)^2 - 16a^2 r^2 (a^2 + r^2 - R^2)] (x^2 + y^2) + 16a^4 r^4 + (a^2 + r^2 - R^2)^4 - 8a^2 r^2 (a^2 + r^2 - R^2)^2.$$

Для получения аналитического описания изогнутого сальфона и его радиусов кривизны в состоянии покоя через эллиптические функции нужно преобразовать его по Ахизеру [6]:

$$B_1 (z^2)^4 + 4B_2 (z^2)^3 + 6B_3 (z^2)^2 + 4B_4 z^2 + B_5 = 0, \quad (3)$$

$$4K^3 - g_2 K - g_3 = 0, \quad (4)$$

где $g_2 = B_1 B_5$, $g_3 = \begin{vmatrix} B_1 & B_2 & B_3 \\ B_2 & B_3 & B_4 \\ B_3 & B_4 & B_5 \end{vmatrix}$, $K = \wp(u)$, $\wp(u) - e_3 = \frac{1}{\operatorname{sn}^2 u}$, e_1, e_2, e_3 – корни урав-

нения (4).

2. Пользуясь данными уравнениями, построить выражения для главных кривизн K и H исследуемого тела через эллиптические функции (взять различные производные вышеперечисленных уравнений и составить их комбинации).

K – Гауссова кривизна поверхности,

$$K = \frac{rt - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2}, \quad (5)$$

H – средняя кривизна поверхности,

$$H = \frac{r(1 + q^2) - 2pqs + t(1 + p^2)}{2(1 + p^2 + q^2)^{3/2}}, \quad (6)$$

где r, t, s, p, q – коэффициенты, различные для каждого вида деформации.

Для осесимметричных колебаний сильфона (поперечного его сжатия-растяжения) коэффициенты, входящие в уравнения (5) и (6), имеют вид производных системы уравнений (1):

$$p = \frac{\frac{\partial z}{\partial \varepsilon}}{\frac{\partial x}{\partial \varepsilon}}; \quad q = \frac{\frac{\partial z}{\partial \varepsilon}}{\frac{\partial y}{\partial \varepsilon}}; \quad r = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial \varepsilon^2}}{\frac{\partial^2 x}{\partial \varepsilon^2}};$$

$$s = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial \varepsilon^2}}{\frac{\partial x}{\partial \varepsilon} \frac{\partial y}{\partial \varepsilon}}; \quad t = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial \varepsilon^2}}{\frac{\partial^2 y}{\partial \varepsilon^2}}.$$

Для изгибных деформаций сильфона те же коэффициенты имеют вид следующих производных уравнения (4):

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}; \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}; \quad r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}; \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}.$$

3. Составить уравнение Кельвина, дающее выражение энергии деформации рассматриваемого тела через две ее кривизны [7]:

$$W = 2D H^2 - 2(1 - \sigma) K; \quad (7)$$

где W – энергия деформации, равная той энергии, которую надо приложить к плоской пластинке для преобразования ее в сильфон, D – цилиндрическая жесткость,

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)};$$

E – модуль упругости материала, σ – коэффициент Пуассона, $h = 2r$ – толщина оболочки.

4. Построить производные по различным координатам от уравнения Кельвина для получения аналитического описания процесса деформации в абелевых функциях.

$$\frac{\partial W}{\partial x}; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\partial W}{\partial z}.$$

С помощью полученных таким образом систем уравнений можно описать процесс деформации и определить динамические характеристики сильфона (представляющего собой твердое тело конечной длины и толщины), такие как внешние действующие силы и возникающие под их действием поля напряжений, в том числе и остаточных, в абелевых функциях.

5. Построить производные от главных кривизн (5) и (6) по эксцентриситету эллипса (модулю эллиптических интегралов) для получения аналитического описания однонаправленной деформации сильфона, с учетом изменения его длины.

6. Построить вторые производные от главных кривизн (5) и (6) по эксцентриситету эллипса для получения аналитического описания периодической деформации исследуемого тела.

Далее, имея аналитическое описание исследуемых деформаций сальфона, нужно выделить требуемые его параметры, например:

1) длина дуги образующей поверхности сальфона определяется как

$$l = b \operatorname{am} u, \quad (8)$$

где $\operatorname{am} u$ – обозначение Якоби аргумента тригонометрической функции эллипса; b – коэффициент, равный отношению момента инерции гироскопа в шаре к силе, которой шару сообщается движение.

2) полная длина сальфона определяется произведением:

$$L = 2bN(2E - K), \quad (9)$$

где N – число гофров сальфона,

$$K = \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{(1-x^2)(1-\varepsilon^2 x^2)}}; \quad E = \int_0^1 \frac{\sqrt{1-\varepsilon^2 x^2} dx}{\sqrt{1-x^2}} ..$$

Так как полная длина сальфона и длины дуг кривых, лежащих на поверхности, ограничивающей сальфон, выражаются через эллиптические функции и интегралы, то искомые уравнения аналитического описания измеряемых линейных характеристик (8) и (9) сальфона при однонаправленной деформации можно получить дифференцированием уравнений (8) и (9) по эксцентриситету ε .

Выразив все необходимые параметры сальфона и определив действующие нагрузки, можно приступить к программной реализации данного алгоритма и расчету заданных или требуемых параметров сальфонов, что является нашей дальнейшей задачей.

Пример использования данного алгоритма приведен в работе авторов [8].

Заключение

В работе на примере сальфона мы рассмотрели алгоритм построения уравнений, описывающих поведение упругого чувствительного элемента сложной формы, определенного как объемное тело, при различных внешних воздействиях (изгибных и торцевых) в эллиптических функциях. В ходе работы мы выяснили, что для достижения поставленной задачи сначала необходимо найти аналитическое описание исследуемого тела в статике и по нему составить уравнение Кельвина. Далее, посредством построения первой и второй производной данного уравнения по эксцентриситету эллипса, равного модулю эллиптических интегралов, мы получаем аналитическое описание однонаправленных и периодических деформаций цилиндрической гофрированной оболочки с использованием эллиптических функций. Волновые уравнения, описывающие изучаемые колебания, требуют подробного анализа с целью идентификации входящих в него коэффициентов, параметров реальных сальфонов и различных физических величин, что является нашей дальнейшей задачей.

Литература

1. Ткалич В.Л., Мануйлов К.В., Ильина Л.П., Рыбакова Н.А., Михеева О.Д. Разработка аналитического описания процессов деформаций и напряжений, возникающих при нелинейных колебаниях в упругих элементах // Тезисы Юбилейной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 100-летию университета. СПб ГИТМО (ТУ), 29-31 марта 2000, с.20.
2. Ткалич В.Л., Гвоздев С.С., Суровый И.С. Экспериментальная установка для исследования влияния присоединенных масс на динамические характеристики сальфонных компенсаторов // Тезисы Юбилейной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 100-летию университета. - СПб, 29-31 марта 2000, СПб ГИТМО (ТУ), ч. 2., с 38.

3. Ткалич В.Л., Гвоздев С.С., Суворый И.С. Оптический метод и устройство для контроля геометрических параметров сильфонов // Тезисы Международной конференции " Прикладная оптика-98" . ГОИ им. С.И. Вавилова Санкт-Петербурга. 16-18 дек. 1998, В.Н.Ц. " ГОИ им. С.И. Вавилова" , с.48.
4. Ткалич В.Л., Гвоздев С.С. Использование КТ и ЯМР томографии для анализа структурных дефектов полимерных сильфонных клапанов // Депонировано в ВИНИТИ 07.10.98, № 2954-В98., 5 с.
5. Андреев Г.Н., Марков Б.Н., Педь Е.И. Теория механизмов и детали точных приборов. М.: Машиностроение, 1987, с.175.
6. Ахиезер Н.И. Элементы теории эллиптических функций // М: Наука, 1970.
7. Ляв А. Математическая теория упругости. М-Л.: ОНТИ, 1936 г.
8. Кудрявцева И.М., Гвоздев С.С., Ильина Л.П., Мануйлов К.В. Аналитическое описание колебаний цилиндрических гофрированных оболочек // Труды Пятой сессии международной научной школы " Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем" , 27.06-5.07.2002, С-Пб – СПб, 2002, С 141 – 147

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СКВТ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

И.Н. Жданов

Научный руководитель – к.т.н., доц. В.А. Сеницын

Рассматривается структура микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ; разрабатывается математическая модель системы, реализующей данную структуру, оцениваются точностные показатели разработанной системы, формулируются требования к микропроцессорной базе, на которой возможна ее реализация.

Введение

К числу актуальных проблем современной электромеханики и преобразовательной техники относится проблема создания комплексов позиционирования и слежения для оптико-механических систем. При этом точность слежения при инфранизких скоростях вращения в значительной степени определяется конструктивными особенностями опорно-поворотного устройства, принципами построения датчиков координат состояния и спецификой реализации алгоритмов управления.

В качестве датчиков положения широкое распространение получили синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), определение угла с помощью которых происходит по принципу "угол-параметр-код". Существующие оптические датчики, например, фирмы Heidenhain, позволяют определять угол с погрешностью в сотые доли угловых секунд, однако имеют на несколько порядков большую стоимость.

Одна из особенностей СКВТ – сложность преобразований при обработке выходных сигналов этого датчика. Классические системы обработки, реализованные на аналоговых блоках, решают данную задачу путем аналоговых преобразований. Точность всей системы зависит в этом случае от точности операционных усилителей, точности АЦП, аналоговых умножителей и т.д., а параметры этих элементов меняются в зависимости от температуры, с течением времени и др. Отсюда следует сложность и дороговизна интегрированных схем, выполняющих данную задачу. Реализация такой системы с использованием микроконтроллера позволяет существенно снизить стоимость при сохранении той же точности.

Структурная схема системы обработки сигналов СКВТ

Рассмотрим принцип действия подобных систем обработки сигналов СКВТ. Датчик состоит из трех обмоток – обмотки возбуждения и двух вторичных обмоток. Опорное напряжение подается на обмотку возбуждения СКВТ, а с вторичных обмоток снимаются выходные сигналы, которые в идеальном случае можно представить как:

$$V1 = \sin(\omega t) \sin \theta,$$

$$V2 = \sin(\omega t) \cos \theta.$$

Одним из методов решения является построение системы в виде замкнутого контура регулирования, где в качестве регулируемой величины используется вычисляемое цифровое значение угла поворота вала. При данном методе сигнал с цифрового выхода подается на функциональные генераторы. Вырабатываемые генераторами сигналы используются для изменения цифрового сигнала таким образом, чтобы его значение стало точно соответствовать положению вала СКВТ. Равновесное состояние достигается всякий раз, когда выходной сигнал соответствует положению вала.

Схема такой системы показана на рис.1. Сигналы, соответствующие угловому положению роторного вала θ в формате СКВТ, поступают на входы функциональных генераторов. На эти генераторы подается также сигнал, соответствующий углу Φ по цифровому выходу. Сигналы с функциональных генераторов поступают в схему срав-

нения, формирующую сигнал, определяемый разностью $\theta - \Phi$, т.е. рассогласованием между положением вала и угловым эквивалентом цифрового кода на выходе.

Цифровой входной сигнал соответствует углу Φ . В умножителе функциями этого угла являются $\sin(\Phi)$ и $\cos(\Phi)$. Выходные сигналы отдельных функциональных генераторов имеют вид

$$V_a = v_1 \cos(\Phi), \quad V_b = v_2 \sin(\Phi),$$

т.е.

$$V_a = \sin(\omega t) \sin(\theta) \cos(\Phi), \quad V_b = \sin(\omega t) \cos(\theta) \sin(\Phi).$$

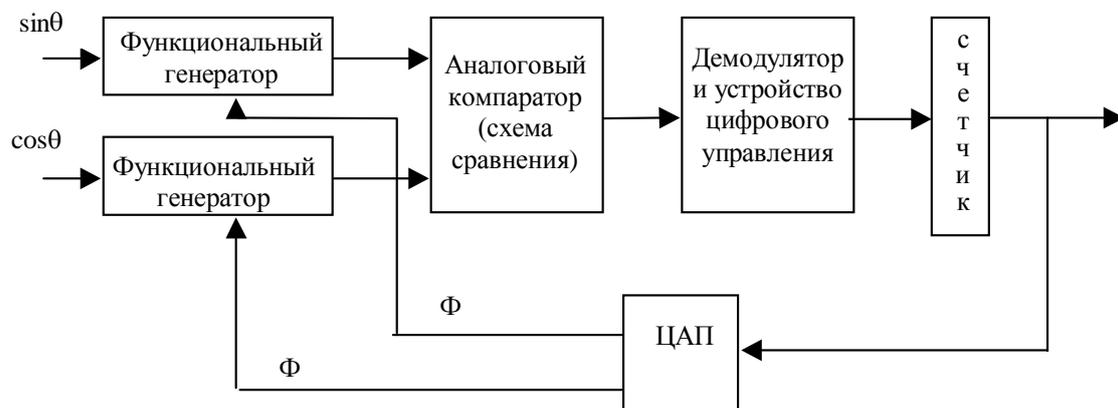


Рис.1. Преобразователь с функциональными генераторами

Оба выходных сигнала подаются затем на дифференциальный усилитель, формирующий сигнал рассогласования

$$V_e = V_a - V_b = \sin(\omega t) \sin(\theta - \Phi).$$

Микропроцессорная система подразумевает реализацию необходимых функциональных преобразований на основе цифровых сигнальных процессоров.

Структурная схема микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ представлена на рис. 2.

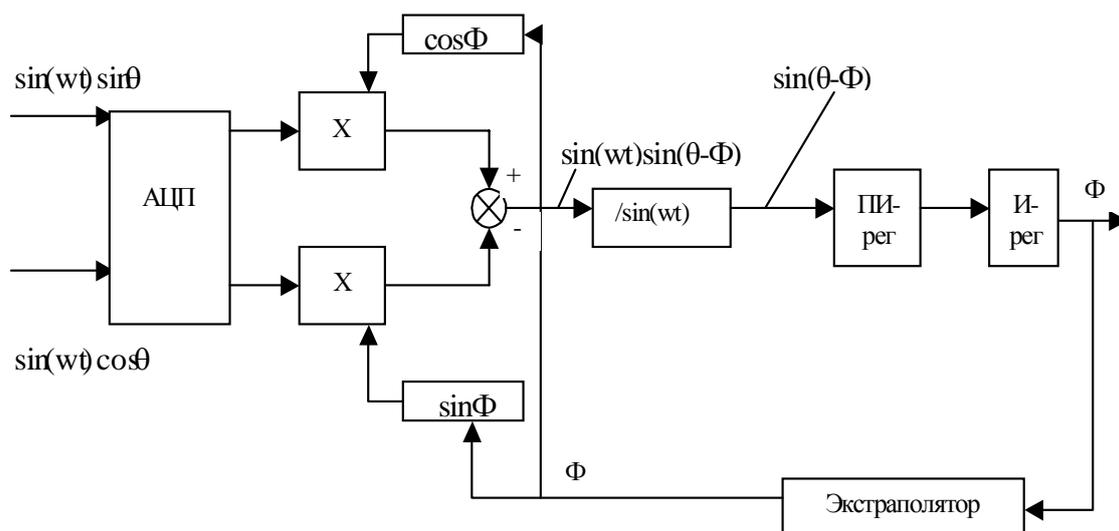


Рис.2. Структурная схема микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ

Для повышения точности используются двухотсчетные СКВТ, содержащие датчик грубого отсчета с электрической редукцией, равной единице в пределах угла поворота ротора $0-360^\circ$, и многополюсный ВТ точного отсчета с электрической редукцией 2^n .

При реализации такой системы для достижения приемлемых точностных показателей необходимо использовать микропроцессор с 32-х разрядным вычислительным ядром и быстродействием не менее 20 миллионов операций в секунду; четырехканальный аналого-цифровой преобразователь с временем преобразования не более 10 мкс и цифро-аналоговый преобразователь для формирования опорного сигнала.

Поскольку объектом регулирования является интегратор (рис 2), то его входной сигнал представляет собой код скорости вала, что увеличивает возможности данной системы.

Моделирование микропроцессорной системы

В пакете MathCad была разработана математическая модель микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ с сохранением той же последовательности и разрядности вычислений, что позволяет оценить величину ошибки, возникающей вследствие конечной разрядности и дискретности цифровой системы.

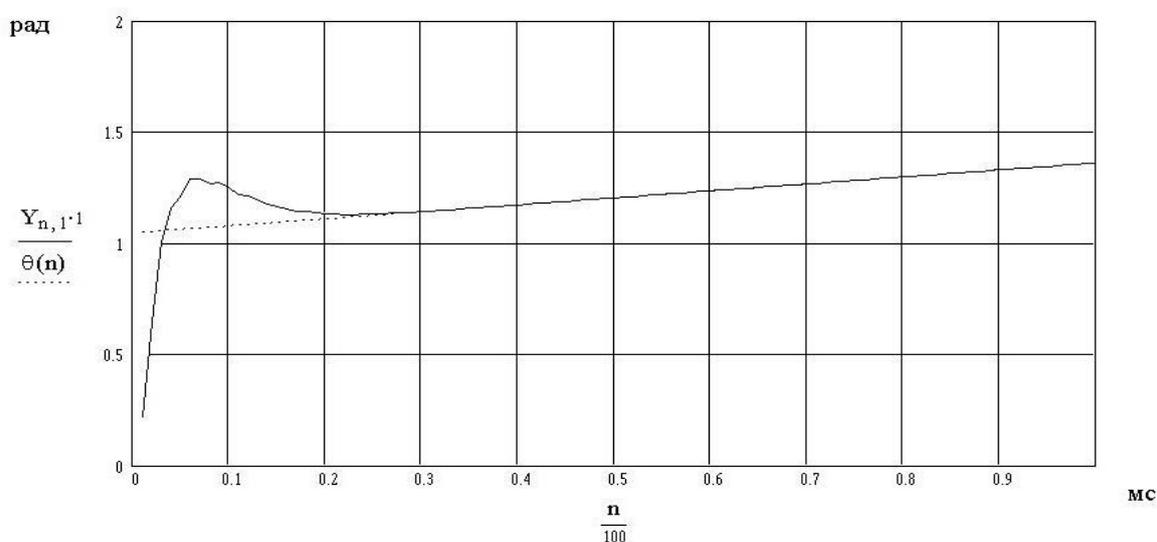


Рис. 3. Отслеживание системой угла при постоянной скорости вращения вала

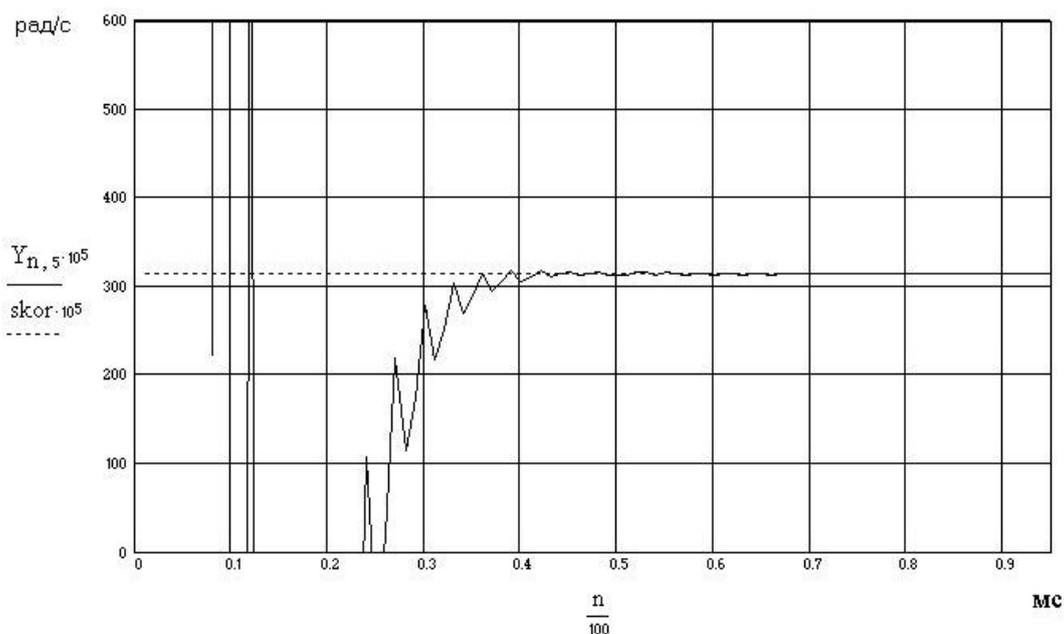


Рис. 4. Определение скорости вращения вала. $Y_{n,5}$ – вычисленное значение скорости, $skor$ – действительное значение

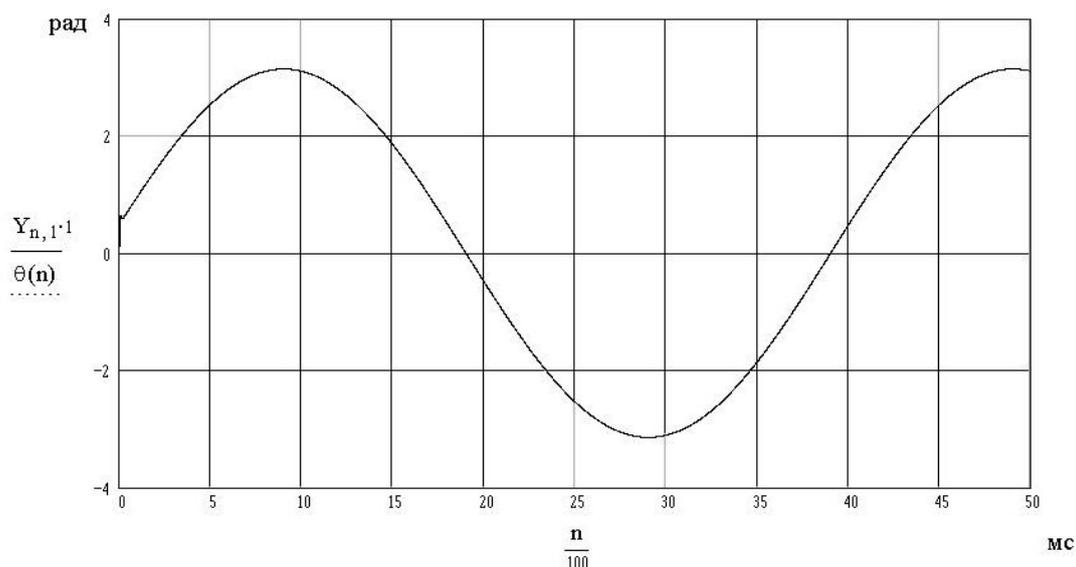


Рис. 5 Отслеживание системой угла при изменении угла положения вала по синусоидальному закону

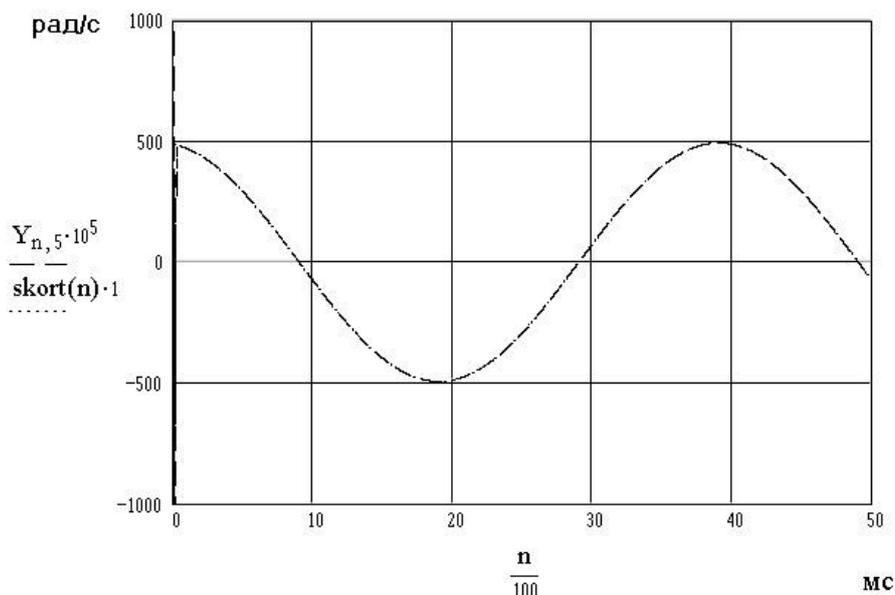


Рис. 6 Определение скорости вращения вала. $Y_{n,5}$ – вычисленное значение скорости, $skort(n)$ – действительное значение скорости

При обработке сигналов двухотсчетного датчика типа ВТ100 были получены следующие результаты:

- при вращении с постоянной скоростью 50 об/с (рис. 3,4) угловая ошибка составляет 1", скоростная ошибка составляет 0,2 %;
- при ускоренном вращении, если угол изменяется по синусоидальному закону с частотой 25 Гц (рис 5,6), угловая ошибка достигает 20", скоростная ошибка – 3 %.

Заключение

Реализация систем обработки сигналов СКВТ, используемого в качестве датчика положения, на современной микропроцессорной базе расширяет область применения таких систем, позволяет легко программно адаптировать систему на требуемый режим

работы. Разработанная математическая модель позволяет оценить точностные и динамические показатели системы, выбрать наиболее подходящую по параметрам микропроцессорную базу для реализации данной системы. Точность определяемых величин сравнима с точностью аналоговых систем, выполняющих ту же задачу.

Литература

1. Л.А. Баранов. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Дж. Вульвет. Датчики в цифровых системах. М.: Энергоиздат, 1981.
3. Р. Изерман. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984.
4. Practical design techniques for sensor signal conditioning. Analog Devices, Inc., 1999.

ВИРТУАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д.В. Лукичев

Научный руководитель – к.т.н., доц. А.А. Усольцев

В статье предлагается достаточно простой и легко воспроизводимый способ построения полной механической характеристики, а также круговой диаграммы асинхронного двигателя в пакете MATLAB / Simulink. Изложенный материал может быть полезен в учебном процессе: в лекционных демонстрациях и при выполнении так называемых виртуальных лабораторных работ в пакете MATLAB / Simulink по курсу "Электрические машины".

1. Введение

В последнее время в учебном процессе появилась практика проведения виртуальных лабораторных работ в пакете MATLAB / Simulink, в том числе и по предметам электромеханического цикла [1]. Это связано не только с тем, что оснащение учебных лабораторий оставляет желать лучшего, но и с тем, что MATLAB и его пакеты расширения Simulink и Power System позволяют исследовать процессы и параметры, которые зачастую недоступны в реальных объектах. В библиотеках этих пакетов имеются многочисленные виртуальные элементы и измерительные приборы, позволяющие исследовать электрическую цепь любой сложности. Но не всегда использование одних лишь стандартных блоков оказывается достаточным для оптимального решения какой-либо специфической задачи.

Основной трудностью при получении механической характеристики асинхронного двигателя в различных прикладных пакетах является его опрокидывание при выходе на неустойчивые участки. В [1] механическую характеристику асинхронного двигателя предлагается строить по точкам, последовательно задавая момент нагрузки и сохраняя полученную при этом скорость вращения. При такой методике точки механической характеристики могут быть получены только на участке устойчивой работы, а снятие режима короткого замыкания требует дополнительного изменения в модели. Помимо этого, к недостаткам данного подхода можно отнести, во-первых, его трудоемкость, поскольку качество полученной характеристики напрямую зависит от количества точек, а во-вторых, полное отсутствие информации о поведении асинхронной машины на неустойчивом участке работы.

Для глубокого понимания работы асинхронных машин необходимо знать, как будут изменяться токи, потери, КПД и $\cos \varphi$ при вариации нагрузки на валу. Эти показатели при изменении скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ с достаточной точностью позволяет определить круговая диаграмма, которая имеет важное значение в теории и до сих пор используется для построения рабочих характеристик.

Рассмотрим, в чем же состоит особенность кривой механической характеристики асинхронного двигателя и как обеспечить возможность автоматического построения непрерывной, полной механической характеристики асинхронного двигателя (МХ АД) и его круговой диаграммы.

2. Механическая характеристика и устойчивость работы асинхронного двигателя

Уравнение динамики электромеханической системы имеет следующий вид [2]

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}, \quad (2.1)$$

где M , J , $\Omega = \Omega_c$, M_c – соответственно электромагнитный момент, развиваемый машиной, ее момент инерции и частота вращения, а также момент сопротивления на ее валу.

Из (2.1) следует, что для устойчивой работы двигателя, приводящего в действие какой-либо производственный механизм, необходимо определенное сочетание параметров механических характеристик двигателя $M(\Omega)$ и нагрузки $M_c(\Omega)$. Двигатель работает устойчиво, когда жесткость его механической характеристики в точке статического равновесия (при $M = M_c$) меньше жесткости нагрузки

$$\frac{dM}{d\Omega} < \frac{dM_c}{d\Omega} \quad (2.2)$$

Чаще всего для анализа работы двигателя в различных программных пакетах используется статическая нагрузка (прямая 2 на рис.1), которая задается либо скачком (Step), либо постоянным значением (Constant). Тогда механическая характеристика АД (кривая 1) может быть условно разделена на три участка: участок статической устойчивости AB и два участка неустойчивой работы двигателя - ADD' и BCC' .

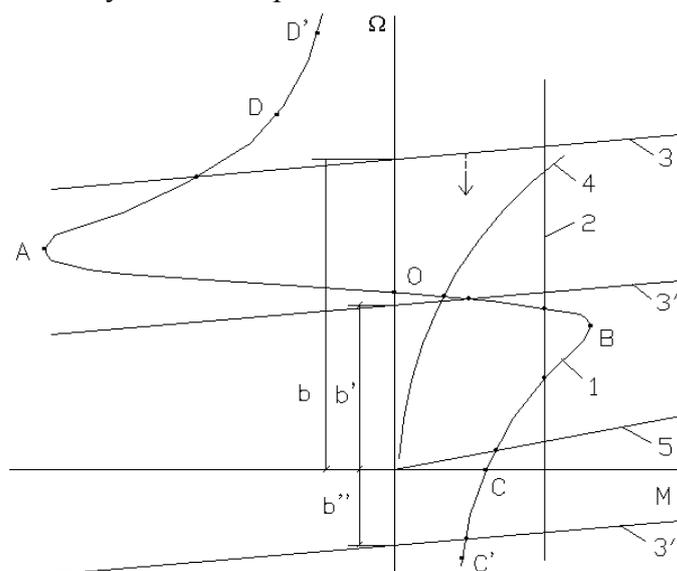


Рис. 1. Механические характеристики АД и некоторых производственных механизмов.

Если машину нагрузить статическим положительным (отрицательным) моментом, то при его значениях, больших максимального электромагнитного момента в двигательном (генераторном) режиме, появляется некомпенсируемый ускоряющий момент $(M - M_c)$, и частота вращения начинает стремительно падать по кривой механической характеристики 1. В таком случае говорят об опрокидывании двигателя, и получение статически устойчивых точек является невозможным.

Известно, что полная статическая устойчивость наблюдается при работе АД на вентиляторную нагрузку (кривая 4), которая обеспечивает выполнение условия (2.2) в двигательном режиме. Однако в других режимах для получения устойчивой работы такую нагрузочную характеристику необходимо видоизменять, причем это изменение напрямую зависит от того, в каком из режимов работает машина, что, несомненно, является весьма трудоемкой задачей, требующей составления сложных алгоритмов. Нетрудно заметить, что для нагрузочного механизма, характеризуемого линейной зависимостью вида 3 (рис. 1), условие статической устойчивости выполняется в каждой точке, поэтому на всех участках механической характеристики двигателя будет работать устойчиво. Выражение для механической характеристики нагрузки такого типа в общем виде запишется как

$$\Omega_c = a \cdot M_c + b, \quad (2.3)$$

где a , b - угол наклона и смещение характеристики относительно оси момента.

Отсюда получим уравнение для момента нагрузки, имеющего линейную характеристику, в точке статического равновесия

$$M_c = \alpha \cdot [\Omega - b], \quad (2.4)$$

где $\alpha = \frac{\Delta M_c}{\Delta \Omega} = \frac{1}{a}$ – жесткость механической характеристики.

Таким образом, вариация значений коэффициентов a и b , обеспечивающих выполнение условия (2.2), позволяет нам получать статически устойчивую работу двигателя во всем диапазоне скоростей. Наиболее просто это достигается

- изменением жесткости $\alpha = \frac{1}{a}$ нагрузки при неизменном b ;
- изменением величины смещения b при постоянной α .

При достаточно большом диапазоне изменения скольжений можно определить также координаты вектора тока статора i_1 в статическом режиме и, представив их в графической форме, получить круговую диаграмму машины.

3. Выбор и обоснование функции нагрузочной характеристики при построении статических характеристик АД

Если представить момент нагрузки линейной функцией, проходящей через начало координат ($b = 0$: линия 5), то из (2.4) получим следующее уравнение

$$M_c = \alpha \cdot \Omega. \quad (3.1)$$

Изменяя жесткость α , мы тем самым будем менять угол наклона характеристики нагрузки к оси момента, что позволит получать различные точки статического равновесия на МХ АД. Но для рассматриваемой нагрузки условие статической устойчивости (2.2) не выполняется в области отрицательных скольжений при $s < -s_k$, а также при $s \geq 1$, где в точке короткого замыкания жесткость МХ нагрузки имеет разрыв. В этой точке вообще невозможно создать нагрузку, поскольку при этом ее МХ должна иметь бесконечно большую жесткость.

Обратимся теперь ко второму предложенному способу.

Если в выражении (2.4) параметр нагрузки α выбрать таким образом, что данная величина будет заведомо больше максимальной жесткости МХ АД, то условие статической устойчивости будет обеспечиваться во всем диапазоне скоростей.

Было получено выражение максимальной жесткости МХ АД, по которому построены зависимости максимальной жесткости в функции скольжения для двигателей серии 4А [4]. Анализ данных зависимостей показал, что для устойчивой работы АД данной серии жесткость характеристики нагрузки должна удовлетворять следующему условию:

$$\alpha_{\min} \geq \frac{|M_{\max}|}{\Omega_1} \cdot \frac{1}{s_k}. \quad (3.2)$$

Уменьшение смещения характеристики нагрузки b при неизменной жесткости с начальной положительной величины в зону отрицательных значений показано на рис. 1 (характеристики 3, 3' и 3'' соответственно), что позволяет нам получать точки статического равновесия на кривой МХ АД.

Однако следует учесть, что при моделировании МХ возможна динамическая ошибка, связанная с тем, что нагрузочный момент АД изменяется во времени с некоторой скоростью. Оценим эту ошибку, пользуясь уравнением движения (2.1). Для линеаризации этого уравнения представим все величины через установившиеся значения и приращения в виде

$$M = M_0 + \alpha \cdot \Delta \Omega; \quad M_c = M_0 + \alpha_c \cdot \Delta \Omega; \quad \Omega = \Omega_0 + \Delta \Omega = C \cdot t + \Delta \Omega, \quad (3.3)$$

где $\Delta\Omega$ и C – соответственно приращение и скорость изменения частоты вращения.

Тогда

$$\frac{d\Delta\Omega}{dt} = C + \frac{d\Delta\Omega}{dt} \quad (3.4)$$

Подставляя эти выражения в (2.1), получим

$$\frac{d\Delta\Omega}{dt} + \frac{(\alpha_c - \alpha)}{J} \cdot \Delta\Omega = -C. \quad (3.5)$$

Корень характеристического уравнения и постоянная времени равны соответственно

$$p = -\frac{(\alpha_c - \alpha)}{J}; \quad \tau = \frac{J}{(\alpha_c - \alpha)}. \quad (3.6)$$

Общее решение уравнения (3.5) запишется как

$$\Delta\Omega = -\tau \cdot C \cdot (1 - e^{pt}). \quad (3.7)$$

Установившееся значение приращения частоты вращения представляет собой динамическую ошибку ε , которая по окончании переходных процессов составит величину $-\tau \cdot C$. В знаменателе выражения для τ присутствует постоянная жесткость МХ нагрузки α_c , выбранная из условия (3.2), и переменная жесткость МХ АД – $\alpha = F(s)$. Очевидно, что максимум динамической ошибки при заданной скорости изменения частоты вращения C будет соответствовать максимальному значению постоянной времени

$$\tau_{\max} = \frac{J}{\left(\alpha_c - \frac{|M_{\max-}|}{\Omega_1} \cdot \beta_{\max-}\right)} \quad (3.8)$$

т.е. будет соответствовать экстремуму жесткости в генераторном режиме. Соответственно абсолютное значение динамической ошибки при этом будет равно

$$\varepsilon_{\max} = \tau_{\max} \cdot C. \quad (3.9)$$

Отсюда следует, что:

- надлежащим выбором скорости изменения частоты вращения C всегда можно обеспечить условие $\varepsilon_{\max} < \varepsilon_{\text{дон}}$, т.е. снизить динамическую ошибку до любого наперед заданного допустимого значения $\varepsilon_{\text{дон}}$. Так, для АД серии 4А при скорости изменения частоты вращения $C = 100$ и жесткости МХ нагрузки, выбранной из условия (4.9), динамическая ошибка составляет величину порядка 0,2 – 1% ;
- поскольку уменьшение скорости изменения частоты вращения значительно замедляет моделирование, для снижения динамической ошибки целесообразно увеличивать жесткость МХ нагрузки α_c .

4. Реализация предлагаемого метода построения механической характеристики АД

Обобщенная виртуальная установка для исследования асинхронной машины представлена на рис. 2. Модель содержит:

- источник переменного трехфазного напряжения (3-ph. Source);
- исследуемую трехфазную асинхронную машину (Asynchronous Machine);
- универсальный блок измерений (Machines Measurement Demux) для вывода переменных состояний машины;
- блок построения механической характеристики (Mech. Char.);
- блок линейного нарастания коэффициента смещения нагрузки (Ramp);
- блок насыщения (Saturation);

- блок построения круговой диаграммы АД (Circ. Diagram);
- различные графопостроители и блоки измерений.

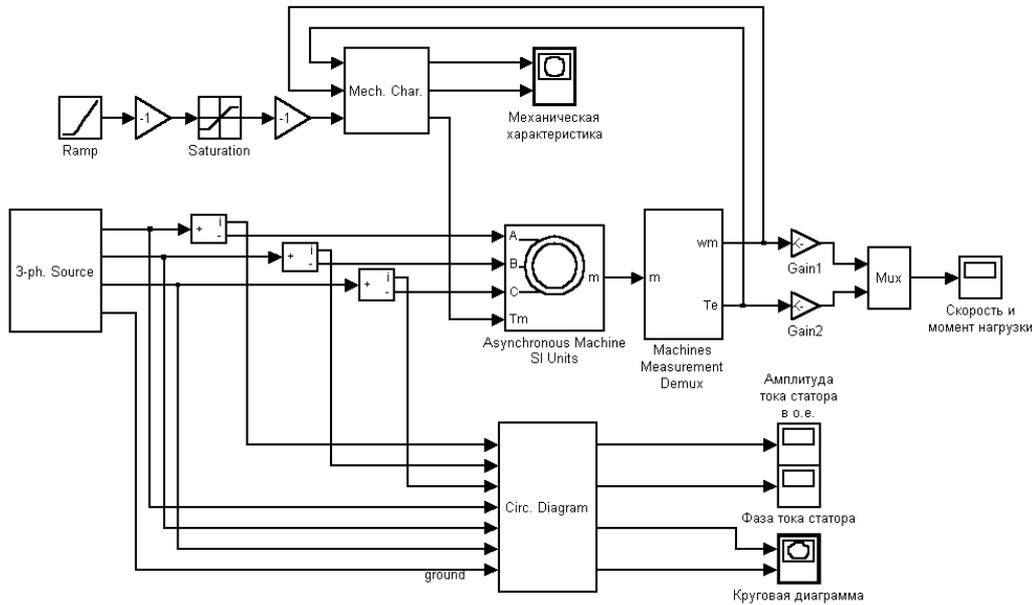


Рис. 2. Модель системы для исследования асинхронного двигателя.

Блок Mech. Char, реализующий алгоритм (2.4), имеет структуру, приведенную на рис. 3.

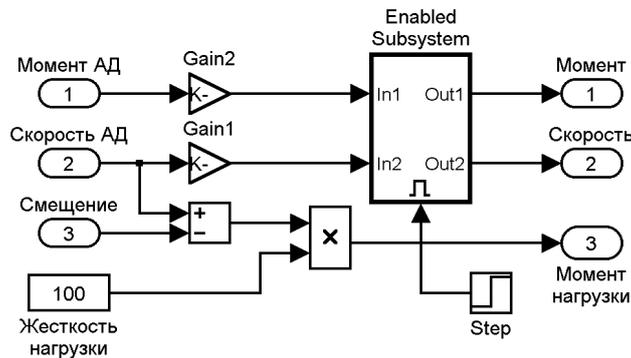


Рис. 3. Блок построения механической характеристики.

Жесткость характеристики нагрузки выбирается из выражения (3.2). Для построения МХ, начиная со второго квадранта, в первый момент времени на вход "Смещение" подается начальное положительное значение коэффициента b из блока Ramp. Для получения режима электромагнитного тормоза при отрицательных значениях момента, смещение выбирается из условия

$$b > 2 \cdot \Omega_1. \quad (4.1)$$

Построение МХ начинается в момент времени t_m после завершения разгона АД с отрицательным моментом нагрузки. При этом в блоке Ramp начинается линейное уменьшение величины смещения со скоростью C , выбранной с учетом выражения (3.9). Значение t_m выбирается из условия окончания электромеханических переходных процессов $t_m \geq 3 \cdot T_m$, где T_m – механическая постоянная, полученная с учетом параметров нагрузки АД. С помощью блока Step, имеющего в момент времени t_m скачок из нуля в единицу и управляющего работой блока Enabled Subsystem, выходные сигналы

"Момент" и "Скорость" до момента времени t_m на графопостроитель не подаются. Блоки Gain1 (коэффициент усиления $\frac{1}{\Omega_1}$) и Gain2 (с коэффициентом $\frac{1}{M_{nom}}$) позволяют привести сигналы скорости и момента к относительным величинам.

На рис. 4 приводится структура блока построения круговой диаграммы АД.

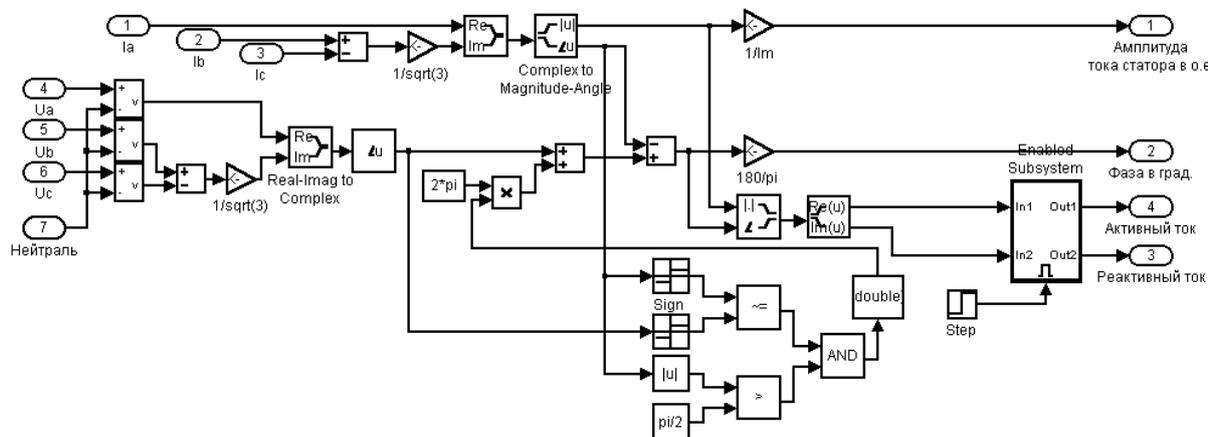


Рис. 4. Блок построения круговой диаграммы АД.

Фазовый угол и величину измеряемого тока и напряжения можно определять с помощью блока Fourier из библиотеки Power System Blockset как это делается в [1]. Такой подход имеет ряд неудобств. Во-первых, для точного вычисления этих параметров требуется выборка определенной длины, а во-вторых, при моделировании системы "источник питания – АД" выходные сигналы блока Fourier имеют пульсации, которые уменьшаются с уменьшением временного шага, что в свою очередь ощутимо замедляет моделирование. Чтобы избежать всего этого, воспользуемся понятием обобщенного вектора. В блоке Circ. Diagram в каждый момент времени по известным токам в фазах статора АД определяется обобщенный вектор тока \underline{i}_1

$$\underline{i}_1 = i_{1\alpha} + ji_{1\beta}, \quad (4.2)$$

где

$$i_{1\alpha} = \text{Re}(\underline{i}_1) = i_{1\alpha}, \quad (4.3)$$

$$i_{1\beta} = \text{Im}(\underline{i}_1) = \frac{i_{1b} - i_{1c}}{\sqrt{3}}. \quad (4.4)$$

Обобщенный вектор напряжения \underline{u}_1 находится аналогичным образом. Далее с помощью стандартных блоков Real-Imag to Complex и Complex to Magnitude-Angle вычисляется модуль и фазовый угол данных векторов относительно момента начала моделирования. Для построения круговой диаграммы требуется определить угол φ между ними. Но, поскольку в блоках Simulink угол принимает значения только от $-\pi$ до $+\pi$, то для получения правильного результата (разности) необходимо продлевать линейную характеристику угла напряжения (уменьшаемое), пока угол тока (вычитаемое) не достигнет своего максимального значения $+\pi$ и не изменится на противоположный.

При изменении момента нагрузки (а, следовательно, и скольжения АД) меняется как значение угла φ , так и значение $|\underline{i}_1|$. Таким образом, точки круговой диаграммы можно получить, откладывая по оси ординат активную составляющую обобщенного вектора тока статора, а по оси абсцисс – соответственно его реактивную составляющую. Получение этих составляющих достигается обратным преобразованием

Magnitude-Angle to Complex – Complex to Real-Imag. Таким образом, блок дает возможность строить графики изменения модуля тока $|i_1|$ в относительных единицах и угла φ в $[град]$, а также позволяет продемонстрировать изменение соотношения активной и реактивной составляющих тока статора в процессе работы АД.

Графики полной механической характеристики АД, а также круговой диаграммы, получающиеся при моделировании, приведены на рис. 5.

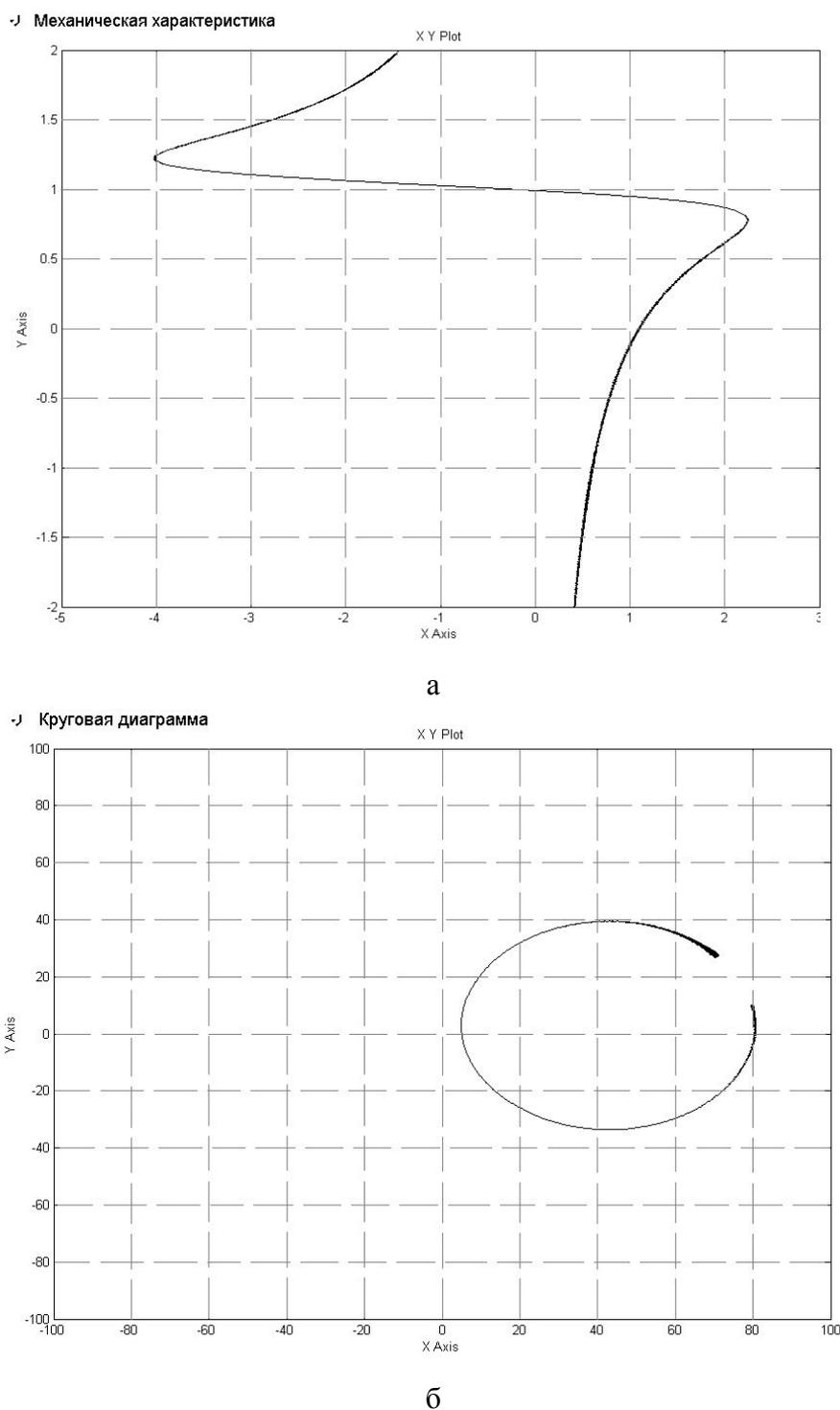


Рис. 5. Механическая характеристика (а) и круговая диаграмма (б) асинхронного двигателя

Чтобы исследовать поведение двигателя в какой-либо точке механической характеристики, достаточно в канал изменения смещения нагрузочной характеристики

включить блок насыщения Saturation (см. рис. 2), который при достижении нужной величины зафиксирует ее, тем самым установив соответствующий данному значению постоянный момент нагрузки. Каждая точка МХ характеризуется двумя параметрами – частотой вращения и моментом. Таким образом, задавая одним из этих параметров, второй можно всегда определить из формулы Клосса [3], а далее, воспользовавшись уравнением (2.4), найти искомое значение смещения b . Двигатель будет устойчиво работать в этой точке, что позволит проанализировать его характеристики.

5. Заключение

Предложенный метод моделирования статических характеристик АД позволяет выбрать параметры нагрузки таким образом, чтобы автоматически построить полную механическую характеристику и круговую диаграмму двигателя. Жесткость модели нагрузки рекомендуется рассчитывать из соотношения $\alpha > \frac{|M_{\max}|}{\Omega_1} \cdot \frac{k}{4 \cdot s_k}$, где $k = 4$ для

машин серии 4А, а скорость изменения смещения задавать из уравнения $C = \frac{\varepsilon_{don}}{\tau_{\max}}$.

Данный подход дает возможность исследовать работу АД в любой точке механической характеристики, а также (при дополнении соответствующими блоками) получить все рабочие характеристики машины.

Литература

1. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
2. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. – 616 с.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. – Машины переменного тока. М.: Госэнергоиздат, 1958. – 651 с.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С РС-НАГРУЗКОЙ

П.А. Борисов

Научный руководитель – к.т.н., доц. В.С. Томасов

Приводится система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистемах различного типа. Предложена методика расчета и проектирования энергетических подсистем на базе выпрямителей с емкостными фильтрами при активном характере нагрузки, даются рекомендации по этапам проектирования.

Введение

Методикам расчета и проектирования энергетических подсистем различного типа уделено достаточно внимания в литературе [1, 2], изданной в 80–90 гг. прошедшего столетия. Поясним, чем же обусловлена необходимость пересмотра и доработки существующих методик расчета и проектирования. В первую очередь это связано с тем, что за последние годы номенклатура полупроводниковых преобразователей значительно расширилась. Применение импульсных методов управления преобразователями с использованием вычислительных устройств на базе программируемых микроконтроллеров отрицательно сказывается на качестве потребляемой из сети электрической энергии. В связи с этим требования международных стандартов, таких как IEC 61000-3, IEEE 519, к качеству энергопотребления с годами постоянно ужесточались. Темпы внедрения подобных стандартов в России до недавнего времени существенно отставали от международных, однако в последние годы ситуация в значительной степени изменилась. Пересмотрены не только требования, предъявляемые к показателям качества электроэнергии ГОСТ 13109-97 "Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения", но и введены новые показатели качества ГОСТ Р 51317.3.2.-99 (МЭК 61000-3-2-95). О государственной значимости этого вопроса свидетельствует принятие Закона "Об электромагнитной совместимости". В целом можно сказать, что с повсеместным распространением преобразовательной техники, ростом единичных мощностей преобразователей и повышением в целом доли нелинейной нагрузки проблема преимущественно сферы преобразовательной техники превращается в проблему электроэнергетики.

Решение задач обеспечения необходимых энергетических показателей и минимизации массогабаритных показателей связано с вопросом определения составляющих полной мощности энергоподсистемы. В изданной на сегодняшний день литературе вопросы, связанные с выделением и определением составляющих полной мощности и показателей качества энергопотребления, решены не в полной мере. Это в первую очередь вызвано как незавершенностью общей теории мощности [3], так и отсутствием фундаментальной системы уравнений, описывающих в общем случае энергопроцессы в несимметричной системе с искаженными формами напряжений и токов.

Следует отметить также, что в большинстве методик расчет электромагнитных нагрузок в энергоподсистеме осуществляется для квазиустановившегося режима работы. В то же время известно [4], что выбор элементов энергоподсистемы без учета электромагнитных нагрузок в течение переходных процессов может привести к выходу из строя полупроводниковых приборов и элементов силового фильтра. Если же элементы выбраны с произвольной n -кратной перегрузочной способностью, то говорить об оптимальности такого выбора нельзя. Подобный подход ведет к ухудшению в первую очередь массогабаритных и, в ряде случаев, динамических показателей энергоподсистемы.

Учитывая все сказанное, очевидно, что внимание к данному вопросу необходимо, своевременно и заставляет заняться пересмотром старых и разработкой новых методик

проектирования энергоподсистем в целом и рассматриваемых далее энергетических подсистем на базе выпрямителей с емкостными фильтрами при активном характере нагрузки в частности.

Предлагаемая в статье методика расчета и проектирования учитывает электромагнитные нагрузки на элементы энергоподсистемы в наиболее тяжелом пусковом режиме, приводятся зависимости энергетических показателей от основных параметров схемы.

Метод исследований и характерные особенности энергоподсистем с RC-нагрузкой

Для решения любой задачи необходимо выбрать метод (аппарат), который позволил бы наиболее эффективно решить ее. В теории мощности в цепях с несинусоидальными токами выделяются два метода: спектральное (ряды Фурье) и интегральное. Определение составляющих полной мощности на основе разложения на гармоники является сложной и трудоемкой операцией [5]. Однако требования международных стандартов IEC 61000-3, IEEE 519, EN 61000-3-2 жестко регламентируют уровень гармонических составляющих потребляемого из сети тока вплоть до 49 гармоники. Таким образом, необходимость использования спектрального подхода очевидна.

Известно [4], что при расчете и проектировании энергоподсистемы необходимо анализировать переходные процессы в системе, которые вызываются коммутацией цепи нагрузки. Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от одного энергетического состояния к другому. Основой решения задач по переходным процессам является приведение задачи к решению соответствующего дифференциального уравнения. В общем случае в решение дифференциального уравнения входят синусные и косинусные составляющие (принужденные), экспоненциальная составляющая (свободная) и постоянная составляющая. Таким образом, если разложить в ряд Фурье все составляющие возмущения на интервале коммутации, то полученная система выражений и даст аппарат для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистеме. Необходимая система выражений была получена с использованием преобразований Эйлера:

$$A_{\sin 0} = K_{\sin} [(\cos \phi_1 - \cos \phi_2) / 2\pi], \quad (1.1)$$

$$A_{\sin 1} = K_{\sin} [(\cos 2\phi_1 - \cos 2\phi_2) / 4\pi], \quad (1.2)$$

$$B_{\sin 1} = K_{\sin} [\{(\phi_2 - \phi_1) / 2\pi\} - \{(\sin 2\phi_2 - \sin 2\phi_1) / 4\pi\}], \quad (1.3)$$

$$A_{\sin k} = K_{\sin} \left[\frac{\cos\{(1-k)\phi_1\} - \cos\{(1-k)\phi_2\}}{2\pi(1-k)} + \frac{\cos\{(k+1)\phi_1\} - \cos\{(k+1)\phi_2\}}{2\pi(k+1)} \right], \quad (1.4)$$

$$B_{\sin k} = K_{\sin} \left[\frac{\sin\{(k-1)\phi_2\} - \sin\{(k-1)\phi_1\}}{2\pi(k-1)} - \frac{\sin\{(k+1)\phi_2\} - \sin\{(k+1)\phi_1\}}{2\pi(k+1)} \right], \quad (1.5)$$

$$A_{\cos 0} = K_{\cos} [(\sin \phi_2 - \sin \phi_1) / 2\pi], \quad (2.1)$$

$$A_{\cos 1} = K_{\cos} [\{(\phi_2 - \phi_1) / 2\pi\} + \{(\sin 2\phi_2 - \sin 2\phi_1) / 4\pi\}], \quad (2.2)$$

$$B_{\cos 1} = K_{\cos} [(\cos 2\phi_1 - \cos 2\phi_2) / 4\pi], \quad (2.3)$$

$$A_{\cos k} = K_{\cos} \left[\frac{\sin\{(k-1)\phi_2\} - \sin\{(k-1)\phi_1\}}{2\pi(k-1)} + \frac{\sin\{(k+1)\phi_2\} - \sin\{(k+1)\phi_1\}}{2\pi(k+1)} \right], \quad (2.4)$$

$$B_{\cos k} = K_{\cos} \left[\frac{\cos\{(k-1)\phi_1\} - \cos\{(k-1)\phi_2\}}{2\pi(k-1)} + \frac{\cos\{(k+1)\phi_1\} - \cos\{(k+1)\phi_2\}}{2\pi(k+1)} \right], \quad (2.5)$$

$$A_{\exp 0} = K_{\exp} [\omega (\exp^{-\frac{\sigma \phi_1}{\omega}} - \exp^{-\frac{\sigma \phi_2}{\omega}}) / 2\pi\sigma], \quad (3.1)$$

$$A_{\text{exp}k} = K_{\text{exp}} \left[\frac{\omega \{ \exp^{-\frac{\sigma\phi_2}{\omega}} (k\omega \sin(k\phi_2) - \sigma \cos(k\phi_2)) - \exp^{-\frac{\sigma\phi_1}{\omega}} (k\omega \sin(k\phi_1) - \sigma \cos(k\phi_1)) \}}{\pi \{ \sigma^2 + (k\omega)^2 \}} \right], \quad (3.2)$$

$$B_{\text{exp}k} = K_{\text{exp}} \left[\frac{\omega \{ \exp^{-\frac{\sigma\phi_1}{\omega}} (\sigma \sin(k\phi_1) + k\omega \cos(k\phi_1)) - \exp^{-\frac{\sigma\phi_2}{\omega}} (\sigma \sin(k\phi_2) + k\omega \cos(k\phi_2)) \}}{\pi \{ \sigma^2 + (k\omega)^2 \}} \right], \quad (3.3)$$

$$A_{\text{const}0} = K_{\text{const}} [(\phi_2 - \phi_1) / 2\pi], \quad (4.1)$$

$$A_{\text{const}k} = K_{\text{const}} [(\sin(k\phi_2) - \sin(k\phi_1)) / \pi k], \quad (4.2)$$

$$B_{\text{const}k} = K_{\text{const}} [(\cos(k\phi_1) - \cos(k\phi_2)) / \pi k]. \quad (4.3)$$

Тогда любое возмущение в переходном режиме можно представить в виде ряда Фурье:

$$A_0 = A_{\sin 0} + A_{\cos 0} + A_{\text{exp}0} + A_{\text{const}0}, \quad (5.1)$$

$$A_k = A_{\sin k} + A_{\cos k} + A_{\text{exp}k} + A_{\text{const}k}, \quad (5.2)$$

$$B_k = B_{\sin k} + B_{\cos k} + B_{\text{exp}k} + B_{\text{const}k}, \quad (5.3)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n \{ A_k \cos(k\omega t) + B_k \sin(k\omega t) \}, \quad (6)$$

где A_0 – постоянная составляющая ряда Фурье и среднее значение возмущения; A_k, B_k – амплитуды косинусных и синусных гармоник ряда Фурье; ω – угловая частота э. д. с. источника. Чаще всего исследованию подлежит силовая цепь с переменной структурой, изменяющейся в моменты времени, зависящие от напряжений или токов в ветвях цепи. В таком случае эффективно использовать метод сшивания решений на границах расчетных интервалов, соответствующих интервалам постоянства структуры и параметров цепи. Амплитудные коэффициенты в системе (1.1)–(4.3), перед составляющими в скобках, определяются из граничных условий для соответствующего расчетного интервала. Углы $\phi_1 = \omega t_1$ и $\phi_2 = \omega t_2$ соответствуют временным границам расчетного интервала. Очевидно, что при непрерывном характере потребления тока из сети эти углы смыкаются на границах интервала периодичности. Углы ϕ_1 и ϕ_2 будем называть основными параметрами режима работы.

При рассмотрении энергоподсистемы с известной (выбранной) структурой необходимо:

- определить основные параметры схемы;
- определить на основании системы уравнений, описывающих процессы в энергоподсистеме, связь амплитудных коэффициентов в системе (1.1)–(4.3) с основными параметрами схемы на расчетных интервалах;
- определить основные параметры режима работы, их связь с основными параметрами схемы и связь между собой в большинстве случаев из трансцендентного уравнения, используя методы вычислительной математики и возможности интегрированных пакетов: MathCAD, MATLAB.

Предложенный аппарат на базе системы (1.1)–(4.3) был применен для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистеме на базе выпрямителя с емкостным фильтром при активном характере нагрузки и дальнейшего синтеза системы. Все необходимые параметры определены, найдены уравнения их связи (о чем будет сказано ниже), в этом случае можно определить полную мощность и все составляющие полной мощности.

При определении полной входной мощности следует учитывать, что функция первичного входного тока (напряжения) симметрична по отношению к оси времени. Она не содержит, в отличие от функции выпрямленного тока (напряжения), гармоник нулевого порядка (в дальнейшем в формулах (7.2), (9), (10.3) они не учитываются) и гармоник, частоты которых кратны пульсности p схемы выпрямления.

Активная мощность P равна среднему значению мгновенной мощности за период питающего напряжения и определяет количество электромагнитной энергии, необратимо преобразующейся в другие формы энергии [3].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (7.1)$$

Разложение в ряд Фурье функций входного напряжения и входного тока согласно системе (1.1)–(6) и вычисление интеграла в правой части формулы (7.1) с учетом того, что средние за период значения произведений гармонических функций с разными частотами равны нулю, приведет к формуле для активной мощности в спектральной форме:

$$P = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (A_{Uk}A_{Ik} + B_{Uk}B_{Ik}). \quad (7.2)$$

Полная, или кажущаяся, мощность S всегда больше фактически передаваемой нагрузке активной мощности из-за существования неактивных составляющих мощности, которые, не создавая полезного эффекта, приводят в то же время к увеличению потерь в питающей сети. Известны три неактивные составляющие полной мощности [3]: реактивная мощность Q или мощность сдвига, мощность искажения T и мощность несимметрии H .

Реактивную мощность или мощность сдвига Q связывают со сдвигом по фазе основной гармоники тока относительно напряжения питающей сети. Мощность искажения T считают составляющей реактивной мощности, обусловленной высшими гармониками тока. Мощность несимметрии H учитывает дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам многофазной цепи. В однофазных и многофазных симметричных преобразователях мощность несимметрии равна нулю.

В симметричном преобразователе полная мощность связана со своими составляющими выражением вида [3]:

$$S = \{u(t)\}_{RMS} \cdot \{i(t)\}_{RMS} = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}, \quad (8)$$

где $\{u(t)\}_{RMS}$, $\{i(t)\}_{RMS}$ – действующие значения напряжения и тока первичного источника питания. Действующее значение любой функции определяется через составляющие ее ряда Фурье по формуле:

$$\{f(t)\}_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (A_{fk}^2 + B_{fk}^2)}. \quad (9)$$

Реактивная мощность может быть выражена, используя преобразование Гильберта, согласно работе [5]:

$$Q = -\frac{1}{T} \int_0^T i(t)H\{u(t)\}dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)H\{i(t)\}dt, \quad (10.1)$$

$$H\{f(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{\tau - t} d\tau. \quad (10.2)$$

Учитывая, что при преобразовании Гильберта изображение синусоидальной функции равно производной этой функции, деленной на ω , придем к выражению

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (A_{Uk} B_{Ik} - B_{Uk} A_{Ik}). \quad (10.3)$$

Мощность искажения может быть определена из формулы (8):

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}. \quad (11)$$

Определив полную мощность энергоподсистемы S и ее составляющие P , Q и T , можно определить основные показатели качества энергопотребления [3]: $K_{\text{мощности}} = P/S$ – коэффициент мощности, $K_{\text{сдвига}} = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$ – коэффициент сдвига, $K_{\text{искажения}} = \sqrt{P^2 + Q^2} / \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}$ – коэффициент искажения, $K_{\text{гармоник}} = T/\sqrt{P^2 + Q^2}$ – коэффициент гармоник или K_{THD} (Total Harmonic Distortion).

Основная структура, на базе которой строятся все известные схемы энергоподсистем постоянного и переменного токов, состоит из первичного источника питания – полупроводникового преобразователя – нагрузки. Энергоподсистема с нагрузкой без противо- э.д.с., если нет необходимости в автономном источнике питания, реализуется по классической структуре: сеть переменного тока – выпрямитель – силовой фильтр – нагрузка [4].

Энергоподсистемы на базе неуправляемых выпрямителей с R нагрузкой, шунтированной конденсатором фильтра C , или RC -нагрузкой широко используются для питания электротехнических комплексов и систем относительно небольшой мощности (рис. 1). Речь идет в первую очередь об источниках питания с бестрансформаторным входом или маломощных источниках с трансформаторным входом, у которых индуктивным сопротивлением трансформатора относительно активного сопротивления можно пренебречь. При этом в качестве первичного источника выступает в основном однофазная сеть переменного тока. Поэтому в дальнейшем большинство формул и диаграмм приведено для схем с пульсностью $p = 2$. Рассмотренные ниже выражения верны и для энергоподсистем с трехфазной питающей сетью. Однако трехфазная сеть используется в основном в установках большой мощности, при этом активные сопротивления трансформаторов значительно меньше индуктивных. Таким образом, в последнем случае следует использовать литературу по выпрямителям, начинающимся с индуктивности [1–3, 5].

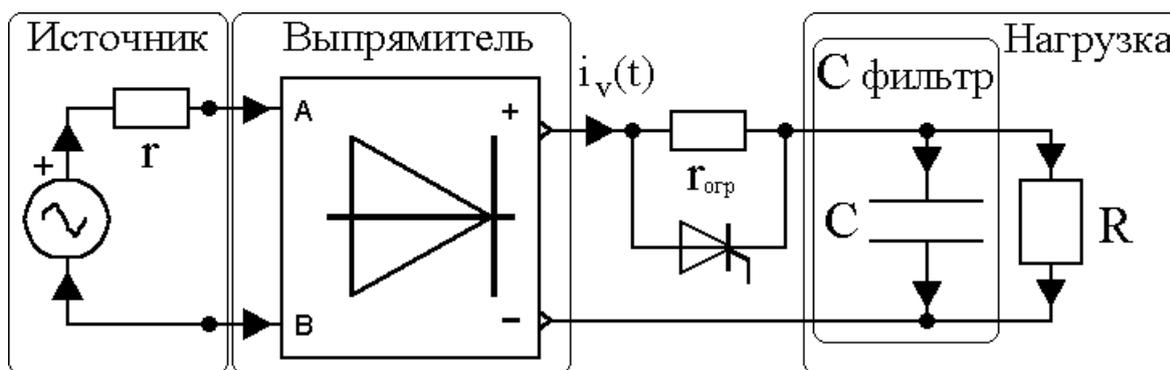


Рис. 1. Структура энергоподсистемы: сеть переменного тока – неуправляемый выпрямитель - (необязательный элемент: цепь запуска) – силовой фильтр – нагрузка.

В предлагаемой методике расчета и проектирования энергоподсистем электротехнических комплексов с RC -нагрузкой основными параметрами схемы в соответствии с работой [4] являются: $\bar{r} = r/R$ – относительное сопротивление продольной ветви силового фильтра, τ_{rc} – постоянная времени продольной ветви фильтра, τ_{CR} – посто-

янная времени конденсатора - нагрузки. Последние два параметра связаны между собой соотношением:

$$\tau_{rC} = r\tau_{CR}. \quad (12)$$

Характерной особенностью электромагнитных процессов в энергоподсистеме с RC-нагрузкой является наличие "отсечки" тока, потребляемого из сети [1]. В данном случае процесс коммутации вызван работой неуправляемых вентилей схемы, что позволяет выделить два интервала работы: интервал проводимости вентилей схемы и интервал непроводимости. Очевидно, что режим работы энергоподсистемы будет определяться углом включения вентилей схемы $\phi_1 = \alpha$ и углом выключения вентилей схемы $\phi_2 = \{\pi / p\} + \beta$ (рис. 2), которые и выбираем в качестве основных параметров режима работы.

Для придания методике универсальности вводятся базовые величины: $E_B = E_m$ - амплитуда входной э.д.с., $I_B = E_m / R$, $P_B = E_m^2 / R$. Токовые нагрузки оцениваются по действующему (эффективному или среднеквадратичному) значению, так как с ним связано тепловое действие тока.

На интервале проводимости часть энергии, поступающей из сети, запасается в конденсаторе силового фильтра, а часть отдается в нагрузку. На интервале непроводимости первичный источник питания отключен от нагрузки. Очевидно, что оценивать негативное воздействие на первичный источник питания, определяя показатели качества энергопотребления и электромагнитные нагрузки на вентили и элементы силового фильтра, целесообразно для интервала проводимости.

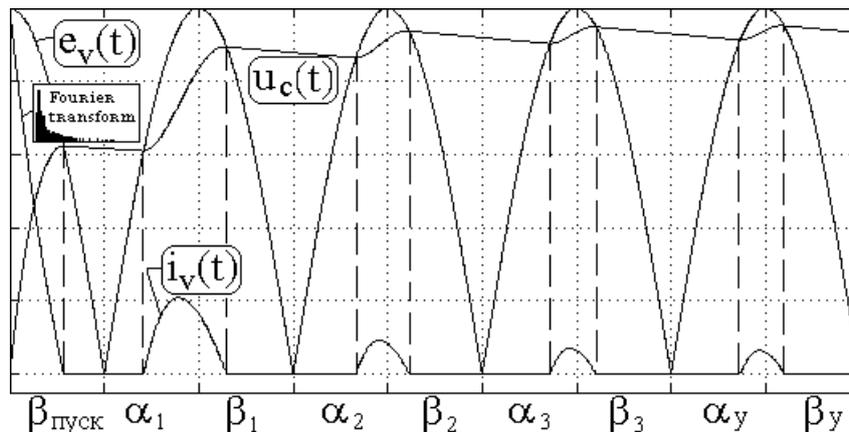


Рис. 2. Переходные процессы при пуске выпрямителя ($p = 2$) с RC - нагрузкой при начальной фазе включения $\psi_s = \pi/2$.

Максимальные электромагнитные нагрузки в системе оцениваются по наиболее тяжелому переходному процессу, которым, согласно работе [4], является пуск выпрямителя в питающую сеть с начальной фазой включения $\psi_s = \pi/2$ при полностью разряженном конденсаторе силового фильтра (рис. 2). В качестве возмущения выбирается выпрямленный ток $i_v(t)$, для которого амплитудные коэффициенты в системе (1.1) – (4.3) для интервала основного заряда конденсатора ($0 \leq \omega t \leq \beta_{пуск}$) определяются выражениями вида:

$$K_{\sin} = -K\omega\tau_{rC}, \quad (13.1)$$

$$K_{\cos} = 1 - K(1 + \bar{r}), \quad (13.2)$$

$$K_{\exp} = K(1 + \bar{r}), \quad (13.3)$$

$$K_{const} = 0, \quad (13.4)$$

где $K = 1/((1+\bar{r})^2 + (\omega\tau_{rC})^2)$.

Для квазиустановившегося режима

$$K_{\sin} = 1 - [(1 - \sin \alpha)K(-\omega\tau_{rC} \sin \alpha + (1 + \bar{r})\cos \alpha)], \quad (14.1)$$

$$K_{\cos} = (1 - \sin \alpha)K(\omega\tau_{rC} \cos \alpha + (1 + \bar{r})\sin \alpha), \quad (14.2)$$

$$K_{\exp} = -(1 - \sin \alpha)K(\omega\tau_{rC}), \quad (14.3)$$

$$K_{const} = -\sin \alpha. \quad (14.4)$$

Выражение, связывающее угол выключения вентилей схемы β с основными параметрами схемы \bar{r} , τ_{rC} и углом α для квазиустановившегося режима определено из условия равенства в момент выключения вентилей схемы выпрямленной э.д.с. и напряжения на конденсаторе силового фильтра, при допущении о том, что свободная составляющая возмущения обращается к этому моменту в нуль:

$$\beta(\alpha, \bar{r}, \tau_{rC}) = \arcsin\left(-\frac{\sin(\alpha)}{\sqrt{K_{\cos}^2 + K_{\sin}^2}}\right) - \arcsin\left(-\frac{K_{\sin}}{\sqrt{K_{\cos}^2 + K_{\sin}^2}}\right). \quad (15)$$

Для интервала основного заряда конденсатора допущение о том, что свободная составляющая возмущения обращается к моменту выключения вентилей схемы в нуль, приводит к погрешности в расчете. Поэтому на рис. 3а, 3б приведена диаграмма зависимости угла $\beta_{\text{выск}}$ от параметров \bar{r} и τ_{rC} для схем выпрямления с пульсностью $p = 2$.

Диаграмма построена по данным численного массива $\beta_{\text{выск}}(\bar{r}, \tau_{rC})$, удовлетворяющего трансцендентному уравнению, полученного с использованием разработанной в пакете MathCAD расчетной программы, основу которой составляет метод "численной прогонки".

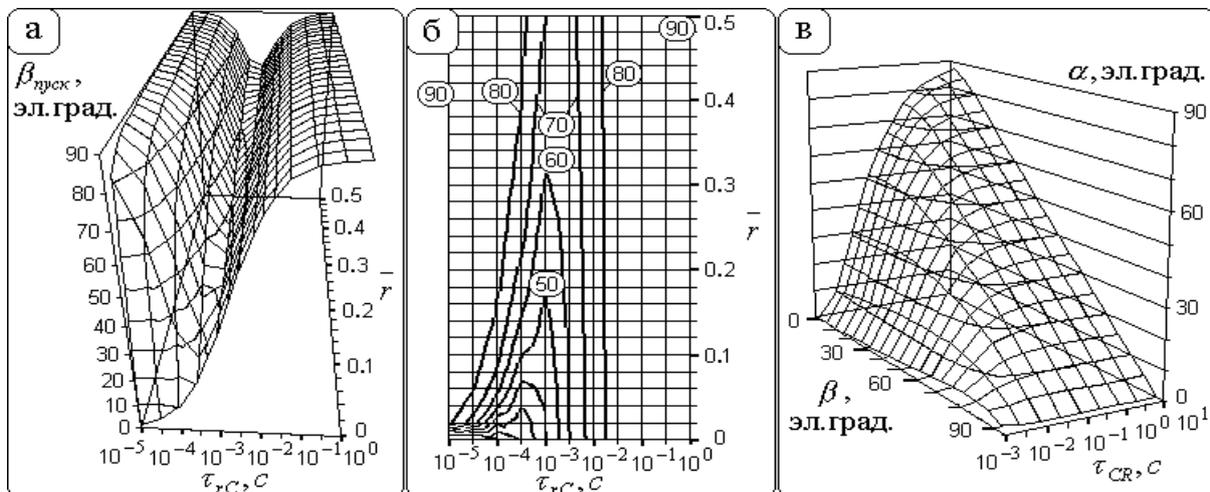


Рис. 3. Диаграммы: зависимости угла $\beta_{\text{выск}}$ от параметров \bar{r} и τ_{rC} на интервале основного заряда конденсатора (3а – 3D-Plot, 3б – Surface Plot), угла α от параметра схемы τ_{CR} и угла β на интервале непроводимости (3в)

Интервал непроводимости целесообразно связывать с выходными параметрами энергоподсистемы: выходной мощностью и коэффициентом пульсаций выходного напряжения. В качестве возмущения выбирается напряжение на конденсаторе силового фильтра, для которого амплитудные коэффициенты в системе (1.1)–(4.3) для интервала непроводимости равны нулю кроме коэффициента:

$$K_{\exp} = \sin \phi_2 \exp^{-(\phi_2 / \omega\tau_{CR})}. \quad (16)$$

Связь угла α с параметром схемы τ_{CR} и углом β на интервале непроводимости можно установить из условия равенства в момент включения вентилей выпрямленного э. д. с. и напряжения на конденсаторе силового фильтра. При этом для отыскания численного массива $\alpha(\beta, \tau_{CR})$ использовалась расчетная программа в пакете MathCAD. Полученная диаграмма зависимости для схем выпрямления $p = 2$ приведена на рис. 3в, на основании которого можно установить, что при значении параметра схемы

$$\tau_{CR} < 10^{-\text{exp}} \quad (17)$$

величина угла α практически равна нулю при любом угле β , т. е. конденсатор силового фильтра успевает полностью разрядиться. Приемлемых значений (выше 30 эл. град.) угол α достигает при $\tau_{CR} > 10^{-2}$ (для $\beta \leq 45$ эл. град.). Для указанного диапазона зависимость угла α с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть представлена в виде (α в эл. град.):

$$\alpha(\beta, \tau_{CR}) = (90 - \beta) \cdot \left[1 - \frac{1}{(2 + 0.04\beta)^{[\log(\tau_{CR}) + \exp + 1.6 \cdot 10^{-3} \beta]^{1.25}}} \right]. \quad (18)$$

Верификация формулы (18) произведена сравнением с результатами работы [6] и показала хорошее совпадение результатов в области α выше 30 эл. град., что подтверждает достоверность формулы.

Методика расчета и проектирования энергоподсистем с RC-нагрузкой

Предлагаемая методика расчета и проектирования энергоподсистем электротехнических комплексов с RC-нагрузкой сводится к следующим этапам, при этом параметры цепи первичного источника питания и нагрузки полагаются известными (т.е. \bar{r}):

1. По требуемым выходным параметрам: выходной мощности \bar{P}_R , коэффициенту пульсаций выходного напряжения K_{Π} и (или) энергетическим параметрам: К.П.Д., $K_{\text{мощности}}$, $K_{\text{гармоник}}$ в квазиустановившемся режиме выбирают основной параметр схемы τ_{CR} по данным рис. 4. Электромагнитные нагрузки на элементы энергоподсистемы в квазиустановившемся режиме работы определяют по данным рис. 5.

2. Электромагнитные нагрузки на элементы энергоподсистемы в наиболее тяжелом пусковом режиме определяют по рис. 6, из которого видно, что действующее значение тока через конденсатор на этапе основного заряда практически не отличается от действующего значения входного тока. Максимальное амплитудное значение пускового тока равно $I_{\text{max}} = E_m / r$. Отметим, что при $\tau_{CR} \geq 1$ действующее значение входного тока равно действующему значению тока короткого замыкания первичного источника питания $(I_{K3}) / \sqrt{2} = (E_m / r) / \sqrt{2}$ или в базовых единицах $0.707 / \bar{r}$, что следует из рис. 3а, так как $\beta_{\text{пуск}}$ равен 90 эл. град. при $\tau_{CR} \geq 1$.

3. Определяют энергетические показатели энергоподсистемы в переходном процессе, используя систему (1.1)–(4.3) и формулы (7.2)–(9), (10.3)–(11), (13.1)–(13.4). Однако их значения для переходных процессов пока не нормируются в явной форме в ГОСТ. Если возникнет необходимость, то требуемые выражения в представленной методике получены.

Диаграммы рис. 4–6 получены на основании системы (1.1)–(4.3) и формул (7.2)–(9), (10.3)–(16), (18) по результатам расчета в пакете MathCAD.

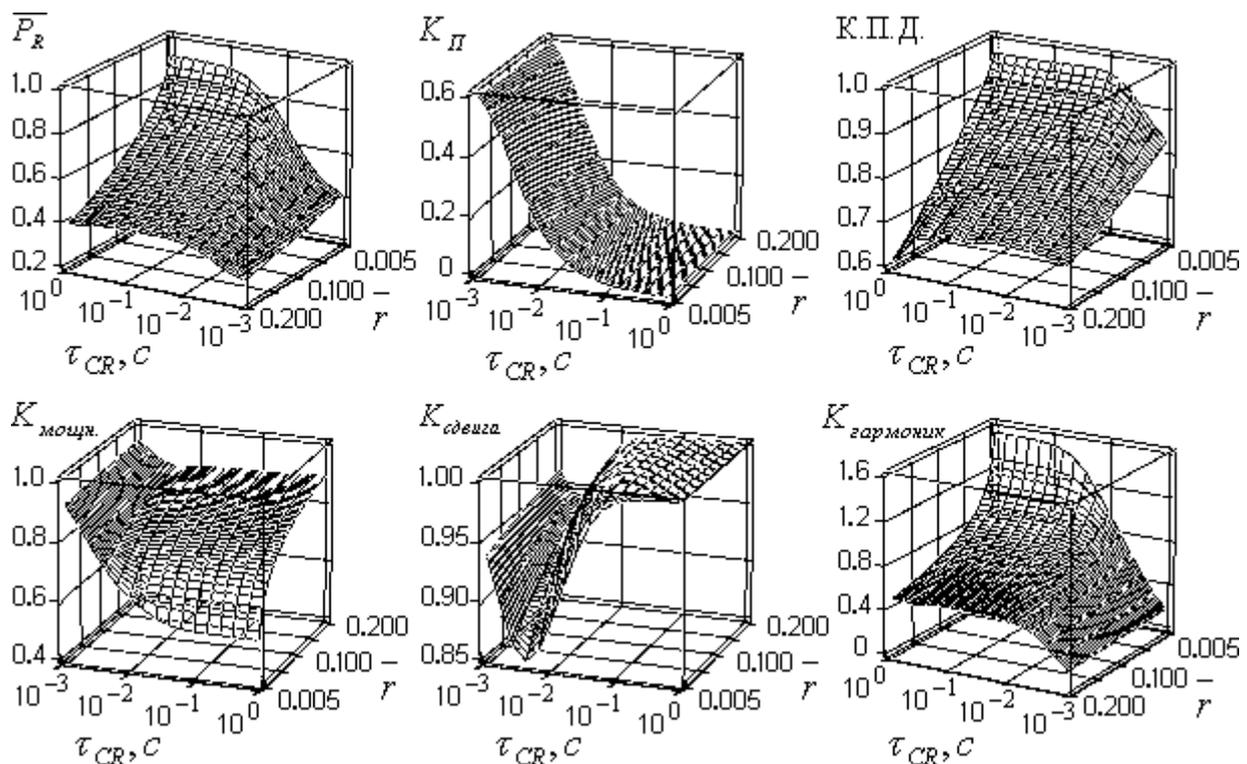


Рис. 4. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы: выходной мощности (о.е.), коэффициента пульсаций выходного напряжения, К.П.Д., коэффициента мощности, коэффициента сдвига, коэффициента гармоник, в квазиустановившемся режиме работы.

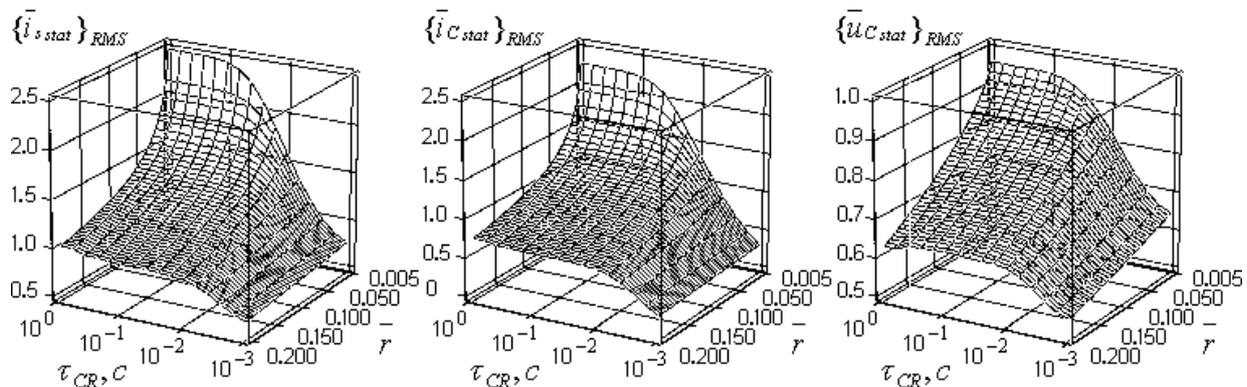


Рис. 5. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы: действующего значения входного тока (о.е.), действующего значения тока через конденсатор (о.е.) и среднего значения выходного напряжения (о.е.) в квазиустановившемся режиме работы.

Рекомендации по этапу 1: При проектировании выпрямителей, к которым предъявляются жесткие требования по значению гармонических составляющих потребляемого из сети тока, может возникнуть ситуация, когда требования обеспечить нельзя. Рекомендации по вопросам построения энергоподсистем с активной коррекцией энергетических показателей приведены в [7].

Рекомендации по этапу 2: При использовании цепи запуска значение номинального сопротивления гасящего резистора выбирают из условия ограничения величины максимального пускового тока $I_{\max} = E_m / (r + r_{\text{озп}})$. Устанавливаемая мощность гасящего резистора определяется по формуле $r_{\text{озп}} \{i_{s \text{дин}}\}_{RMS}^2$. Прерыватель выбирается на ток $\{i_{s \text{дин}}\}_{RMS}$ и устанавливаемую мощность $r_{\text{прерыват}} \{i_{s \text{стат}}\}_{RMS}^2$.

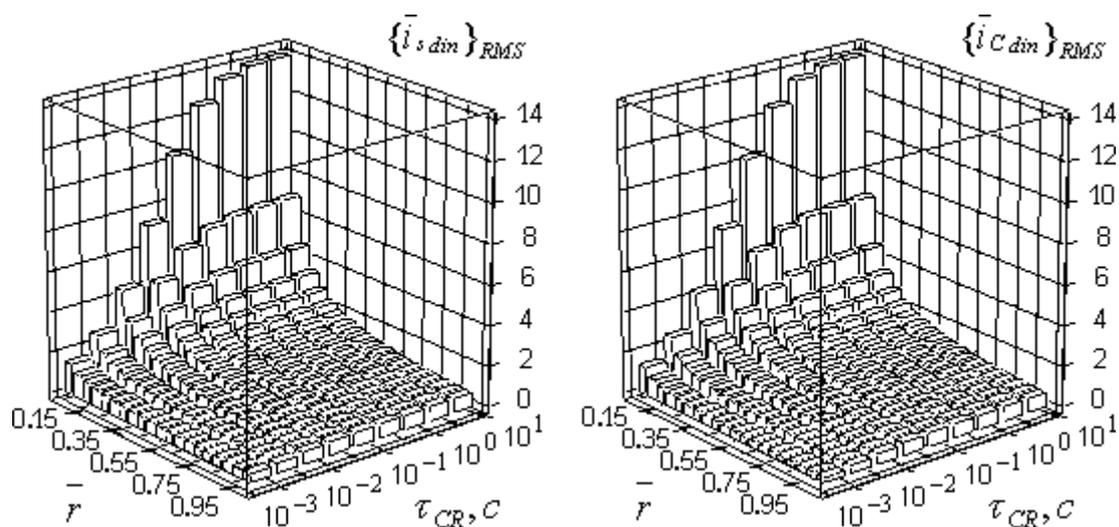


Рис. 6. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы: действующего значения входного тока (о.е.) и действующего значения тока через конденсатор (о.е.) на этапе основного заряда конденсатора.

Заключение

Решение задач получения высоких энергетических показателей, минимизации массогабаритных показателей и увеличения надежных показателей энергоподсистем неосуществимо без анализа переходных процессов, особенно наиболее тяжелого – пускового. Приведенная система выражений (1.1)–(4.3) позволяет анализировать электромагнитные и энергетические процессы в энергоподсистемах различного типа как в квазиустановившихся, так и в переходных режимах. Предложенная методика расчета и проектирования учитывает электромагнитные нагрузки на элементы энергоподсистемы в наиболее тяжелом пусковом режиме, приведены зависимости энергетических показателей от основных параметров схемы.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации в рамках работ, выполненных по гранту А03-3.14-171.

Литература

1. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Г.С. Найвельт, К.Б. Мазель, Ч.И. Хусаинов и др.; Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1985. – 576 с.: ил.
2. Иванов-Цыганов А.И. Электропреобразовательные устройства РЭС: Учеб. для вузов по спец. “Радиотехника”. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.: ил.
3. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с., ил.
4. Глазенко Т.А., Томасов В.С. Методика анализа переходных процессов в выпрямителях с гС-фильтрами. Изв. вузов. Приборостроение. 1994. Т. 37, № 11-12. с. 45 - 53.
5. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. под ред. Лабунцова В. А. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с., ил.
6. Исхаков А.С. Коэффициент мощности однофазного выпрямителя с емкостным фильтром. – Электричество, 2000, № 9, с. 51 - 53.
7. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения. 5-ая Международная конференция “Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение”. МКЭЭЭ – 2003. Крым, Алушта. Часть I. с. 727-730.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ТОКА, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ШИП

М.В. Никитина, Д.В. Осипов

Научные руководители – к.т.н., доц. В.А. Толмачев, к.т.н., доц. В.В. Кротенко

Сформулированы условия реализации адаптивной одноконтурной системы управления источника тока с усилительно-преобразовательным устройством на основе транзисторного широтно-импульсного преобразователя из условия обеспечения заданного быстродействия при допустимом уровне пульсаций тока в нагрузке.

Введение

Мощные источники тока программируемой формы, построенные на основе транзисторных ШИП, в настоящее время все более широко применяются в системах управления различными технологическими процессами, например, нестационарным электролизом. Преимущества таких источников в установках нестационарного электролиза, их принципы построения и перспективы совершенствования их технических характеристик детально рассмотрены в работе [1]. Там же отмечено, что высокие требования к точности поддержания тока заданной формы в нагрузке могут быть реализованы у источников, построенных по принципу замкнутой системы регулирования тока.

Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис. 1. Контур регулирования тока включает ШИП, нагрузку резистивного характера R_n со сглаживающим дросселем L , безынерционный датчик тока $ДТ$ и ПИ-регулятор тока $РТ$. ШИП содержит выходной каскад мостового типа на четырех силовых транзисторных ключах $СК1-СК4$ и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), осуществляющий коммутацию ключей с постоянным периодом T_k по заданному закону (симметричному или несимметричному) и обеспечивающий модуляцию первого и второго рода, а в последнем случае – требуемую глубину модуляции M . Напряжение на выходе силового каскада имеет вид импульсов с амплитудой U_n , относительная длительность γ которых пропорциональна входному сигналу управления U_y и полярность которых определяется полярностью последнего.

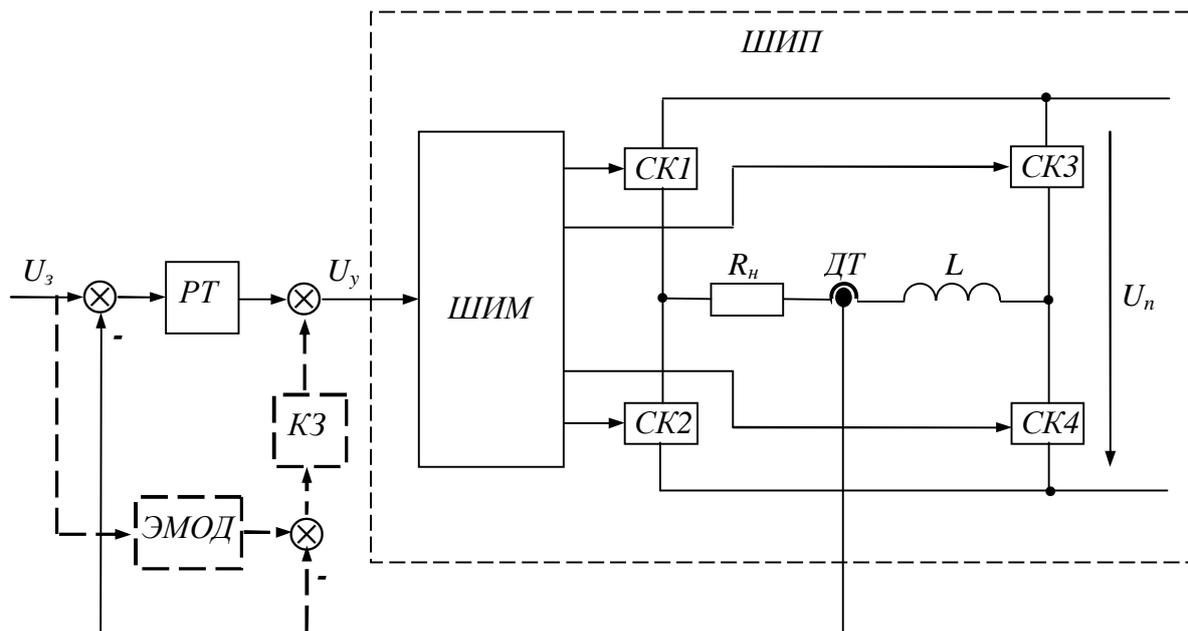


Рис. 1. Структурная схема

В работе [2] изложена методика синтеза энергетических и информационных подсистем таких источников из условия обеспечения экспоненциального переходного процесса с заданными постоянной времени T_m и максимальной допустимой амплитудой $\Delta I_{доп}$ пульсаций тока нагрузки в квазиустановившемся режиме при ограниченной на уровне $f_{к,мин}$ частоте коммутации силовых ключей ШИП. Указанная методика синтеза предполагает постоянство параметров силовой цепи источника.

Актуальной является задача сохранения заданных статических и динамических характеристик источников в условиях изменения в течение процесса электролиза как сопротивления нагрузки R_n , так и напряжения U_n источника питания силового каскада ШИП. Решение такой задачи возможно в структурах систем с адаптивными алгоритмами управления.

Линейная модель и передаточная функция адаптивной системы управления

С позиции простоты технической реализации наиболее приемлемой для решения поставленной задачи является структура с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой [3]. Для организации такой системы введем в структурную схему, представленную на рис. 1, дополнительный контур адаптации, содержащий эталонную модель ЭМОД и корректирующее звено КЗ, на вход которого поступает разность выходного напряжения эталонной модели и напряжения датчика тока нагрузки. Выходной сигнал корректирующего звена поступает на вход ШИМ, суммируясь с выходным напряжением ПИ-регулятора основного контура.

Пусть передаточная функция эталонной модели соответствует эквивалентной передаточной функции линейной непрерывной модели замкнутой системы, параметры ПИ-регулятора которой выбраны из условия обеспечения экспоненциального переходного процесса с заданной постоянной времени T_m , т.е.

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{1}{K_{\text{ом}} \cdot (T_m p + 1)}. \quad (1)$$

Если передаточную функцию корректирующего звена в контуре адаптации выбрать в соответствии с выражением $W_k(p) = K_a W_R(p)$, где $W_R(p)$ – передаточная функция регулятора в эквивалентной непрерывной одноконтурной системе, K_a – коэффициент адаптации, то структурная схема эквивалентной непрерывной модели системы примет вид, показанный на рис. 2.

Используя эквивалентные структурные преобразования, а также вводя обозначения

$$\rho = R_{н0} / R_n, \quad \nu = U_{н0} / U_n, \quad \xi = L_0 / L,$$

где $R_{н0}$, $U_{н0}$ и L_0 – параметры силовой цепи, при которых осуществляется расчет настроек K_I и T_I ПИ-регуляторов, передаточную функцию указанной системы можно записать в виде

$$W_{\text{ад}}(p) = \frac{i(p)}{u_{\varepsilon}(p)} = \frac{\frac{T_m T_I}{K_a + 1} p^2 + \left(\frac{T_m}{K_a + 1} + T_I \right) p + 1}{\left[\frac{\nu T_m T_n}{\xi (K_a + 1)} p^2 + \left(\frac{\nu T_m}{\rho (K_a + 1)} + T_I \right) p + 1 \right] \cdot (T_m p + 1) K_{\text{ом}}}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) показывает, что при номинальных параметрах силовой цепи передаточная функция системы соответствует эталонной при любом значении коэффициента K_a . При отличных от единицы коэффициентах ρ , ξ , ν и при достаточно высоком значении коэффициента K_a , динамические характеристики адаптивной системы регулирования тока приближаются к соответствующим характеристикам эталонной модели $W_{\varepsilon}(p)$. Таким образом, точность поддержания эталонного экспоненциального

процесса в условиях изменения параметров силовой цепи источника связана с предельным значением $K_{a,np}$ коэффициента K_a .

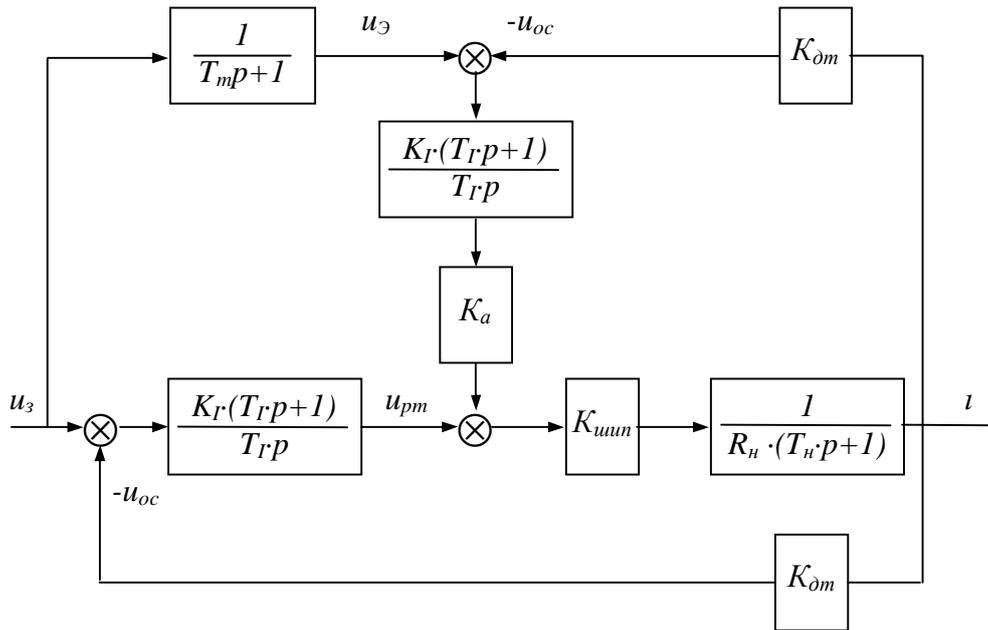


Рис. 2. Непрерывная модель

В уже упомянутой работе [2] показано, что при выборе параметров регулятора основного контура на основе соотношений

$$T_I = T_0, \quad (3)$$

$$K_I = \frac{R_0 T_0}{T_m K_{uun} K_{om}}, \quad (4)$$

где $T_0 = L / R_0$, $R_0 = r + R_n$, $K_{uun} = U_n / U_{on}$, U_{on} – амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИМ, минимально-допустимое значение постоянной времени T_m реализуемого экспоненциального процесса определяется условиями устойчивости системы, а именно условиями отсутствия скользящего режима и автоколебаний на субгармонических частотах.

В контуре регулирования тока при ШИМ второго рода (ШИМ2), $M=0.5$ и параметрах ПИ-регулятора, рассчитанных по формулам (3) и (4), скользящий режим может возникнуть при условиях

$$\gamma \geq 2 T_m / T_\kappa,$$

$$\gamma \leq 1 - 2 T_m / T_\kappa.$$

Выбор $T_m \geq T_\kappa / 2$ гарантирует исключение скользящего режима во всем возможном диапазоне регулирования тока нагрузки. В работе [4] показано, что в рассматриваемой одноконтурной системе с индуктивным сглаживающим фильтром условия отсутствия скользящего режима являются более жесткими, чем условия отсутствия субгармонических автоколебаний.

Даже в том случае, если параметры процессов в замкнутой непрерывной системе соответствуют эталонным, в системе с ШИП и дополнительным контуром сигнальной самонастройки изменяются условия возникновения скользящего режима при использовании ШИМ2 относительно условий в исходной системе, поскольку появляется дополнительная ОС, по которой пульсации тока нагрузки поступают на вход ШИМ. В рассматриваемой структуре скользящий режим исключается во всем возможном диапазоне регулирования тока нагрузки при выборе коэффициента K_a в цепи коррекции в соответствии с условием

$$K_a \leq \frac{2T_m}{T_k} - 1. \quad (5)$$

Как видно, при $T_m = T_k/2$ сигнальная самонастройка вообще не может быть реализована даже при номинальных параметрах силовой цепи, а повышение значения коэффициента K_a связано при заданной частоте коммутации силовых ключей с увеличением постоянной времени T_m или со снижением предельных динамических характеристик системы управления.

Синтез адаптивной системы управления

Одной из задач синтеза адаптивной системы с выбранной структурой является такой выбор настроек регуляторов, чтобы в процессе изменения параметров силовой цепи при выбранном предельном значении коэффициента K_a не происходило нарушение условий ее устойчивости.

Проведем анализ устойчивости системы с использованием методики, приведенной в работе [4], и программного комплекса, описанного в работе [5], на примере источника тока со следующими исходными данными: суммарное омическое сопротивление выходного каскада, датчика тока и дросселя фильтра $r = 0.03$ Ом; номинальное напряжение питания выходного каскада $U_{n,ном} = 24$ В; номинальное сопротивление нагрузки $R_{n,ном} = 0.15$ Ом; период коммутации силовых ключей выходного каскада $T_k = 3.33 \cdot 10^{-5}$ с; амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИМ $U_{on} = 10$ В; коэффициент передачи датчика тока $K_{\partial m} = 0.2$ В/А; глубина модуляции $M = 0.5$.

Поставим задачу обеспечения условий устойчивости системы в диапазоне изменения ее сопротивления нагрузки R_n от $R_{n,мин} = 0.05$ Ом до $R_{n,макс} = 0.25$ Ом, диапазоне изменения напряжения U_n силового источника питания от $U_{n,мин} = 22$ В до $U_{n,макс} = 26$ В и диапазоне изменения индуктивности L дросселя фильтра от $L_{мин} = 0.1$ мГн до $L_{макс} = 0.3$ мГн. Решение задачи представим в виде зависимостей предельного значения $K_{a,пр}$ коэффициента K_a от указанных параметров (рис. 3, 4 и 5 соответственно).

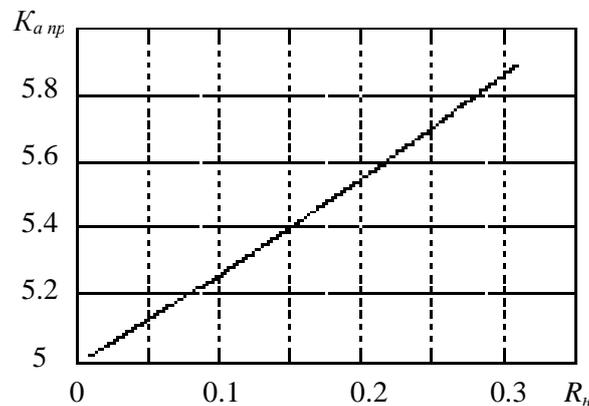


Рис. 3. Зависимости $K_{a,пр}$ от R_n при $R_{n0} = R_{n,макс}$

На рис. 3 приведена зависимость предельного значения $K_{a,пр}$ коэффициента K_a от суммарного сопротивления силовой цепи R_n при синтезе системы из условий $R_{n0} = R_{n,макс} = 0.25$ Ом и $U_{n0} = U_{n,ном} = 24$ В. Зависимость предельного значения $K_{a,пр}$ коэффициента K_a от суммарного сопротивления силовой цепи R_n при синтезе системы из условий $R_{n0} = R_{n,мин} = 0.05$ Ом и $U_{n0} = U_{n,ном} = 24$ В выглядит аналогично.

На рис. 4 приведены зависимости предельного значения $K_{a,пр}$ коэффициента K_a от напряжения питания силового каскада ШИП U_n при синтезе системы из условий $U_{n0} = U_{n,мин} = 22$ В (рис. 4, а) и $U_{n0} = U_{n,макс} = 26$ В (рис. 4, б) при $R_{n0} = R_{n,ном} = 0.15$ Ом.

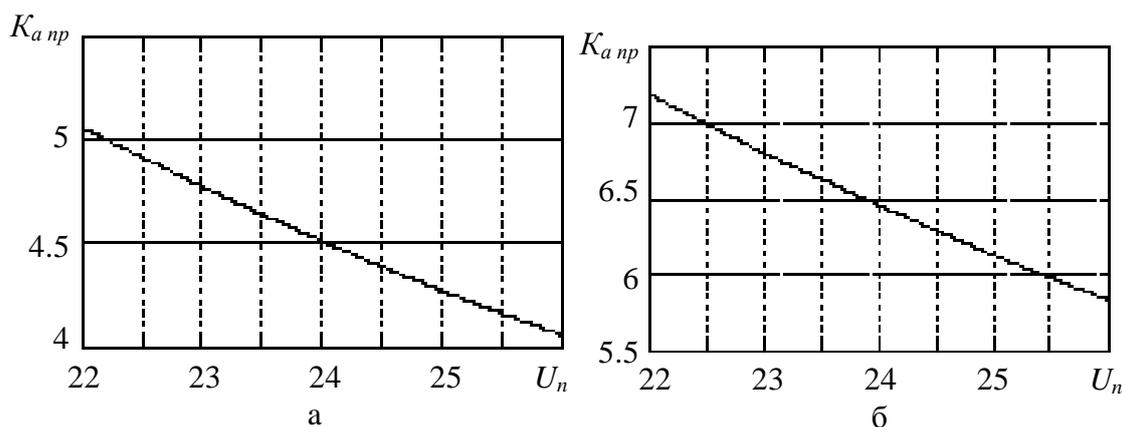


Рис. 4. Зависимости $K_{a пр}$ от U_n при $U_{п0} = U_{п мин}$ (а) и $U_{п0} = U_{п макс}$ (б)

На рис. 5 приведена зависимость предельного значения $K_{a, пр}$ коэффициента K_a от индуктивности L дросселя фильтра при синтезе системы из условия $U_{п0} = U_{п, ном} = 24 В$ и $R_{н0} = R_{н, ном} = 0.15 Ом$.

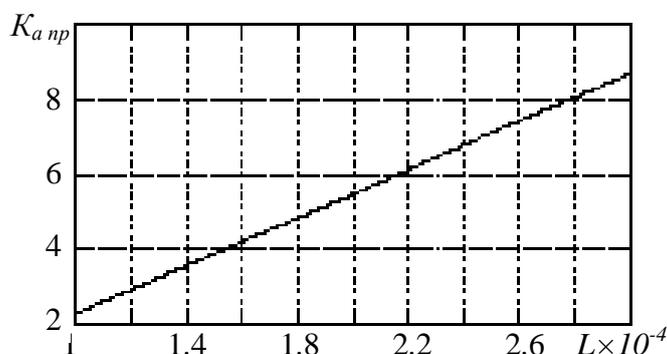


Рис. 5. Зависимость $K_{a пр}$ от L при $R_{н0} = R_{н, ном}$ и $U_{п0} = U_{п, ном}$

Анализ устойчивости рассматриваемой системы показал, что параметры ее регуляторов целесообразно рассчитывать при минимальном из возможных значений сопротивления нагрузки, максимальном из возможных значений напряжения силового источника питания и минимальном из возможных значений индуктивности фильтра, т.е. при $R_{н0} = R_{н мин}$, $U_{п0} = U_{п макс}$ и $L_0 = L_{мин}$.

Проведем далее анализ влияния настроек регуляторов на точность воспроизведения эталонного переходного процесса в условиях изменения параметров силовой цепи на примере источника электропитания с исходными данными, приведенными выше.

Поставим задачей обеспечение экспоненциального переходного процесса с постоянной времени $T_T = 3 T_k$ при реакции на скачок задающего воздействия при допустимой амплитуде пульсаций тока нагрузки $\Delta I_{доп} \leq 0.5 А$ в диапазоне изменения ее сопротивления нагрузки R_n от $R_{н мин} = 0.05 Ом$ до $R_{н макс} = 0.25 Ом$, диапазоне изменения индуктивности фильтра L от $L_{мин} = 0.7 \cdot L_{ном}$ до $L_{макс} = 1.3 \cdot L_{ном}$ и диапазоне изменения напряжения U_n силового источника питания от $U_{п мин} = 22 В$ до $U_{п макс} = 26 В$. В соответствии с выражением (5) предельно допустимое значение коэффициента K_a равно $K_{a, пр} = 5$.

Результаты математического моделирования процессов при реакции рассматриваемой системы регулирования тока на скачок задающего воздействия показаны на рис. 6, 7 и 8 соответственно, где i_0 – эталонные кривые, $i_{н1}$, $i_{н1}^*$ – кривые тока нагрузки, соответствующие расчетным параметрам силовой цепи источника и регуляторов при $K_a = 0$, $i_{н2}$, $i_{н2}^*$ и $i_{н3}$, $i_{н3}^*$ – кривые тока нагрузки, соответствующие расчетным параметрам регуляторов и отличным от расчетных значениям параметров силовой цепи соответственно при $K_a = 0$ и $K_a = 5$.

Расчет индуктивности L сглаживающего фильтра и параметров T_I и K_I ПИ-регулятора тока из условия обеспечения $\Delta I_{don} \leq 0.5A$ и эталонного процесса с использованием методики и формул, приведенных в работе [2], при $R_{n0} = R_{n\max}$ и $U_{n0} = U_{n,ном} = 24$ В дает следующие результаты: $L_0 = 0.2$ мГн, $T_I = 0.7$ мс и $K_I = 4.17$. Результаты моделирования системы с указанными параметрами фильтра и регуляторов на скачок задающего воздействия представлены на рис. 6, где $i_{н2}$ – кривая тока нагрузки при $R_n = R_{n\min}$ и $K_a = 0$, $i_{н3}$ – кривая того же тока при $R_n = R_{n\min}$ и $K_a = 5$. Если $R_{n0} = R_{n\min}$ и $L = L_0$, то эталонный переходный процесс обеспечивается при $T_I = 2.5$ мс и $K_I = 4.17$. Кривые $i_{н2}^*$ и $i_{н3}^*$ на рис. 6 представляют процессы изменения тока при сопротивлении нагрузки $R_n = R_{n\max}$ соответственно для $K_a = 0$ и $K_a = 5$.

Расчет индуктивности L сглаживающего фильтра и параметров T_I и K_I ПИ-регулятора тока из условия обеспечения $\Delta I_{don} \leq 0.5A$ и эталонного процесса с использованием методики и формул, приведенных в работе [2], при $U_{n0} = U_{n\min}$ и $R_{n0} = R_{n,ном} = 0.15$ Ом дает следующие результаты $L = 0.17$ мГн, $T_I = 1$ мс и $K_I = 4.17$. Результаты моделирования системы с указанными параметрами фильтра и регуляторов на скачок задающего воздействия представлены на рис. 7, где $i_{н2}$ – кривая тока нагрузки при $U_n = U_{n\max}$ и $K_a = 0$, $i_{н3}$ – кривая того же тока при $K_a = 5$. Если $U_{n0} = U_{n\max}$, то эталонный переходный процесс обеспечивается при $L = 0.23$ мГн, $T_I = 1.3$ мс и $K_I = 4.17$. Кривые $i_{н2}^*$ и $i_{н3}^*$ на рис. 7 представляют процессы изменения тока при напряжении $U_n = U_{n\min}$ соответственно для $K_a = 0$ и $K_a = 5$.

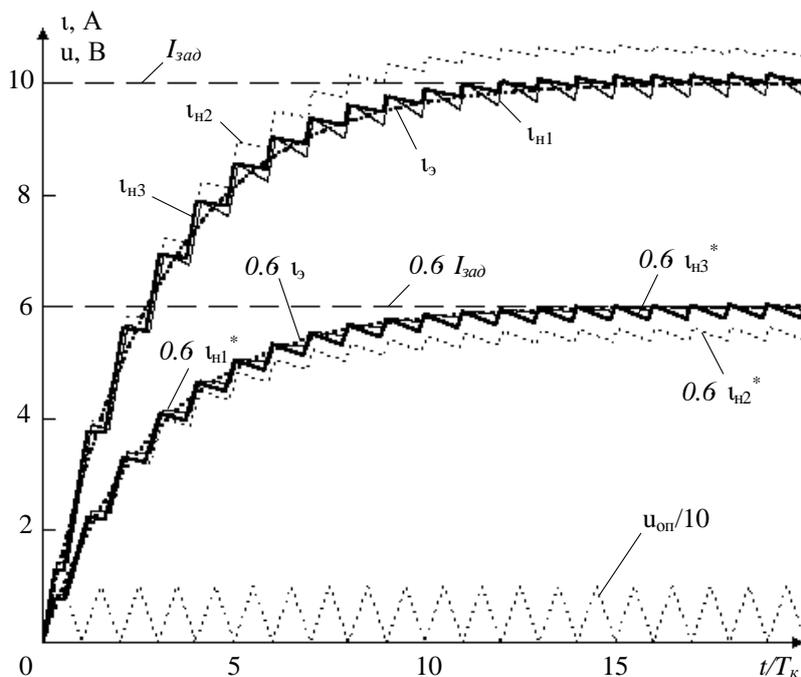


Рис. 6. Переходные процессы в системе с параметрами $R_{n0}=R_{n\max}$, $U_{п0}=U_{п,ном}$, $R_n=R_{n\min}$ и $R_{n0}=R_{n\min}$ и $U_{п0}=U_{п,ном}$, при $R_n=R_{n\max}$

Отклонение кривой переходного процесса от эталонной при номинальных значениях сопротивления нагрузки и напряжения силового источника питания и расчетных параметрах регулятора может быть обусловлено возможным технологическим разбросом индуктивности дросселя сглаживающего фильтра относительно его расчетного значения, условно здесь принятого за номинальное $L_{ном}$. Расчет индуктивности L сглаживающего фильтра и параметров T_I и K_I ПИ-регулятора тока из условия обеспечения эталонного процесса с использованием уже известной методики и формул при $U_n = U_{n,ном} = 24$ В и $R_n = R_{n,ном} = 0.15$ Ом дает следующие результаты: $L_{ном} = 0.2$ мГн, $T_I = 1.1$ мс. и $K_I = 4.17$.

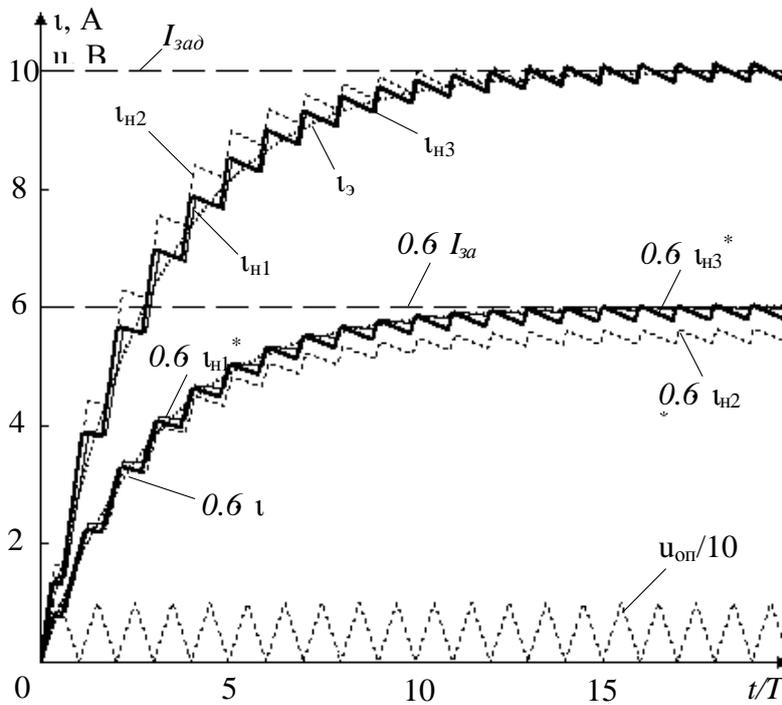


Рис. 7. Переходные процессы в системе с параметрами $R_{H0}=R_{H\text{ ном}}$, $U_{п0}=U_{п\text{ мин}}$, $U_{п}=U_{п\text{ макс}}$ и $R_{H0}=R_{H\text{ ном}}$, $U_{п0}=U_{п\text{ макс}}$, $U_{п}=U_{п\text{ мин}}$

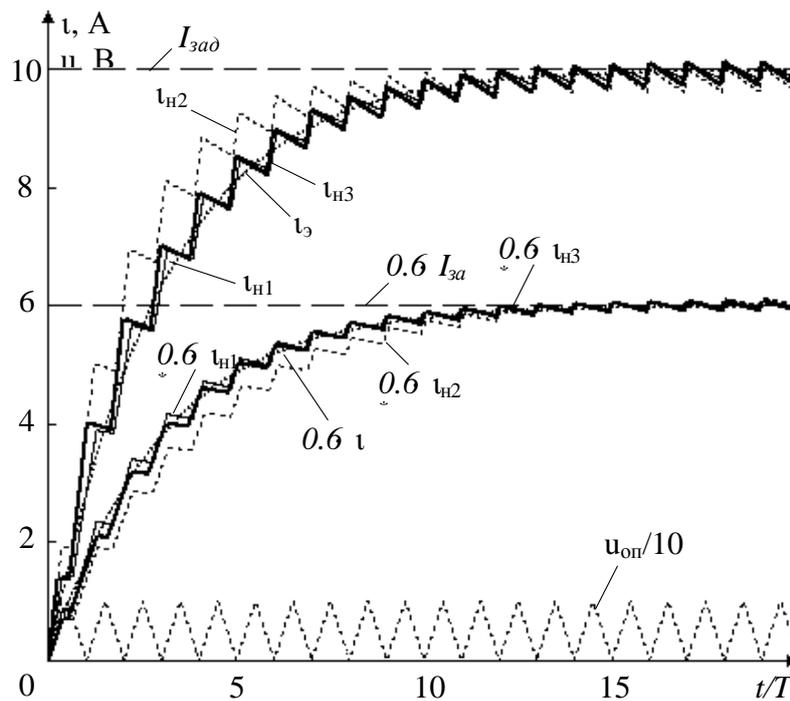


Рис. 8. Переходные процессы в системе с параметрами $R_{H0}=R_{H\text{ ном}}$, $U_{п0}=U_{п\text{ ном}}$, $L_0=L_{\text{ ном}}$, $L=1.3L_{\text{ ном}}$ и $R_{H0}=R_{H\text{ ном}}$, $U_{п0}=U_{п\text{ ном}}$, $L_0=L_{\text{ ном}}$, $L=0.7L_{\text{ ном}}$

Результаты моделирования переходных процессов при номинальном значении сопротивления нагрузки, номинальном значении напряжения силового источника питания и расчетных параметрах регуляторов в диапазоне изменения индуктивности от $L_{\text{ мин}} = 0.7 L_{\text{ ном}}$ до $L_{\text{ макс}} = 1.3 L_{\text{ ном}}$ представлены на рис. 8. Кривая $t_{н2}$ тока нагрузки на рис. 8, а соответствует индуктивности $1.3L_{\text{ ном}}$ при $K_a = 0$, а кривая $t_{н3}$ – той же индуктивности при $K_a = 5$. Кривая $t_{н2}^*$ тока нагрузки соответствует индуктивности $0.7L_{\text{ ном}}$ при $K_a = 0$, а кривая $t_{н3}^*$ – той же индуктивности при $K_a = 5$.

На основе проведенного анализа можно заключить, что наилучшее приближение переходного процесса к эталонному во всем диапазоне изменения параметров силовой цепи обеспечивается при параметрах системы, рассчитанных при максимальном из возможных значений сопротивления нагрузки, минимальном из возможных значений напряжения силового источника питания и максимальном из возможных значений индуктивности фильтра, т. е. при $R_{н0} = R_{н, макс}$, $U_{п0} = U_{п мин}$ и $L_0 = L_{макс}$. Отметим также, что компенсация отклонения тока нагрузки от эталонного, обусловленного изменением указанных параметров, при таком выборе связана только с уменьшением относительной продолжительности включения нагрузки в цепь силового источника питания γ и, следовательно, исключается выход в насыщение ШИП в динамических режимах работы источника.

Для исключения скользящего режима при таком подходе следует уменьшить значение коэффициента адаптации K_a относительно значения, рассчитанного по формуле (5). Конкретное значение этого коэффициента целесообразно определять на основе зависимостей предельного значения коэффициента адаптации $K_{a пр}$ от бифуркационных параметров, полученных с использованием методики, приведенной в работе [4], и программного комплекса, описанного в работе [5].

Выводы

1. Сохранение заданных динамических качеств системы управления регулируемого источника тока с транзисторным ШИП в условиях изменяющихся параметрах силовой цепи возможно при введении дополнительного контура сигнальной адаптации с эталонной моделью в виде апериодического звена первого порядка с заданной постоянной времени T_m и ПИ-регулятором.

2. Предельное значение коэффициента адаптации K_a при заданной частоте коммутации силовых ключей ограничено условиями устойчивости системы и снижается с уменьшением требуемой постоянной времени T_m эталонного процесса.

3. Параметрический синтез адаптивной системы управления можно производить, используя известную методику [2], если в качестве исходных параметров принять максимальное из возможных значений сопротивления нагрузки и минимальное из возможных значений напряжения силового источника питания.

4. Для исключения скользящего режима при таком подходе следует уменьшить значение коэффициента адаптации K_a относительно значения, рассчитанного по формуле (5). Конкретное значение этого коэффициента целесообразно определять на основе зависимостей предельного значения коэффициента адаптации $K_{a пр}$ от изменяемых параметров, полученных с использованием методики, приведенной в работе [4], и программного комплекса, описанного в работе [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Конкурсного центра фундаментального естествознания (шифр гранта № А03-3.16-159).

Литература

1. Синицын В.А., Толмачев В.А., Томасов В.С. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с произвольной формой выходного параметра // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т.39, №4. С.47-54.
2. Толмачев В.А., Кротенко В.В. Параметрический синтез системы управления программируемого источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, №9. С.49-54.
3. Солодовников В.В., Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями // М.: Машиностроение, 1972, 270 с.
4. Толмачев В.А., Осипов Д.В. Анализ устойчивости к автоколебаниям на субгармонических частотах импульсных источников тока программируемой формы // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. СПб: Издательство СПбГИТМО (ТУ). 2001. С. 132-136.
5. Осипов Д.В. Программный комплекс для анализа устойчивости систем автоматического регулирования тока с широтно-импульсными преобразователями // Современные технологии: Сборник научных статей // Под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. СПбГИТМО (ТУ), 2002. С.267-276.

ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКА В СЛОЕ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Т.Н. Боровинская, Ю.А. Пилюгина

Научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. Е.В. Астрова

Введение

Технология получения упорядоченной "решетки" глубоких каналов с вертикальными стенками была впервые предложена в работе [1]. Процесс включает в себя создание с помощью фотолитографии окон в окисной маске на поверхности n-Si(100), щелочное травление через нее затравочных ямок и анодирование в растворе HF при подсветке с обратной стороны пластины. Получаемый при этом слой макропористого кремния (ma-Si) содержит цилиндрические или квадратные в сечении каналы (макропоры) диаметром от 1 до 10 мкм и глубиной до 300 мкм, образованные на месте затравок. Необходимым условием их получения является равномерное распределение затравочных центров, получаемых при фотолитографии, по всей площади анодирования и правильное соотношение между удельным сопротивлением подложки и периодом фотомаски [2]. На границе между макропористой областью и не подвергшимся анодированию краем пластины образуется довольно широкий переходной слой, где регулярная структура нарушена (поры ветвятся, имеют разную глубину и т.д.). Разнообразные области применения ma-Si [3] зачастую требуют создания на подложке отдельных участков макропористого кремния с резким краем и вертикальными стенками. Участки эти образуют более крупный рисунок, определенным образом ориентированный относительно "решетки" исходного ma-Si. Первая работа, посвященная этой проблеме [4], показала, что попытка создать рисунок в ma-Si с помощью позитивного или негативного фоторезиста не дала положительных результатов. Поэтому предложенная в вышеуказанной работе технология включает заполнение пор и формирование рисунка с лицевой стороны пластины. В дальнейшем этот процесс, получивший название метода Отто [2], позволил удалить определенные области слоя ma-Si и получить на подложке узкие полоски с вертикальными стенками, на которых можно было проводить исследование оптических свойств фотонных кристаллов [5, 6].

В настоящей работе сообщается о более простом процессе создания областей ma-Si с вертикальными стенками, включающей формирование рисунка с обратной стороны пластины. В отличие от метода Отто, образовавшиеся структуры не имеют общей подложки, она тоже подвергается структурированию.

Технологический процесс получения полос макропористого кремния

Исходные пластины Si *n*-типа проводимости ($\rho = 15 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), ориентированные в плоскости (100), разрезали на квадраты размером на $20 \times 20 \text{ мм}$, утоньшали до 200 мкм и полировали с обеих сторон. Дальнейшие операции ясны из схемы процесса, приведенной на рис. 1.

После термического окисления проводилось сквозное щелочное травление знаков совмещения. Затем формировалась треугольная "решетка" затравочных ямок с периодом $A=4 \text{ мкм}$, и осуществлялось фотоэлектрохимическое травление для создания макропористого слоя толщиной 170–180 мкм. На рис. 2 представлена схема установки для фотоэлектрохимического травления.

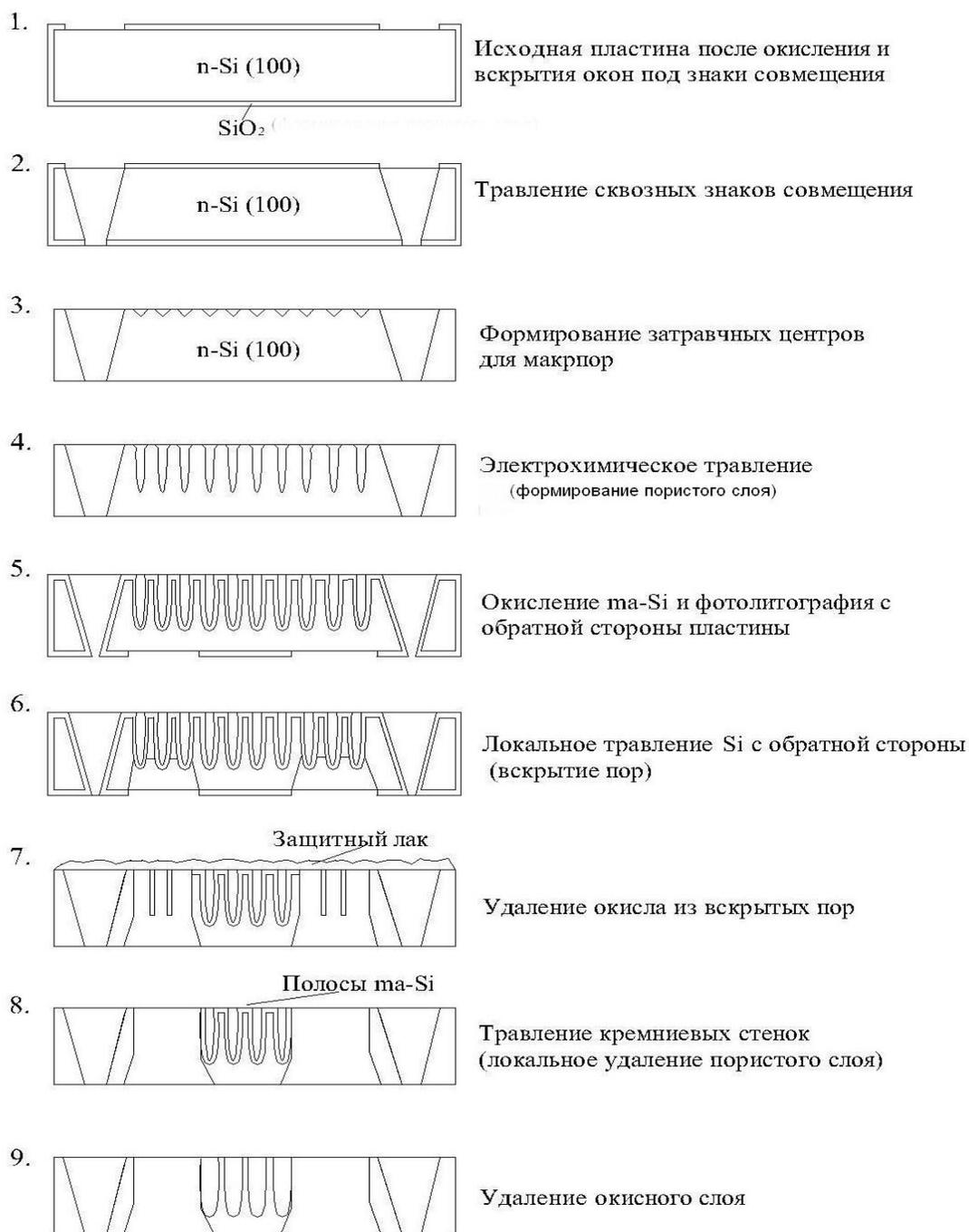


Рис. 1. Схема получения рисунка в макропористом кремнии

Затравки удалялись, образец окислялся ($T=1200^{\circ}\text{C}$, H_2O , 70 мин.), и с помощью фотолитографии по обратной стороне пластины в окисле вскрывались квадратные окна, ориентированные вдоль рядов макропор (этап 5). Небольшой изгиб окисленной пластины был упругим и устранялся с помощью присоса к столику в установке совмещения и экспонирования. Через эти окна проводилось щелочное анизотропное травление, обеспечивавшее локальное удаление подложки на глубину, необходимую для достижения пористого слоя (этап 6). Начальный этап вскрытия пор виден на рис.3.

Дальнейшие операции сводились к удалению окисла из внутренней поверхности пор через вскрытие области с обратной стороны пластины (этап 7) (защитной маской в этом случае является сама кремниевая подложка) и растворению в щелочи тонких кремниевых промежутков между порами (этап 8). Заключительным этапом обычно служило удаление окисла из пор в растворе HF. При необходимости увеличить

пористость использовалось дополнительное окисление с последующим растворением SiO_2 . При этом узкие полоски ma-Si , в отличие от сплошного слоя, не претерпевали заметной деформации.

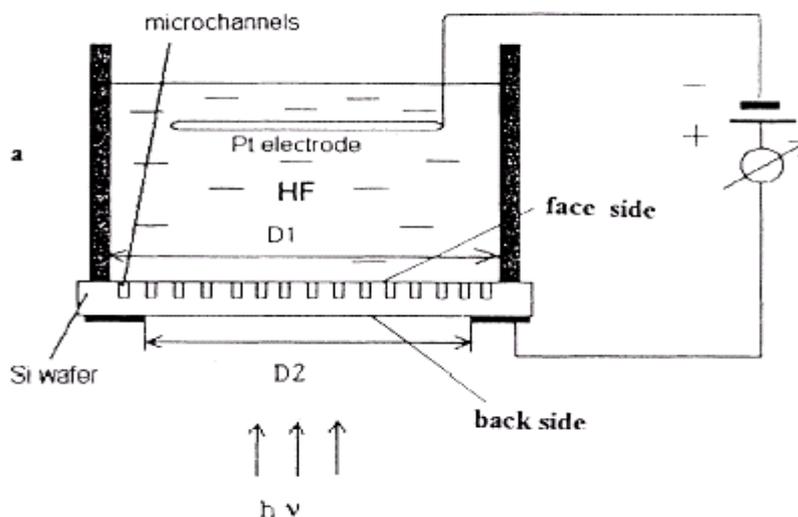


Рис. 2. Ячейка для фотоэлектрохимического травления каналов

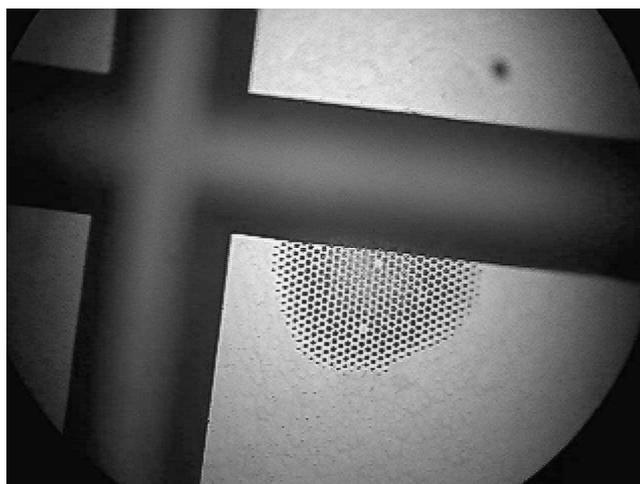


Рис. 3. Изображение обратной стороны пластины на начальном этапе при локальном вскрытии пор. Виден небольшой участок, где открылись доньшки пор. (Оптический микроскоп).

В результате в пластине получались сквозные квадратные окна, разделенные узкими полосками макропористого слоя на подложке. Общий вид участка пластины показан на рис. 4а, вид сбоку – на рис. 4б, изображение полоски в электронном микроскопе – на рис. 4в и 4г. Как видно, формируемые полоски ma-Si имеют вертикальные стенки и ориентированы вдоль рядов макропор. Их ширина в ma-Si составляет около 90 мкм (22–26 рядов).

Заключение

Таким образом, в результате исследования был разработан технологический процесс получения структур на основе упорядоченной решетки макропористого кремния, который не требует сложной процедуры заполнения пор и планаризации поверхности для проведения фотолитографии. Вместо этого фотолитография проводится по обратной стороне пластины. Получаемые с помощью предлагаемого метода структуры с

глубокими вертикальными стенками могут быть использованы для изготовления элементов микромеханики и микрофотоники.

Авторы благодарят А. Нашекина за подготовку иллюстративного материала.

Работа выполнена при поддержке INTAS (грант 01-0642), Программы Минпромнауки "Физика твердотельных наноструктур", Программы РАН "Оптика и лазерная физика" и Президентской программы поддержки научных школ (НШ 758-2003.2).

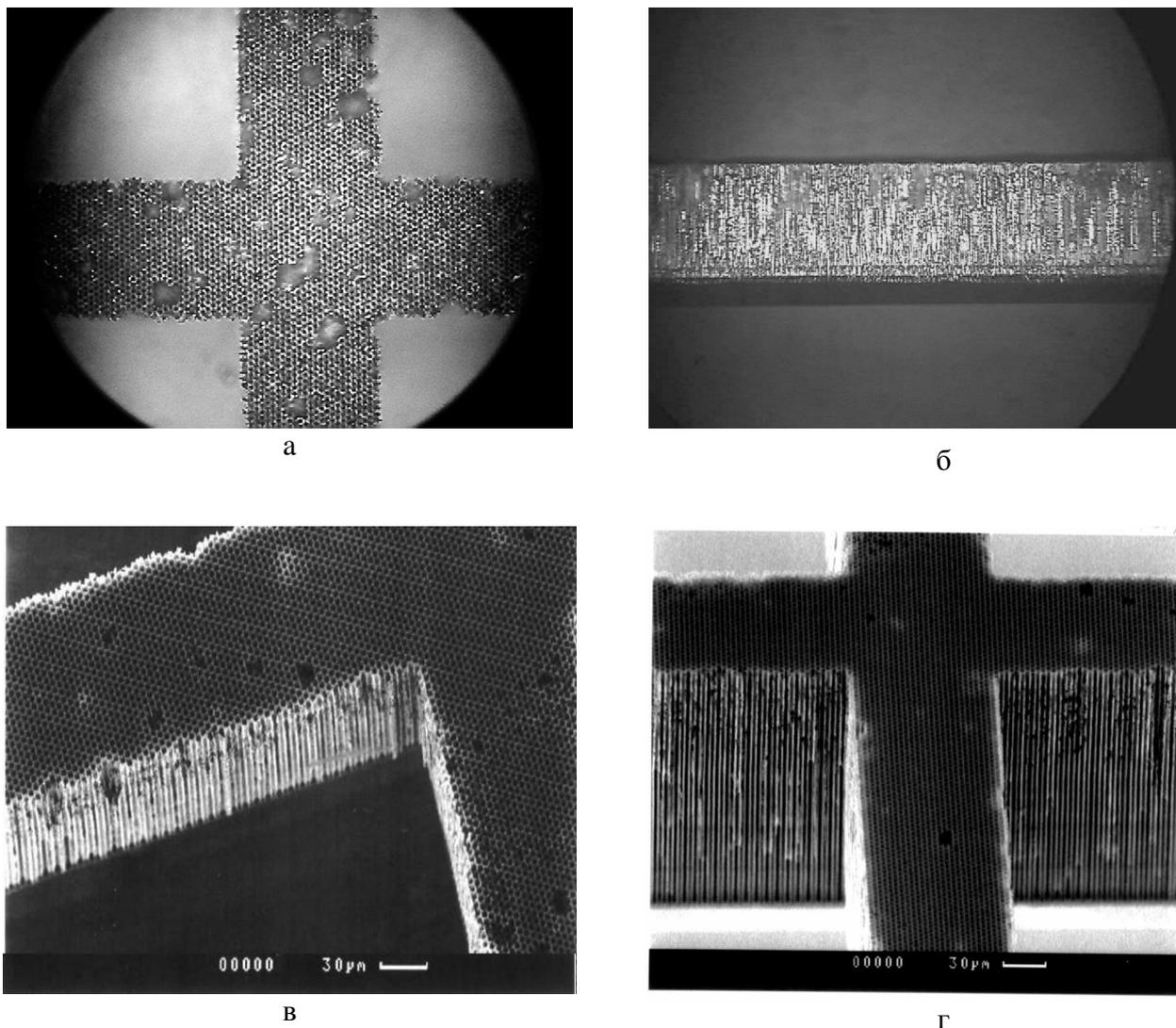


Рис. 4. Полоски макropористого кремния с вертикальными стенками: вид в оптический микроскоп, а - сверху, б – сбоку, в и г - SEM изображения под разными углами. (Период $m\text{-Si } A=4 \text{ мкм}$)

Литература

1. V.Lehmann and H.Foll. Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in n-Type Silicon // *Journal of The Electrochemical Society*. Vol.137, No.2, 1990, P. 653-659.
2. V.Lehmann, U.Gruning. The limits of macropor array fabrication // *Thin Solid Films* 297, 1997, P. 13-17.
3. H.Foll, M.Christophersen, J.Carstensen, G.Haase. Formation and application of porous silicon // *Materials Science and Engineering*. R 39,2002, P.93 - 141.
4. S.Ottow, V.Lehmann, H.Foll. Processing of Three-Dimensional Microstructures Using Macroporous n-Type Silicon // *Journal of The Electrochemical Society*. Vol.143, No.1, 1996, P.385-390.
5. U.Gruning, V.Lehmann, S.Ottow, K Busch. Macroporous silicon with a complete two-dimensional photonic band gap centered at $5\mu\text{m}$ // *Applied Physics Letters*. 68 (6), 1996, P.747-749.
6. S.W.Leonard, H.M.van Driel, K.Busch, S.John, A.Birner, A.-P.Li, F.Muller, U.Gosele, V.Lehmann. Attenuation of optical transmission within the band gap of thin two-dimensional macroporous silicon photonic crystals // *Applied Physics Letters*. Vol.75, No 20, 1999, P. 3063-3065.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ SiGe

А.П. Сидько

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль

Разработана квазитермодинамическая нестационарная модель химического газофазного осаждения SiGe, учитывающая поверхностную кинетику, напряженное состояние эпитаксиального слоя, поверхностную сегрегацию германия. Изучена возможность использования промышленного реактора для роста кремния для получения слоев SiGe. Исследован процесс наращивания на SiGe слоев кремния.

Введение

В современной микроэлектронике все большее признание получают приборы на основе гетероструктур SiGe/Si. До недавнего времени эти гетероструктуры выращивали в основном методами, использующими сверхвысокий вакуум – молекулярно-пучковой эпитаксией (МВЕ) и химическим газофазным осаждением (UHV-CVD) [1]. Однако выгода от использования промышленного оборудования, применяемого для выращивания кремния, и необходимость повышения скорости роста структур стимулируют переход к большим рабочим давлениям [2]. Для ускорения разработки таких процессов требуется модель эпитаксиального роста SiGe, работоспособная в широком диапазоне ростовых условий.

Модель CVD SiGe должна учитывать влияние не только адсорбции и десорбции компонент, но и диффузии адсорбированных атомов, поверхностной сегрегации атомов германия и кремния. В настоящее время создано довольно много моделей этих процессов (см., например, [2–5]), но нигде все перечисленные процессы не рассмотрены в рамках единого подхода, описывающего весь процесс роста SiGe. В работе описана такая квазитермодинамическая модель CVD SiGe.

Стационарная версия модели применена для анализа ростового процесса в промышленном реакторе. С помощью нестационарной версии модели исследован процесс наращивания кремниевых слоев на кристалл SiGe и изучена роль физических эффектов, влияющих на профиль концентрации германия в наращиваемом слое.

1. Описание модели CVD SiGe

Следуя общепринятой практике (см. [2], [4]), можно пренебречь газофазными реакциями и предположить, что SiH₄, GeH₄ и H₂ достигают подложки, не реагируя и не распадаясь в газовой фазе. Падающие молекулы хемисорбируются и распадаются на поверхности подложки на одиночные атомы Si, Ge и H. Атомы Si и Ge встраиваются в кристаллическую решетку, не блокируя свободные адсорбционные узлы. Таким образом, поверхность кристалла покрыта только адсорбированными атомами (адатомами) H, которые перемещаются по ней (поверхностная диффузия), пока в результате столкновения двух атомов они не десорбируют с поверхности в виде молекулярного водорода. Поскольку энергия связи Si–H больше, чем энергия связи Ge–H, адатомы водорода в основном скапливаются на поверхностных атомах Si. Фактором, усложняющим описание ростового процесса, является обмен атомами Si и Ge между верхними атомарными слоями кристалла, приводящий к насыщению поверхностного слоя атомами Ge (поверхностная сегрегация германия).

В модели роста SiGe применен квазитермодинамический подход, при котором считается, что адсорбция и десорбция являются лимитирующими стадиями поверхностных процессов, а остальные процессы (передвижение адатомов по поверхности, встраивание атомов кремния и германия в решетку, обмен атомами между поверхностным и подповерхностными слоями кристалла) происходят в квазиравновесном режиме. Для учета неравномерного распределения адатомов водорода между поверхностными

атомами кремния и германия введены четыре типа поверхностных компонент: свободные адсорбционные узлы (вакансии) на Si и Ge и атомы водорода, адсорбированные на этих узлах (обозначенные, соответственно, $_Si$, $_Ge$, H_Si и H_Ge).

В рамках квазитермодинамического подхода граничные потоки компонент описываются обобщенными соотношениями Герца-Кнудсена для многокомпонентного газа:

$$J_i = (\alpha_{i/_Si}^0 \theta_{_Si} + \alpha_{i/_Ge}^0 \theta_{_Ge}) \beta_i (P_i - P_i^e),$$

где J_i – мольный поток i -ой компоненты ($i = SiH_4$, GeH_4 и H_2), $\alpha_{i/k}^0$ – коэффициент прилипания i -ой газовой компоненты на k -ом типе вакансий ($k = _Si$ и $_Ge$), θ_k – поверхностная концентрация вакансий k -ого типа, $\beta_i = 1/(2\pi\mu_i RT)^{1/2}$ – фактор Герца-Кнудсена i -ой компоненты, μ_i – молярная масса i -ой компоненты, R – газовая постоянная, P_i – парциальное давление i -ой компоненты на поверхности кристалла, P_i^e – термодинамическое парциальное давление i -ой компоненты, являющееся в многокомпонентном газе аналогом насыщенного давления однокомпонентного пара. Следуя [4], предполагается, что все компоненты имеют первый порядок адсорбции. Термодинамические давления компонент связаны между собой квазиравновесными соотношениями

$$\begin{aligned} P_{SiH_4}^e &= K_{SiH_4} (1 - x_s) \gamma_{Si} (x_s) (P_{H_2}^e)^2 \\ P_{GeH_4}^e &= K_{GeH_4} x_s \gamma_{Ge} (x_s) (P_{H_2}^e)^2 \end{aligned},$$

где K_{SH_4} — константа равновесия поверхностной реакции $SH_4(gas) \Leftrightarrow S(solid) + 2H_2(gas)$ ($S = Si, Ge$); $x_s = (\theta_{_Ge} + \theta_{H_Ge}) / \theta_\sigma$ – доля германия в поверхностном слое кристалла; $\theta_\sigma = \sum_k \theta_k$ – суммарная концентрация адсорбционных узлов (здесь $k = _Si, _Ge, H_Si$ и H_Ge); γ_s – коэффициент активности s -ой составляющей SiGe, зависящий от мольной доли германия и учитывающий влияние упругих деформаций на энтальпию кристалла. Точные выражения для $\gamma_s(x_s)$ находятся по методу, разработанному в [6].

В общем случае нестационарная модель должна описывать все протекающие процессы как нестационарные. Это, в первую очередь, изменение покрытия поверхности кристалла адатомами водорода, которое определяется лимитирующими стадиями: адсорбцией и десорбцией. Зависимость суммарного покрытия адатомов водорода (адсорбированных и на атомах Si и на атомах Ge) от времени можно описать следующим уравнением:

$$\frac{d}{dt} (\theta_{H_Si} + \theta_{H_Ge}) = \sum_i f_{H,i} J_i,$$

где $f_{H,i}$ – число атомов водорода в молекуле i -ой компоненты. В правой части уравнения приведен мгновенный суммарный поток атомов водорода из газовой фазы на поверхность кристалла, который и определяет изменение покрытия адатомов водорода.

Поверхностная сегрегация Ge часто рассматривается как квазиравновесный процесс (например, в [2]), однако авторы [5] убедительно показали, что ее следует рассматривать как существенно неравновесную в условиях нестационарного ростового процесса. В общепринятой обменной модели, впервые предложенной в [3], нестационарная поверхностная сегрегация описывается двумя кинетическими уравнениями:

$$\begin{aligned} \theta_\sigma \frac{dx_s}{dt} &= J_{GeH_4} - J_{x_s} + J_s \\ \theta_\sigma \frac{dx_b}{dt} &= J(x_s - x_b) - J_s \end{aligned},$$

где x_b – доля германия в толще кристалла, $J = J_{SiH_4} + J_{GeH_4}$ – суммарный поток вещества, идущий в поверхность кристалла, J_s – сегрегационный поток. Как и в стационарном случае, сегрегационный поток равен суммарной скорости обмена атомами кремния и германия между двумя верхними слоями кристалла

$$J_s = \left[K_{_S}^+ \gamma_{Ge}(x_b) \gamma_{Si}(x_s) x_b \theta_{_Si} - K_{_S}^- \gamma_{Si}(x_b) \gamma_{Ge}(x_s) (1-x_b) \theta_{_Ge} \right] + \left[K_{H_S}^+ \gamma_{Ge}(x_b) \gamma_{Si}(x_s) x_b \theta_{H_Si} - K_{H_S}^- \gamma_{Si}(x_b) \gamma_{Ge}(x_s) (1-x_b) \theta_{H_Ge} \right], \quad (1.1)$$

где $K_{_S}^\pm$ и $K_{H_S}^\pm$ – константы скоростей идущих параллельно реакций межслойного обмена: $_Si + Ge(\text{solid}) \Leftrightarrow _Ge + Si(\text{solid})$ и $H_Si + Ge(\text{solid}) \Leftrightarrow Si(\text{solid}) + H_Ge$. Две реакции введены, поскольку предполагается, что свободные и покрытые водородом поверхностные атомы находятся в различных энергетических состояниях (см. [2]).

Поверхностная диффузия адатомов водорода является быстрым процессом по сравнению со временем роста одного атомарного слоя кристалла, что позволяет описать этот процесс стационарным уравнением. Введя реакцию $H_Si + Ge \Leftrightarrow Si + H_Ge$, можно записать условие ее равновесия

$$\theta_{H_Ge} \theta_{_Si} = K_{diff}^e \theta_{_Ge} \theta_{H_Si},$$

где K_{diff}^e – константа равновесия диффузии.

Завершает базовую систему уравнений соотношение, приравнивающее потоки десорбированного водорода, выраженные в терминах термодинамических давлений и с использованием константы скорости десорбции:

$$\left(\alpha_{H_2/_Si}^0 \theta_{_Si} + \alpha_{H_2/_Ge}^0 \theta_{_Ge} \right) \beta_{H_2} P_{H_2}^e = K_{H_2/_Si} \theta_{H_Si} + K_{H_2/_Ge} \theta_{H_Ge}.$$

Здесь $K_{H_2/k}$ – константа скорости десорбции водорода с k -ого поверхностного атома ($k = _Si, _Ge$).

Для того, чтобы замкнуть систему уравнений, можно записать подобное соотношение для любой другой газофазной компоненты, поскольку для остальных компонент эти соотношения должны будут выполняться автоматически. Нами был выбран водород, так как для него известны необходимые данные по адсорбции и десорбции, как с поверхности кремния, так и с поверхности германия.

Таким образом, только медленные лимитирующие стадии (поверхностная сегрегация германия и баланс водорода в адсорбированном слое) описываются дифференциальными уравнениями. Все остальные процессы считаются быстрыми (квазиравновесными) и описываются алгебраическими уравнениями.

2. Верификация и анализ модели

Практически все параметры поверхностной кинетики стационарной и нестационарной моделей взяты из литературных источников (см. Таблицу). Константы прямых реакций межслойного обмена подобраны так, чтобы обеспечить наилучшее совпадение расчетов с экспериментом, поскольку в литературе существует большой разброс значений констант скорости обменных реакций. Большинство авторов использует в своих работах кинетический барьер $E_s = 1,63$ эВ и энтальпию сегрегации $\Delta E_s = 0,28$ эВ, которые были впервые получены в [3] из профилей концентрации германия в слое кремния, выращенном методом МВЕ. Для узлов, занятых адатомами водорода, энтальпия сегрегации $\Delta E_{sH} = 0,10$ эВ была оценена в [2] по данным МВЕ с газовым источником. Авторы [5] использовали для оценки энергий упрощенную модель процесса сегрегации и получили значения $E_s = 2,35$ эВ и $\Delta E_s = 0,19$ эВ. Необычно низкая величина барьера $E_s = 0,12$ эВ приведена в работе [10], но вместо обычно используемой в качестве предэкспоненты Дебайевской частоты ($5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$) там использована очень малая величина 20 с^{-1} .

Нестационарная модель применена для изучения профилей концентрации германия в покрывающем слое Si, выращенном поверх SiGe. Из рис. 1 видно, что расчет с удовлетворительной точностью воспроизводит экспоненциальное уменьшение концентрации германия в верхнем слое по мере наращивания слоя кремния. Исследование влияния различных физических факторов на формирование профилей концентрации германия в слоях кремния проведено с помощью серии расчетов, в которых поочередно "отключался" один из поверхностных процессов. Результаты этих расчетов приведены на рис. 2, где профиль концентрации германия, рассчитанный с учетом всех поверхностных процессов (А) сравнивается с профилями, полученные при условии нулевой энтропии сегрегации (В), в случае отсутствия напряжений (С) и при нулевых константах реакций межслойного обмена атомами, то есть при его полном отсутствии (D).

Константа	Предэкспонент, (кмоль, м, с)	Энергия активации, Дж/кмоль	Ссылка
Константы скорости адсорбции			
$\alpha_{SiH_4/Si}$	$5.567 \cdot 10^5$	$7.536 \cdot 10^6$	[4]
$\alpha_{SiH_4/Ge}$	$3.513 \cdot 10^4$	$1.507 \cdot 10^7$	[4]
$\alpha_{GeH_4/Si}$	$4.802 \cdot 10^6$	$7.536 \cdot 10^6$	[4]
$\alpha_{GeH_4/Ge}$	$7.1 \cdot 10^4$	$1.507 \cdot 10^7$	[4]
$\alpha_{H_2/Si}$	$8.887 \cdot 10^6$	$7.231 \cdot 10^7$	[7]
$\alpha_{H_2/Ge}$	$8.887 \cdot 10^6$	$7.231 \cdot 10^7$	[7]
Константы скорости десорбции			
$K_{H_2/Si}$	$7.9 \cdot 10^{11}$	$1.976 \cdot 10^8$	[8]
$K_{H_2/Ge}$	$1.0 \cdot 10^{13}$	$1.505 \cdot 10^8$	[9]
Константы реакций межслойного обмена			
K_{S}^+	$5 \cdot 10^{12}$	$1.987 \cdot 10^8$	
$K_{H,S}^+$	$5 \cdot 10^{12}$	$1.987 \cdot 10^8$	
K_{S}^e	1.0	$-2.701 \cdot 10^7$	[2]
$K_{H,S}^e$	1.0	$-9.684 \cdot 10^6$	[2]
Константа равновесия диффузии адатомов водорода			
K_{diff}^e	3.349	$5.024 \cdot 10^7$	[4]

Таблица. Параметры поверхностной кинетики

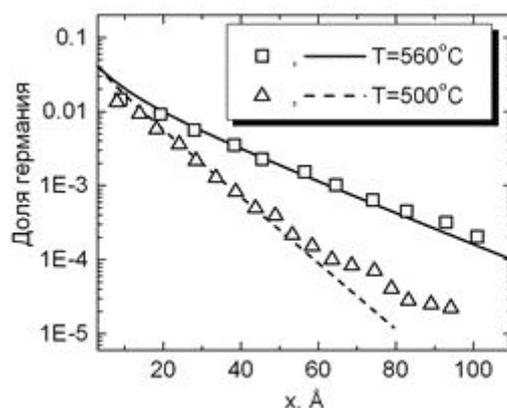


Рис. 1. Профили концентрации германия в покрывающем слое кремния в сравнении с данными [5]

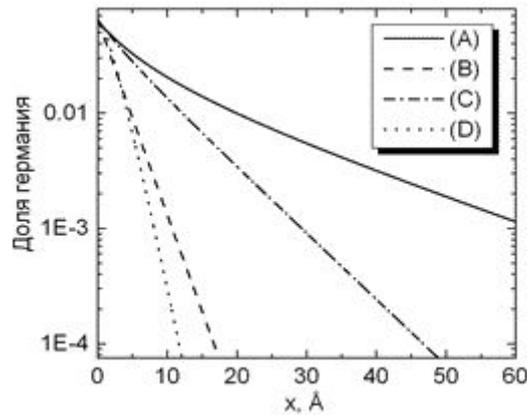


Рис. 2. Профили концентрации германия, вычисленные в полной постановке задачи (A), с нулевой энтальпией сегрегации (B), с отключенными упругими напряжениями (C) и с нулевыми константами реакций обмена (D).

Для описания профиля германия в слое кремния удобно ввести дополнительную характеристику – характерный масштаб уменьшения концентрации германия λ , равный толщине слоя кремния, при которой концентрация германия станет в e раз меньше исходной. Наибольшее влияние на λ оказывает сегрегация германия. При энтальпии сегрегации, равной нулю, т.е. при константах равновесия, равных единице, λ заметно уменьшается. Используя оценку, данную в [5]: $\lambda \sim a(1 + K_s^e)$, где a – толщина монослоя кристалла, можно получить, что $\lambda \approx 2a$. Полное же отключение обмена между слоями приводит к дальнейшему уменьшению λ , при этом профиль концентрации германия формируется только за счет десорбции адатомов водорода, которая, впрочем, играет заметно меньшую роль, чем сегрегация. Влияние упругих напряжений на формирование профиля концентрации германия учтено путем введения в уравнение (1.1) коэффициентов активности γ_s . При "отключении" напряжений γ_s полагаются равными единице.

Гораздо больше данных есть по стационарному росту слоев SiGe из смеси SiH₄-GeH₄-H₂. Пример верификации стационарной модели приведен на рис. 3, где рассчитанные зависимости скорости роста кристалла от температуры для чистых компонент (Si и Ge) и для SiGe даны в сравнении с экспериментальными данными [11] и [1]. Можно утверждать, что модель количественно воспроизводит экспериментальную температурную зависимость скорости роста и на высоко-, и на низкотемпературных участках, где скорость роста лимитируется переносом силана и германа и десорбцией водорода, соответственно. Также воспроизводится немонотонная зависимость скорости роста от доли германия в кристалле (рис. 4). Кроме того, модель позволяет дать простое объяснение последней зависимости: такой характер зависимости связан с взаимодействием двух противоположных эффектов. Первый из них – усиление десорбции водорода по мере увеличения доли германия. Второй – подавление адсорбции из-за меньших коэффициентов прилипания компонент на германии. При малых концентрациях германия в поверхностном слое кристалла, когда покрытие водородом велико, определяющим является первый фактор, однако при больших концентрациях германия рост кристалла лимитируется уже прилипанием газофазных компонент. На рис. 4 также представлены кривые, рассчитанные без учета поверхностных механизмов, что позволяет оценить влияние, которое они оказывают на ростовой процесс. Расчеты показывают, что важнейшую роль в этом случае играет сегрегация, поскольку без ее влияния содержание германия в поверхностном слое кристалла было бы недостаточно велико для заметного снижения скорости роста (для сравнения можно сказать, что при доле германия в объеме кристалла, равной 10%, его доля в поверхностном слое составляет около 60%, а при 40% — около 90%).

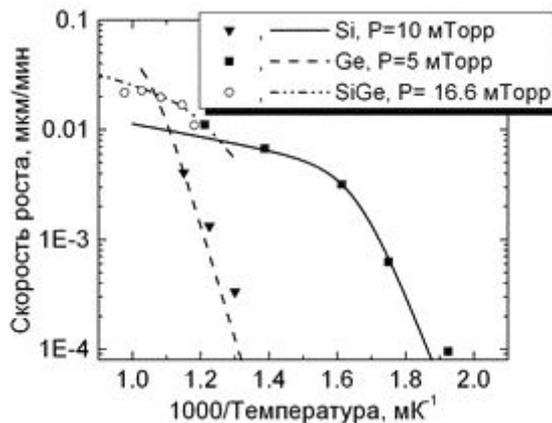


Рис. 3. Зависимости скоростей роста слоев чистых кремния и германия от температуры в сравнении с экспериментальными данными Ли и др. [11] и зависимость скорости роста слоев SiGe от температуры в сравнении с экспериментальными данными Боццо и др. [1].

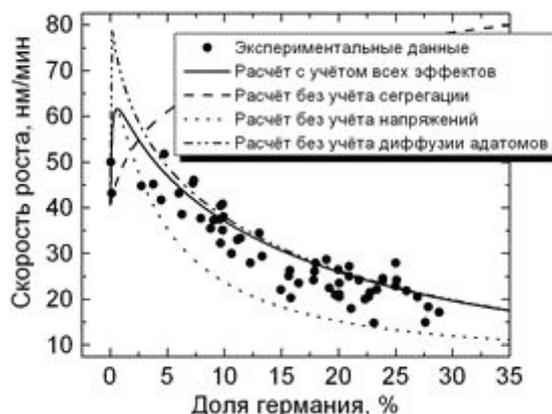


Рис. 4. Зависимости скорости роста SiGe от доли германия в кристалле, вычисленные в полной постановке задачи и с поочередно отключенными поверхностными процессами в сравнении с экспериментальными данными Боццо и др. [1]

3. Результаты расчетов

Верифицированная модель применена для моделирования процесса роста SiGe в промышленном одноподложечном реакторе. В базовом режиме использованы следующие значения параметров процесса: общее давление 100 *torr*, базовая температура 650°C, базовое соотношение расходов германа и силана — 0,06. Проведены серии расчетов с вариацией температуры подложки и соотношения концентраций компонент во входной смеси. Полученные результаты представлены на рис. 5–12.

Картина течения в реакторе и распределение температуры в горизонтальном сечении реактора на уровне подложки, в трех поперечных сечениях и в центральном продольном сечении приведены на рис. 5. Смесь, поступающая в реактор, быстро нагревается от горячей подложки, что приводит к образованию тонкого температурного пограничного слоя. Распределение температуры и течение практически равномерны во всем реакторе, за исключением области над входом в ростовую камеру. Изображенные на рис. 6 и 7 распределения массовых долей силана и германа возникают в результате взаимодействия двух факторов: поверхностных реакций и переноса компонент. Видно, что на подложке силан и герман в основном разлагаются, а у крышки реактора их концентрации почти не отличаются от концентраций на входе в реактор. Эти тяжелые компоненты за счет термодиффузии уходят в холодную область (верхнюю часть реактора), так что там их концентрации превышают входные.

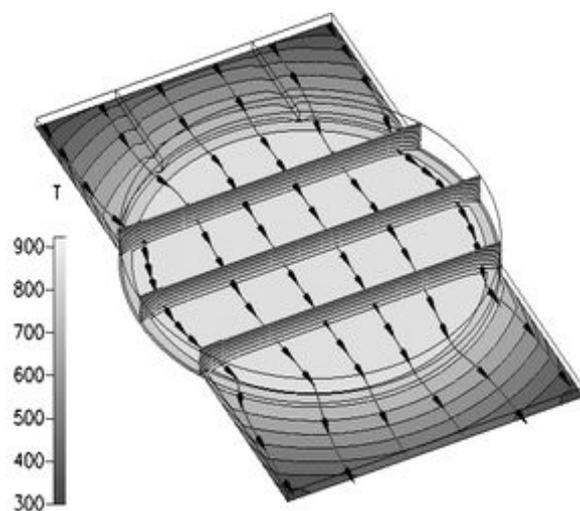


Рис. 5. Базовый режим. Распределение температуры и линии тока в реакторе.

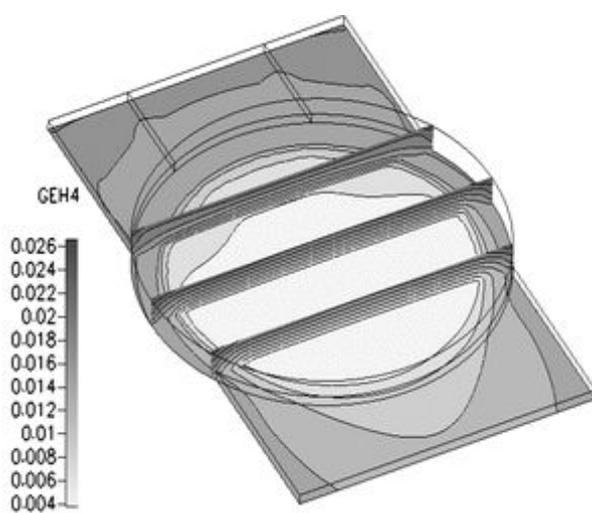


Рис. 6. Базовый режим. Распределение германа по реактору

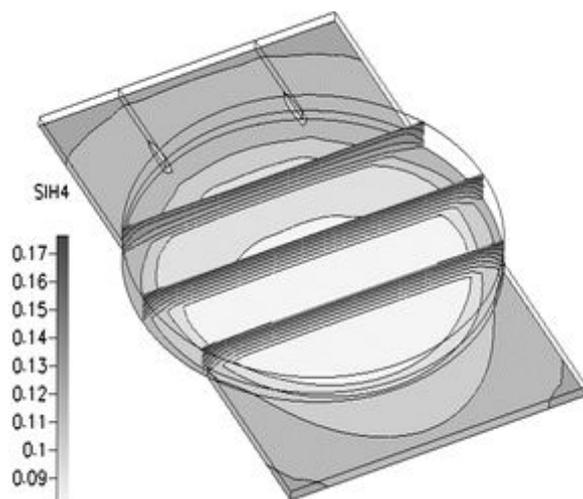


Рис. 7. Базовый режим. Распределение силана по реактору

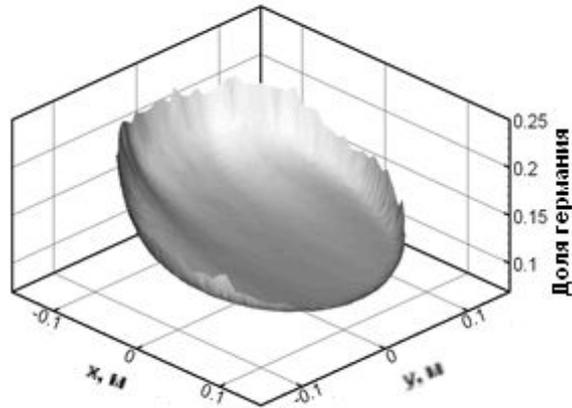


Рис. 8. Базовый режим. Распределение доли германия по подложке

Рассчитанные для базового режима распределения доли германия и скорости роста по поверхности подложки представлены на рис. 8 и 9. Скорость роста кристалла и доля германия незначительно уменьшаются вдоль подложки, что может быть связано с истощением силана и германа. Распределения этих характеристик поперек подложки достаточно однородны.

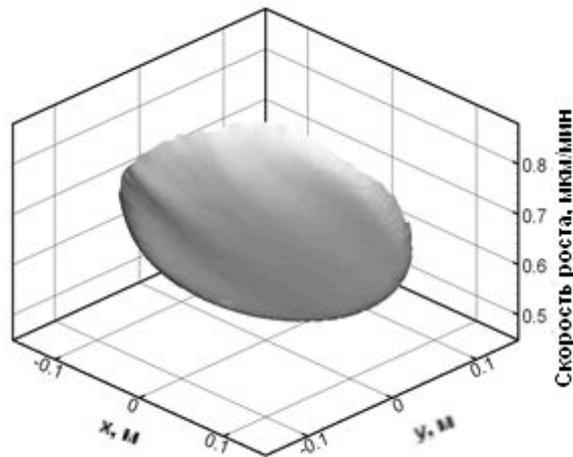


Рис. 9. Базовый режим. Распределение скорости роста по подложке

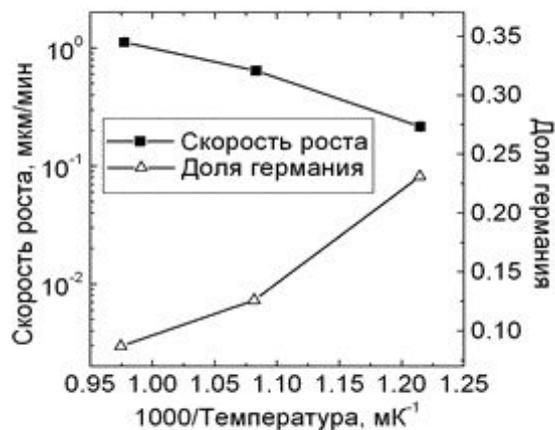


Рис. 10 Зависимость скорости роста и доли германия в центре подложки от температуры

На рис. 10 и 11 приведены зависимости скоростей роста и доли германия в центре подложки от температуры и соотношения расходов силана и германа. Изменение температуры подложки (от 550°C до 750°C) привело к заметному изменению скорости роста. При снижении температуры скорость роста уменьшилась, при увеличении — увеличилась, как и можно было ожидать. В отличие от скорости роста, доля германия в кристалле уменьшилась при увеличении температуры. Выделить главную причину этого трудно. К такому результату может привести то, что при изменении температуры изменяются соотношения коэффициентов прилипания германа и силана (как явно, так и неявно — за счет изменения констант сегрегации), но, поскольку зависимость доли германия в кристалле от доли германа у поверхности кристалла слабо зависит от температуры, то в этом случае главную роль, видимо, играет термодиффузия. Изменение соотношения расходов германа и силана (от 0,02 до 0,10) привело к пропорциональному изменению доли германия в кристалле, поскольку при фиксированной температуре не изменяется соотношение коэффициентов прилипания этих компонент, которое определяет долю германия в кристалле.

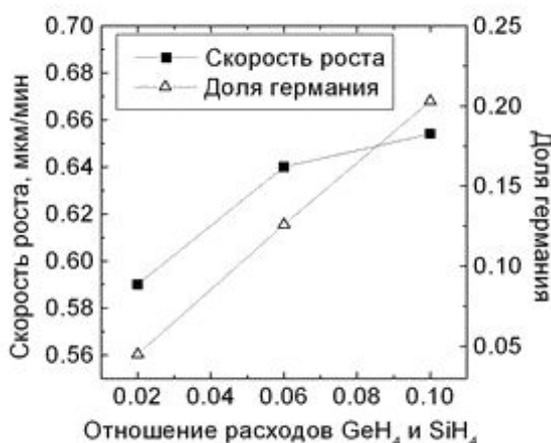


Рис. 11. Зависимость скорости роста и доли германия в центре подложки от отношения расходов германа и силана

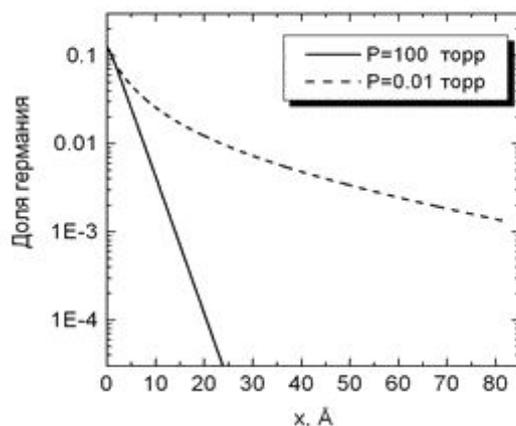


Рис. 12. Профили концентрации германия в покрывающем слое кремния при низком и высоком давлениях

Нестационарная версия модели была применена для исследования скорости уменьшения доли германия в покрывающем слое кремния при типичных ростовых условиях в реакторе. На рис. 12 приведены профили концентрации германия при рабочем давлении 100 *торр* и при типичном для исследовательских работ давлении в 0,01 *торр*. Скорость уменьшения доли германия для высоких давлений заметно больше, чем

для низких. В общем случае, увеличение скорости роста кристалла приводит к взаимодействию двух противоположно направленных тенденций. С одной стороны, поверхность растущего кристалла быстрее движется в пространстве, и изменение состава кристалла за счет сегрегации происходит в большем количестве слоев. С другой стороны, при большем потоке кремнийсодержащих компонент на поверхность доля германия становится меньше. Эти две тенденции могут быть соотнесены с двумя характерными скоростями затухания, приведенными в [5]. В данном случае доминирует тенденция к увеличению этой скорости с увеличением давления, а значит, и скорости роста. Этот результат позволяет предположить, что выращивание гетероструктур Si/SiGe в промышленных условиях может решить задачу получения структур с узкими переходными слоями

Заключение

В работе описана квазитермодинамическая модель CVD SiGe, учитывающая поверхностную кинетику, напряженное состояние эпитаксиального слоя, поверхностную сегрегацию и неравномерное покрытие атомов кремния и германия адсорбированными атомами водорода. Стационарная версия модели количественно воспроизводит основные экспериментально наблюдаемые особенности роста SiGe. Моделирование CVD SiGe в промышленном реакторе для роста кремния показало, что этот реактор может быть применен для роста слоев SiGe. Нестационарные расчеты позволили воспроизвести профили концентрации германия в слое кремния. Показано, что сегрегация Ge является основным фактором, определяющим скорость уменьшения концентрации германия, в то время как десорбция водорода не оказывает на нее почти никакого влияния. При переходе от низких давлений к более высоким, характерным для промышленных процессов, наблюдается увеличение скорости роста кристалла и скорости уменьшения концентрации германия в слое.

Литература

1. S. Bozzo, J.-L. Lazzari, C. Coudreau, A. Ronda, F. Arnaud d'Avitaya, J. Derrien, S. Mesters, B. Hol-laender, P. Gergaud, and O. Thomas, *J.Cryst.Growth*, 216, 171 (2000).
2. H. Kim, N. Taylor, T.R. Bramblett, and J.E. Greene, *J.Appl.Phys.*, 84, 6372 (1998).
3. S. Fukatsu, K. Fujita, H. Yaguchi, Y. Shiraki, and R. Ito, *Surf.Sci.*, 267, 79 (1992).
4. N.M. Russell and W.G. Breiland, *J.Appl.Phys.*, 73, 3525 (1992).
5. E.S. Tok, N.J. Woods, and J. Zhang, *J.Cryst.Growth*, 209, 321 (2000).
6. A.N. Alexeev and S.Yu. Karpov, *J.Cryst.Growth*, 162, 15 (1996).
7. P. Bratu, K.L. Kompa, and U. Höfer, *Chem.Phys.Lett.*, 251, 1 (1996).
8. P.M. Garone, J.C. Sturm, P.V. Schwartz, S.A. Schwarz, and B.J. Wilkens, *Appl.Phys.Lett.*, 56, 1275 (1990).
9. T.R. Bramblett, Q. Lu, N.-E. Lee, N. Taylor, M.-A. Hasan, and J.E. Greene, *J.Appl.Phys.*, 77, 1504 (1995).
10. K. Nakagawa, Y. Kimura, and M. Miyao, *J.Cryst.Growth*, 175/176, 481 (1997).
11. C. Li, S. John, E. Quinones, and S. Banerjee, *J.Vac.Sci.Technol. A*, 14, 170 (1996).

РОЛЬ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕНОСА И ПОВЕРХНОСТНОЙ ХИМИИ В ПРОЦЕССЕ ГИДРИДНОЙ ГАЗОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ GaN

А.П. Сидько

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль

Квазитермодинамическая модель гидридной газофазной эпитаксии GaN применена для моделирования ростового процесса в промышленном реакторе. Проведено параметрическое исследование ростового процесса и сравнение результатов с экспериментальными данными. Показано, что перенос компонент в реакторе существенно влияет на скорость роста и качество выращиваемого кристалла.

Введение

Полупроводники на основе нитридов элементов III группы (AlN, GaN, InN) в настоящее время считаются одними из наиболее перспективных материалов для создания коротковолновых оптоэлектронных приборов и мощных высокочастотных электронных приборов. К тому же, эти материалы могут быть использованы в электронных приборах, способных функционировать при высоких температурах и в химически агрессивных средах. Но развитие в этой области сдерживается отсутствием недорогих нитридных подложек. Используемые обычно подложки из сапфира и карбида кремния имеют сильно отличающиеся от нитридов постоянные решетки и коэффициенты теплового расширения, что приводит к образованию многочисленных дислокаций и других дефектов кристаллической структуры, ухудшающих характеристики выращиваемых кристаллов. В этой связи становится актуальной задача разработки малозатратной технологии производства нитридных подложек.

Для промышленного производства подложек обычно применяют технологии, основанные на методе сублимационного роста кристаллов. Но промышленная технология сублимационного роста в настоящее время разработана только для SiC подложек, а эти подложки не могут быть использованы для получения нитридных структур требуемого качества. Перенос традиционной сублимационной технологии (испарение из порошка) на GaN приводит к очень низким скоростям роста кристалла, по причине малой реакционной способности азота на поверхности GaN [1]. Еще одним недостатком сублимационной технологии является нестабильность и быстрая деградация источника Ga [2]. Альтернативой сублимационному методу является выращивание методом галидной газофазной эпитаксии (HVPE) "квази-объемных" монокристаллических нитридных подложек. Для уменьшения плотности дислокаций этот метод обычно сочетают с латеральным эпитаксиальным разрачиванием (ELOG), являющимся вариантом метода селективного роста [3,4]. Благодаря этому в последнее время достигнуты скорости роста 150–200 мкм/ч, а плотность дислокаций удалось снизить до $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$.

Но остаются проблемы, сдерживающие дальнейшее развитие этого метода. В частности, интенсивный рост на стенках реактора паразитных депозитов (поликристаллического GaN) и высокая чувствительность ростового процесса к особенностям течения и переноса вещества в реакторе. Для решения второй проблемы надо обеспечить однородное течение над подложкой, смешивая компоненты вдали от нее, но для уменьшения количества депозитов необходимо избежать перемешивания компонентов вблизи стенок реактора. Для того чтобы разрешить это противоречие, нужна оптимизация процесса, которую можно провести с использованием адекватной модели ростового процесса и которую можно использовать также в трехмерных расчетах.

В данной работе описывается квазитермодинамическая модель HVPE GaN, приводятся результаты параметрического исследования ростового процесса в горизонтальном реакторе, и проводится их сравнение с экспериментальными данными из работы [5].

1. Квазитермодинамическая модель HVPE GaN

Квазитермодинамический подход был разработан для унифицированного макроскопического описания поверхностной кинетики в процессах выращивания кристаллов из газовой фазы. Ранее этот подход уже применялся для моделирования роста различных кристаллов, в том числе и нитридов элементов III группы [6,7]. В рамках этого подхода межфазный массообмен (адсорбция и десорбция) рассматриваются как лимитирующая стадия поверхностных процессов. Для применения этого подхода к конкретному ростовому процессу необходимо выбрать основные активные компоненты. Анализ термодинамических расчетов [8,9] и данных масс-спектрометрии показал, что в случае с HVPE GaN таких компонент пять: GaCl, NH₃, H₂, HCl и N₂. Образование GaCl₃ из GaCl и HCl термодинамически невыгодно при типовых ростовых условиях HVPE GaN, как в газовой фазе, так и на поверхности кристалла. В рассматриваемом диапазоне температур (1000–1100°C) молекулы аммиака нестабильны с термодинамической точки зрения, но распад аммиака на N₂ и H₂ в газовой фазе практически полностью блокируется высоким кинетическим барьером [10]. Поэтому в модели HVPE GaN можно пренебречь газофазными реакциями между рассматриваемыми компонентами.

В рамках квазитермодинамического подхода потоки компонент на поверхность GaN описываются обобщенными соотношениями Герца-Кнудсена для многокомпонентного газа:

$$J_i = \alpha_i \beta_i (P_i^w - P_i^e),$$

где α_i – коэффициент прилипания i -ой компоненты ($i = \text{GaCl}, \text{NH}_3, \text{HCl}, \text{H}_2, \text{и N}_2$), $\beta_i = (2\pi\mu_i RT)^{-1/2}$ – фактор Герца-Кнудсена i -ой компоненты, μ_i — молярная масса i -ой компоненты, R – газовая постоянная, P_i^w – парциальное давление i -ой компоненты на поверхности GaN, P_i^e – термодинамическое парциальное давление i -ой компоненты, являющееся в многокомпонентном газе аналогом насыщенного давления однокомпонентного пара.

Потоки компонент удовлетворяют стехиометрическим соотношениям, отражающим то, что атомы Ga и N встраиваются в GaN с одинаковой скоростью, равной скорости роста кристалла, а для атомов H и Cl поверхность GaN непроницаема:

$$J_{\text{NH}_3} + 2J_{\text{N}_2} = J_{\text{GaCl}}$$

$$J_{\text{GaCl}} + J_{\text{HCl}} = 0$$

$$3J_{\text{NH}_3} + 2J_{\text{H}_2} = 0$$

Термодинамические давления компонент связаны между собой квазиравновесными соотношениями

$$P_{\text{GaCl}}^e P_{\text{NH}_3}^e = K_1 P_{\text{HCl}}^e P_{\text{H}_2}^e$$

$$\left(P_{\text{NH}_3}^e\right)^2 = K_2 P_{\text{N}_2}^e \left(P_{\text{H}_2}^e\right)^3,$$

где K_i – константы равновесия ростовой реакции $\text{GaCl} + \text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{GaN}(\text{solid}) + \text{HCl} + \text{H}_2$ и реакции распада аммиака на поверхности кристалла $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$. Эти константы определяются термодинамическими свойствами веществ, участвующих в реакциях.

Для того чтобы завершить построение системы уравнений, необходимо определить коэффициенты прилипания компонент α_i . Известно, что коэффициент прилипания молекулярного азота очень мал [6, 7], что приводит к подавлению поверхностных реакций, в которых участвует N₂, например, распад аммиака. В [6, 7] на основании данных по испарению GaN в вакууме получена температурная зависимость: $\alpha_{\text{N}_2}(T) = 2.31 \cdot 10^4 \exp(-1.966 \cdot 10^8 / RT)$, что дает при атмосферном давлении и рабочей

температуре $\sim 1050^\circ\text{C}$ $\alpha_{N_2}(T) \sim 4 \cdot 10^{-12}$. Проведенные расчеты в рамках трехмерной модели показали, что при таком $\alpha_{N_2}(T)$ скорость роста GaN занижена (см. рис. 1). Это может быть связано с переоценкой скорости распада аммиака. Гораздо лучшее совпадение с экспериментальными данными получено при $\alpha_{N_2}(T) \sim 10^{-15}$ (рис. 1), что соответствует практически полному подавлению распада аммиака на поверхности GaN.

Для остальных компонент кинетические ограничения могут стать существенными, если коэффициент прилипания будет меньше числа Кнудсена (при атмосферном давлении порядка 10^{-5}). Однако, α_i могут достигать столь малых значений только при низких температурах ($T \leq 900^\circ\text{C}$) [8]. При больших температурах коэффициенты прилипания всех компонент (кроме молекулярного азота) вполне могут быть приняты равными единице.

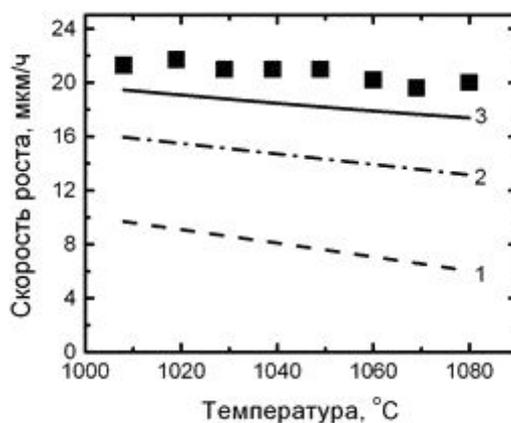


Рис. 1. Зависимость скорости роста GaN от температуры в сравнении с данными [5]. $\alpha_{N_2}(T)$ из работы [7] (1), $\alpha_{N_2}(T) \leq 10^{-15}$ (2), и при условии осаждения депозита только на вращающемся диске (3)

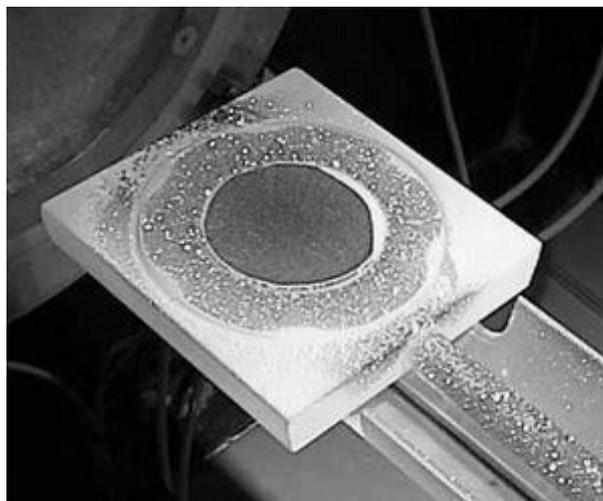


Рис. 2. Экспериментально наблюдаемое распределение депозита по реактору: вокруг вращающегося диска и на расположенных ниже по течению (в правом нижнем углу снимка) элементах реактора

Одним из основных требований к модели HVPE GaN является адекватное описание роста депозитов на различных частях реактора. Существуют довольно противоречивые данные по росту депозитов, но преобладающим является мнение, что рост поликристаллического GaN происходит посредством того же кинетического механизма, что и монокристалла GaN. Существенным отличием может быть начальная задержка осаж-

дения GaN на кварцевых поверхностях, связанная с тем, что нуклеация начинается при достижении критической величины локального пересыщения. Проведенные расчеты, учитывающие либо осаждения депозитов на всех поверхностях реактора, либо только на вращающемся диске с подложкой, показали, что в последнем случае достигается лучшее совпадение с экспериментом (рис. 1). Этот результат подтверждается наблюдаемой на практике картиной осаждения депозитов. На рис. 2 хорошо видно, что депозиты осаждаются в основном около подложки и на расположенных ниже по течению элементах. Таким образом, по-видимому, образование депозитов в малой степени влияет на скорость роста кристалла, что позволяет в дальнейшем пренебречь этим эффектом.

2. Параметрическое исследование HVPE GaN

Для проверки модели было проведено параметрическое исследование процесса, в ходе которого поочередно варьировалась подача HCl, NH₃ и H₂. Вариация подачи компонента сопровождалась соответствующим изменением подачи N₂, так что суммарный расход через все входы оставался постоянным. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по скоростям роста, измеренными в центре подложки (см. рис. 3–5), показывает, что расчеты в целом количественно воспроизводят наблюдаемые зависимости, за исключением области малых расходов H₂.

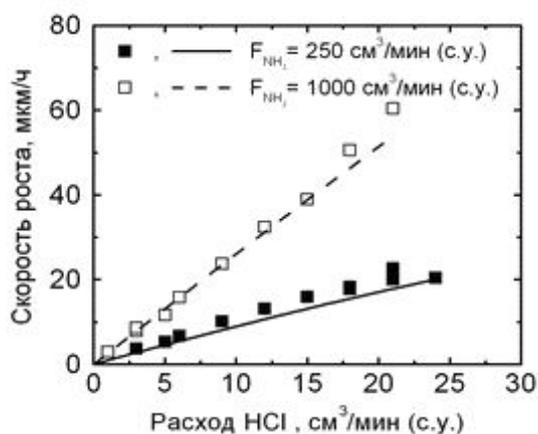


Рис. 3. Зависимость скорости роста GaN от расхода HCl в сравнении с данными [5]

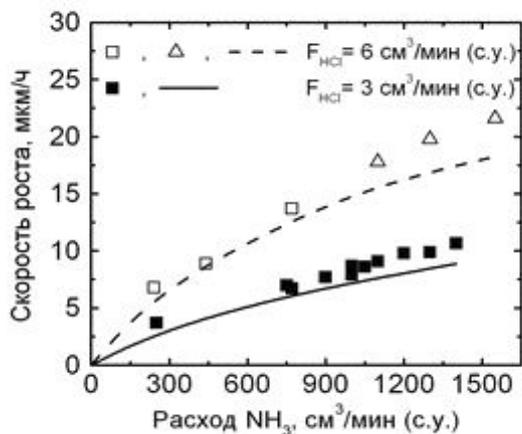


Рис. 4. Зависимость скорости роста GaN от расхода NH₃ в сравнении с данными [5]

Полученная зависимость скорости роста GaN от расхода HCl практически линейна. Обычно такой характер зависимости означает, что GaCl является лимитирующей

компонентой. Тогда скорость роста кристалла практически не должна зависеть от расходов других компонент, что в данном случае не наблюдается. Из рис. 3 видно, что скорость роста увеличивается с увеличением расхода NH_3 (явно эта зависимость представлена на рис. 4). Отличие рассматриваемого процесса от стандартной ситуации с лимитирующей компонентой состоит в том, что в рассматриваемом случае десорбированные потоки GaCl и NH_3 сравнимы с падающими на поверхность потоками этих компонент. Поэтому малый итоговый поток GaCl есть разница больших "встречных" потоков. В итоге скорость роста кристалла остается чувствительной ко всем компонентам и, как следствие, к особенностям течения и переноса.

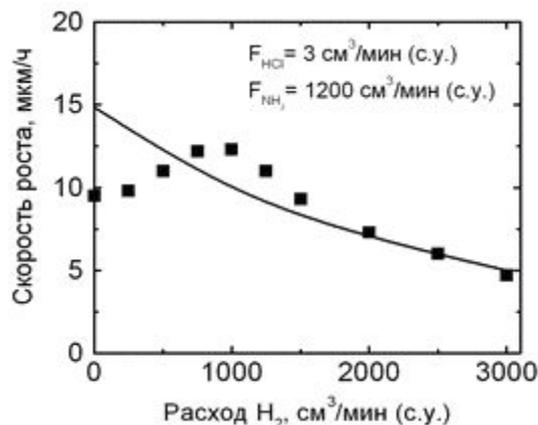


Рис. 5. Зависимость скорости роста GaN от расхода H_2 в сравнении с данными [5]

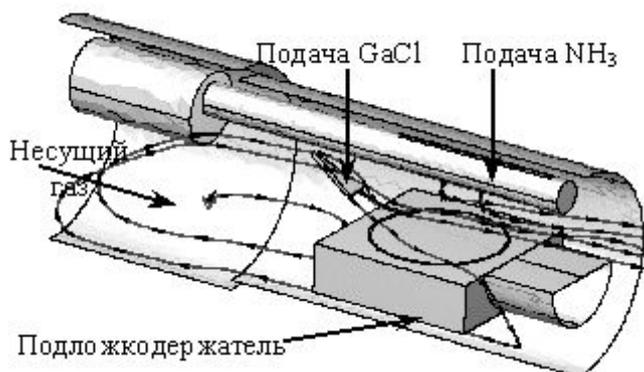


Рис. 6. Картина течения в реакторе (базовый режим)

Можно предположить, что именно с такими особенностями связана наблюдаемая немонотонная зависимость скорости роста от расхода H_2 (рис. 5). Расчеты воспроизводят ниспадающую часть этой кривой при больших расходах H_2 и не дают никаких термодинамических или кинетических предпосылок для изменения характера зависимости при малых расходах H_2 . Но расчеты показывают появление гидродинамической неустойчивости течения над подложкой при малых расходах H_2 вследствие возникновения естественной конвекции. Эта неустойчивость плохо воспроизводится при стационарных расчетах, что может объяснить полученное расхождение расчетных и наблюдаемых зависимостей.

3. Особенности течения и переноса вещества в процессе HVPE GaN

Проведенные расчеты по трехмерной модели HVPE GaN в рассматриваемом реакторе позволили установить, что течение вблизи подложки имеет весьма сложную структуру и, к тому же, чувствительно к расходам компонент. На рис. 6 представлена картина течения в реакторе в базовом режиме (атмосферное давление, температура в районе подложки 1050°C , в качестве несущего газа подается смесь $1500 \text{ см}^3/\text{мин}$ H_2 и

1550 см³/мин N₂, 1000 см³/мин NH₃, разбавленные 600 см³/мин N₂ подаются через две трубки с отверстиями, а 6 см³/мин HCl, разбавленные 500 см³/мин N₂ подаются через центральный инжектор; все расходы при стандартных условиях).

Можно заметить, что течение над подложкодержателем неоднородно, хотя и направлено вдоль оси реактора. В то же время перед подложкой имеется область вихревого течения. Эта область частично захватывает и сам подложкодержатель, что приводит к возникновению под ним области обратного течения. Одной из основных причин неоднородности течения является естественная концентрационная конвекция, возникающая из-за недостаточного перемешивания исходных компонентов, имеющих различные молярные массы. Это предположение подтверждено тестовым расчетом при отсутствии гравитации, в котором не наблюдалась область вихревого течения (термодиффузия в рассматриваемом реакторе слаба, поскольку распределение температуры практически однородно). Таким образом, более тяжелая газовая смесь NH₃+N₂ уносится от инжектора попутным течением несущего газа, но при этом частично опускается вниз, попадая в зону обратного течения под подложкой.

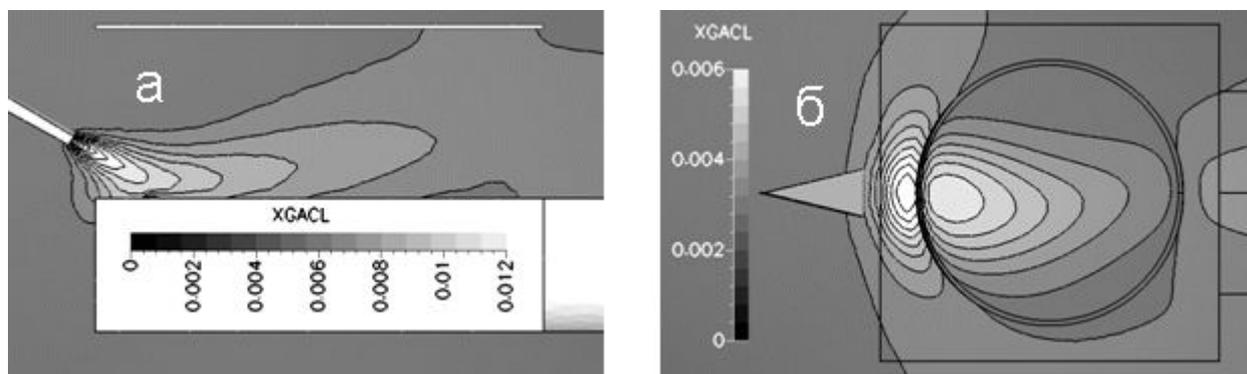


Рис. 7. Распределение мольной доли GaCl по среднему продольному сечению реактора (а) и по горизонтальному сечению, в котором находится верхняя поверхность подложкодержателя (б)

На рис. 7 и 8 представлены рассчитанные для базового ростового режима распределения ключевых компонент (GaCl и NH₃) в непосредственной близости от подложки. Такие распределения образуются в результате взаимодействия конвекции и диффузии компонент. Хотя диффузия несколько сглаживает неоднородность течения, распределения компонент все же остаются в значительной степени неоднородными, “отслеживая” геометрию входов. Горизонтальные распределения компонент несимметричны вследствие вращения диска с подложкой. Основной задачей вращения является усреднение мгновенного распределения скорости роста по углу, что позволяет улучшить итоговую однородность распределения толщины кристалла. Возмущения распределения компонент на границе диска связаны с тем, что сквозь щель между краем вращающегося диска и подложкодержателем подается небольшое количество азота, препятствующего проникновению активных компонент под диск. Впрочем, этот поток оказывает заметное влияние только на распределение скорости роста в непосредственной близости от края диска.

Естественной концентрационной конвекцией можно также объяснить высокую чувствительность течения к расходам компонент, что может быть причиной экспериментально наблюдаемой немонотонной зависимости скорости роста от расхода H₂ (см. рис. 5). Чтобы проверить это предположение, можно сравнить распределения плотности газа и картины течения рядом с подложкой, полученные в базовом режиме и в случае, когда весь водород в несущем газе замещен азотом (рис. 9). В первом случае более легкий несущий газ поднимается вверх и движется вдоль верхней части реактора, в то время как более тяжелая смесь, содержащая аммиак опускается вниз, создавая в нижней части реактора область обратного течения. (рис. 9,а). Во втором случае аммиачная

смесь оказывается легче чистого азота и частично поднимается вверх, создавая обратное течение в верхней части реактора (рис. 9,б), в то время как в нижней части реактора обратного течения не наблюдается. Перестройка течения начинается при малых расходах H_2 , что соответствует области немонотонности на рис. 5. Но характер этого эффекта зависит от многих факторов, включая историю процесса, что делает его плохо воспроизводимым в рамках стационарных расчетов.

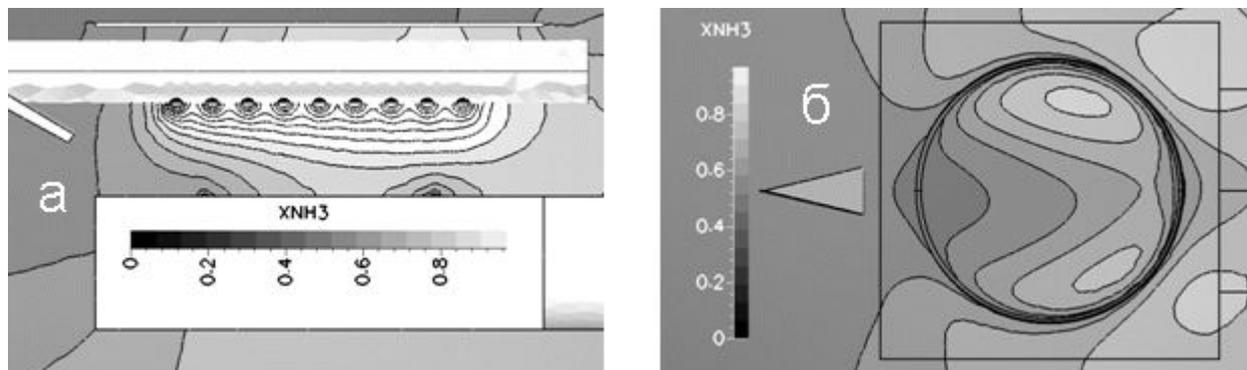


Рис. 8. Распределение мольной доли NH_3 по продольному сечению реактора, проходящему через отверстия для подачи NH_3 (а) и по горизонтальному сечению, в котором находится верхняя поверхность подложкодержателя (б)

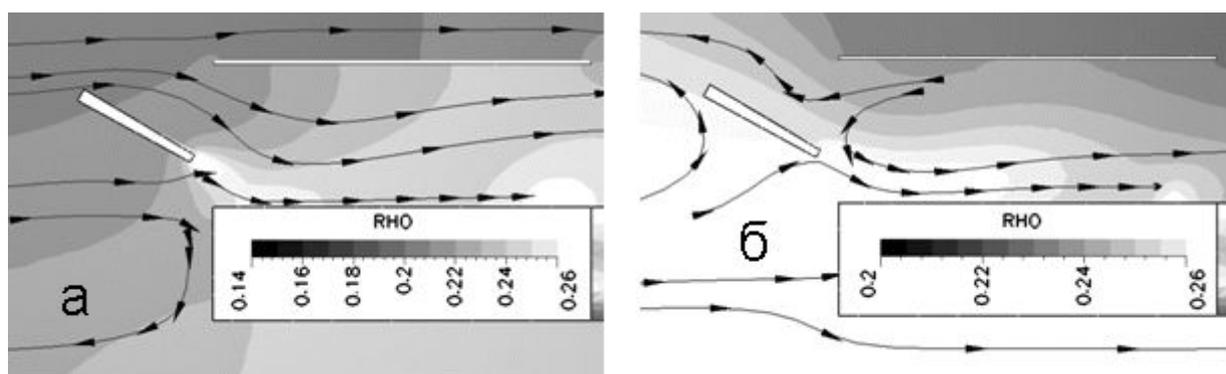


Рис. 9. Распределение плотности газовой фазы и картина течения рядом с подложкой в базовом режиме (а) и при нулевом расходе H_2 (б)

Полученные в результате расчетов распределения скорости роста и V/III отношения (отношения мольных потоков NH_3 и $GaCl$) по вращающемуся диску представлены на рис. 10. Видно, что мгновенные распределения существенно неоднородны. В частности, распределение скорости роста имеет максимум у передней границы диска, что подтверждается наличием рядом с этим место большого количества депозита (см. рис. 2). Мгновенное распределение V/III отношения меняется в диапазоне от 10 до 3000 и в целом "отслеживает" потоки активных компонент. Вращение подложки заметно сглаживает мгновенное распределение скорости роста, приводя к достаточно однородному радиальному распределению усредненной по углу скорости роста. В случае же V/III отношения неоднородность мгновенного распределения слишком велика, чтобы она могла исчезнуть после усреднения по углу.

Неоднородность мгновенного распределения V/III отношения приводит к тому, что в процессе роста кристалл на периферии подложки находится в постоянно меняющихся условиях. При средней скорости роста GaN около 20 мкм/ч и скорости вращения подложки 30 об/мин за время поворота подложки на одну треть оборота (что соответствует изменению V/III отношения от 10 до 3000, см. рис. 10,б), нарастает 10 монослоев кристалла. При этом первый и последний монослои растут при совершенно разных

значениях V/III отношения, что может привести к получению кристалла слоистой структуры. Центральная область подложки не испытывает таких изменений ростовых условий, поэтому рост происходит при практически постоянном V/III отношении порядка 30. Различие в условиях роста центральных и периферийных областях подложки может привести к дополнительной неоднородности структуры кристалла и морфологии его поверхности.

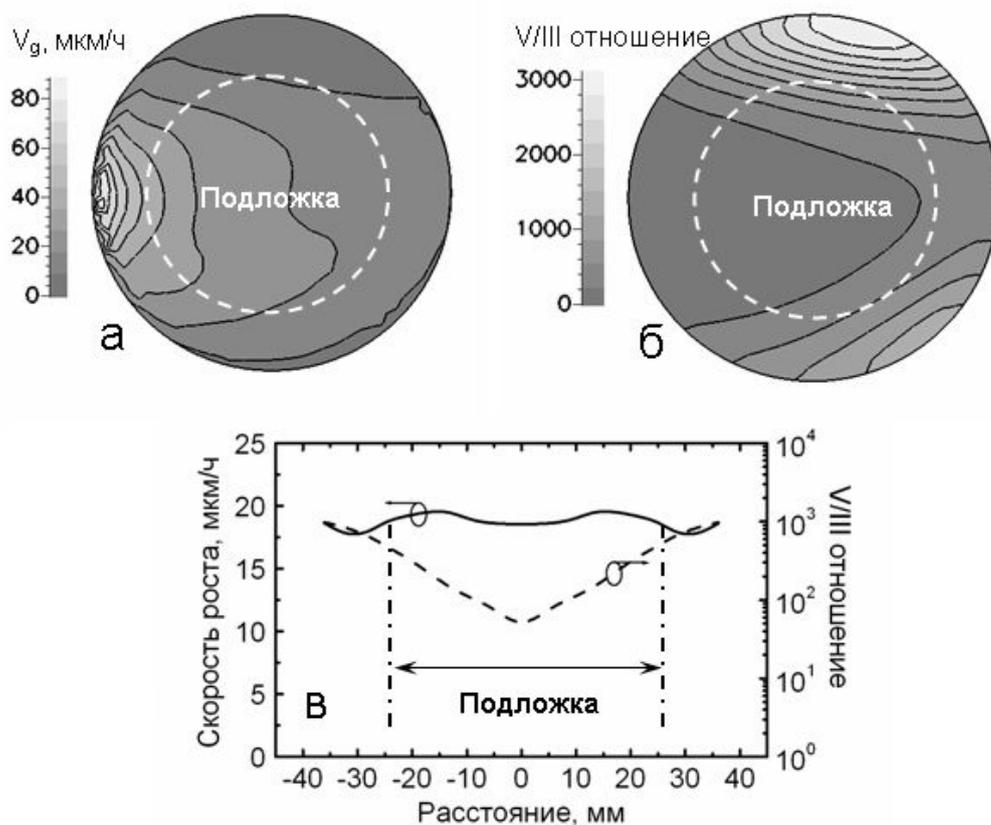


Рис. 10. Мгновенные распределения скорости роста (а) и V/III отношения (б) по вращающемуся диску; и соответствующие усредненные по углу радиальные распределения (в).

Заключение

Применение квазитермодинамической модели для моделирования ростового процесса HVPE GaN в промышленном реакторе позволило получить результаты, количественно согласующиеся с имеющимися экспериментальными данными по зависимости скорости роста GaN от параметров процесса. Наилучшее совпадение достигнуто при коэффициенте прилипания молекулярного азота на GaN порядка 10^{-15} . При столь малом значении α_{N_2} распад аммиака на поверхности GaN практически полностью подавлен, а молекулярный азот становится инертным газом. Показано, что скорость роста GaN зависит от расходов всех компонент, так что ни одна из компонент не может рассматриваться как лимитирующая, поскольку десорбированные потоки компонент вносят существенный вклад в стехиометрический баланс на поверхности кристалла. Расчеты показали, что естественная концентрационная конвекция влияет на перенос компонент, приводит к появлению вихревой структуры и других неоднородностей течения в реакторе, что проявляется в неоднородности мгновенных распределений скорости роста и V/III отношения по подложке. Распределение скорости роста заметно сглаживается за счет вращения подложки. Но в случае V/III отношения неоднородность мгновенного распределения слишком велика, так что рост GaN на периферийных участках подложки

происходит при постоянно изменяющихся ростовых условиях, что может привести к получению кристалла с неоднородной структурой и морфологией поверхности.

Литература

1. S.Yu. Karpov, R.A. Talalaev, Yu.N. Makarov, N. Grandjean, J. Massies, and B. Damilano, *Surf.Sci.*, 450, 191 (2000).
2. P.G. Baranov, E.N. Mokhov, A.O. Ostroumov., M.G. Ramm, M.S. Ramm, V.V. Ratnikov, A.D. Roenkov, Yu.A. Vodakov, A.A. Wolfson, G.V. Saparin, S.Yu. Karpov, D.V. Zimina, Yu.N. Makarov, and H. Juer-gensen. *MRS Internet J.Nitride Semicond.Res.*, 3, Art. 50 (1998).
3. O. Oda, T. Inoue, Y. Seki, K. Kainosho, S. Yaegashi, A. Wakahara, A. Yoshida, S. Kurai, Y. Yamada, and T. Taguchi, *Phys.Stat.Sol.(a)*, 180, 51 (2000).
4. V. Wagner, O. Parillaud, H.J. Bühlmann, M. Ilegems, S. Gradecak, P. Stadelmann, T. Riemann, and J. Christen, *J.Appl.Phys.*, 92, 1307 (2002).
5. D. Martin, J.F. Carlin, V. Wagner, H.J. Bühlmann, and M. Ilegems, *Phys.Stat.Sol.(a)*, 194, 520 (2002).
6. S.Yu. Karpov, V.G. Prokofyev, E.V. Yakovlev, R.A. Talalaev, and Yu.N. Makarov, *Internet J.Nitride Semi-cond.Res.*, 4, Art.4 (1999).
7. N. Grandjean, J. Massies, F. Semond, S.Yu. Karpov, and R.A. Talalaev, *Appl.Phys.Lett.*, 74, 1854 (1999).
8. W. Seifert, G. Fitzl, and E. Butter, *J.Cryst.Growth*, 52, 257 (1981).
9. A. Koukitu, Sh. Hama, T. Taki, and H. Seki, *Jpn.J.Appl.Phys.*, 37, 762 (1998).
10. S.S. Liu and D.A. Stevenson, *J.Electrochem.Soc.*, 125, 1161 (1978).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В ПОРОШКОВОМ ИСТОЧНИКЕ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОБЪЕМНЫХ SiC КРИСТАЛЛОВ.

Д.Е.Тараканов, М.В.Богданов, А.В. Кулик
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль

Предложена модель массопереноса в порошковом источнике, учитывающая эволюцию этого источника в процессе роста кристалла. Модель оперирует такими параметрами порошка, как локальная пористость, размер гранулы и степень графитизации. Предсказана интенсивная сублимация SiC, сопровождаемая графитизацией гранул в горячих зонах около стенок тигля и рекристаллизацией на поверхности порошка, приводящей к образованию плотного диска. Выявлено влияние эволюции порошка на долговременную стабильность скорости роста кристаллов.

Введение

Объемные SiC кристаллы большого диаметра обычно производятся методом сублимационного роста (Physical Vapour Transport growth (PVT)), использующим порошок SiC как источник материала. Известно, что физические и химические процессы, происходящие в порошке при выращивании кристалла, влияют на тепло- и массоперенос в ростовой ячейке и, следовательно, на скорость роста и качество кристалла. За последние несколько лет экспериментальное изучение эволюции порошка при сублимационном росте SiC было проведено в работах [1, 2]. Детальный анализ изменения плотности порошка в процессе роста, выполненный методом рентгеноскопии, показал, что на поверхности порошка образуется плотный диск и происходит графитизация порошка в горячих зонах около стенок тигля.

При двумерном моделировании массопереноса в порошке SiC с учетом эволюции порошкового источника в течение долговременного роста [3] не были учтены:

- влияние свойств порошка на эффективность сублимации,
- долговременная стабильность скоростей сублимации и роста,
- роль графитизации порошка при сублимационном росте.

В работе проведен анализ эволюции порошка в течение длительного роста и определено влияние объемной сублимации на скорость роста кристалла, что важно для оптимизации технологии сублимационного роста.

Модель

Под порошком будем понимать гранулированную среду с определенными распределениями пористости ϵ и среднего радиуса гранулы r . Многокомпонентный газ в каждой точке порошка характеризуется: гидродинамической скоростью V , давлением P , плотностью ρ и массовыми долями компонент C_i ($i=Si, SiC_2, Si_2 C$ и Ar). Перенос компонент в порошке моделируется с учетом конвекции и диффузии. Химические реакциями на гранулах учтены введением объемного массового источника, непрерывно распределенного по объему порошка. Они описаны квазитермодинамической моделью, предполагающей существование двух конденсированных фаз – SiC и графита, которые находятся в равновесии друг с другом и с газом. Скорость газа в порошке связана с градиентом давления по закону Дарси. Давление в порошке находится из уравнения

$$\nabla \cdot \left(\frac{\rho K}{\mu} \right) \nabla p = -S,$$

где S – локальный источник массы, образуемый гетерогенными реакциями, m – вязкость газа и K – проницаемость порошка. Последний параметр находится с использованием среднего радиуса r и пористости по формуле Иргуна [4].

В дополнение к параметрам r и ε порошок SiC характеризуется степенью графитизации γ . Известно, что графитизация SiC порошка обусловлена графитовой пеной, образующейся вокруг гранулы, так как в трехфазном SiC-C равновесии атомы кремния покидают гранулу с большими скоростями, чем углеродные атомы. Наша модель учитывает частичную графитизацию в порошке SiC в процессе роста через оболочечную структуру гранулы, схематично показанную на рис. 1. Здесь гранула состоит из ядра SiC радиуса $r_c \leq r$, ограниченного графитовой оболочкой с толщиной $d = r - r_c$, которая проницаема для газа Si-C. Таким образом, степень графитизации определяется как $\gamma = 1 - (r_c - r)^3$.

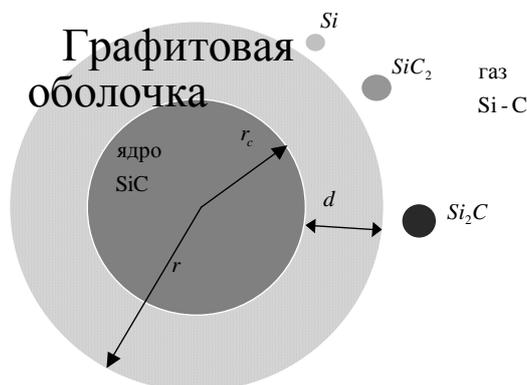


Рис. 1. Схема графитизированной гранулы

Изменения параметров порошка во времени находятся из локальной скорости сублимации следующим образом. Решение проблемы массопереноса в порошке дает распределение как скорость сублимации SiC V_{SiC} , так и скорость образования графитовой оболочки V_c . В то время как первая соответствует общей скорости сублимации, вторая создает дефицит атомов углерода в исходящей химической компоненте. Тогда радиусы r и r_c изменяются независимо в соответствии с вычисленными скоростями V_{SiC} и V_c . Окончательное изменение пористости порошка находится из размера гранул и концентрации гранул, причем последняя полагается постоянной в процессе роста.

Результаты

Описанная модель была реализована в виде вычислительного комплекса, позволяющего моделировать эволюцию порошка в реальных ростовых системах. На начальном этапе роста параметры порошка устанавливаются постоянными по всей области, занимаемой порошком. Вначале находится распределение температур в ростовой системе. Затем, решая проблему массопереноса, находим локальный объемный источник массы S . В свою очередь источник управляет линиями тока в порошке и ростовой ячейке, определяя тем самым скорости испарения/рекристаллизации порошка и роста кристалла. Эти скорости далее используются для получения нового распределения характеристик порошка r , r_c и γ для определения формы кристалла в следующий момент времени. Затем пористость порошка затем определяется из найденного r , как описано выше.

Рассмотрим описанную ростовую систему для изучения эволюции параметров порошка и их влияния на массоперенос. Начальная пористость порошка и радиус гранул изменялись в широком диапазоне, начальная степень графитизации всегда считалась нулевой, что соответствует качественно подготовленной порошковой смеси. Для одного случая вариация параметров порошка и линий тока во времени показаны на рис. 2. Можно заметить, что на начальной стадии порошковая сублимация с сопутствующей графитизацией происходят возле стенки тигля. Верхний слой порошка, граничащий с ростовой ячейкой, уплотняется по причине рекристаллизации. При долговременном

росте зоны активной сублимации, локализованные на границе с порошком, проникают внутрь объема порошка, в то время как главные области полностью сублимируют, что качественно согласовывается с экспериментальными данными [5].

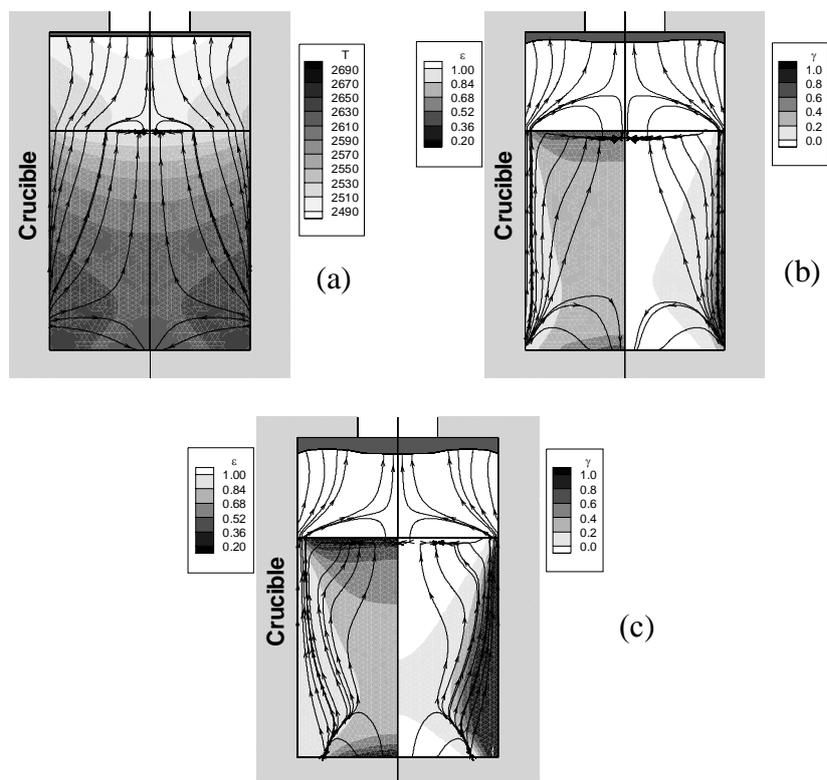


Рис 2. Эволюция порошка в процессе роста SiC. Линии тока и распределение температуры в начальный момент роста. (а) Линии тока, распределения пористости с левой стороны ϵ и графитизации с правой стороны γ , через 10 часов и через 20 часов роста. Начальная пористость 0.8

Существенная рекристаллизация предсказана при всех начальных значениях параметров порошка, что подавляет подачу компонент в ячейку роста. Для оценки влияния сублимации порошка на массоперенос в ростовой ячейке мы сравнили полученную скорость роста со скоростью, вычисленной по модели, пренебрегающей переносом компонент в порошке и предполагающей, что сублимация происходит только на границе порошка. Эта модель ранее активно использовалась в большинстве вычислительных исследований сублимационного роста SiC. Чтобы понять влияние ростовых условий на массоперенос в порошке и скорость роста кристалла, мы дополнительно сравнили различные температурные градиенты в порошке, изменяя положение нагревательной спирали.

Изменение скорости роста в процессе роста SiC кристалла из грубогранулированного порошка ($r = 2.5\text{mm}$, $\epsilon = 0.8$), вычисленное для трех позиций спирали, показано на рис. 3. При изменении мощности нагревателя температура зерна поддерживалась при 2470 K для всех позиций спирали, в то время как перепады температур ($T_b - T_s$) между максимальными значениями в объеме и на поверхности порошка оказались 163 K, 105 K и 29 K для опущенной, нормальной и поднятой спирали соответственно. Из вычислений следует, что

- скорость роста кристалла, вычисленная без учета массопереноса, остается почти постоянной для всех позиций спирали (рис. 3а), в то время как объемное испарение приводит к заметной зависимости от скорости роста (рис. 3б);
- при всех параметрах порошка скорость роста, вычисленная с учетом объемной порошковой сублимации заметно выше, чем скорость роста, производимая только за счет испарения с поверхности порошка;

- при фиксированном распределении температур скорость роста увеличивается с увеличением начальной пористости и размера гранул;
- вклад объемной порошковой сублимации в скорость роста кристалла увеличивается с ростом температурного градиента ($T_b - T_s$).

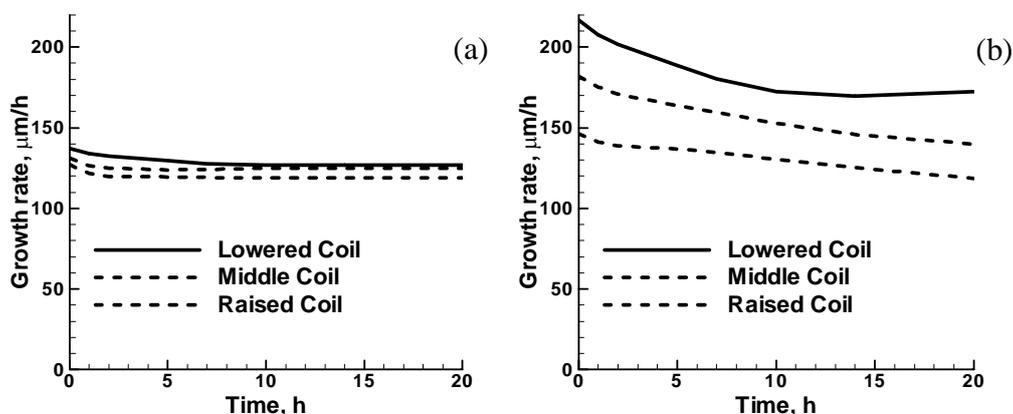


Рис 3. Скорость роста, рассчитанная для различных положений нагревателя: (a) – порошок считается твердым телом, а компоненты испаряются с верхней границы; (b) – учитывается объемная сублимация порошка

Результаты можно интерпретировать следующим образом: известно, что скорость роста кристалла зависит как от температуры источника, так и от перепада температур; при сравнении объемной и поверхностной сублимации температурный перепад во всем тигле, включая газовую ячейку и порошок, оказывается выше и более чувствительным к спирали, чем только в ростовой ячейке. Таким образом, скорость роста кристалла увеличивается за счет объемного испарения, а также за счет температурных градиентов в объеме порошка. Увеличение пористости и размера гранул влечет за собой заметное увеличение проницаемости порошка, что, в свою очередь, усиливает вклад от объемного испарения в скорость роста кристалла. В частности, при малой начальной пористости подача массы из горячих зон порошка в ростовую ячейку уменьшается. С другой стороны, при высокой пористости порошка рост кристалла в основном контролируется максимумом температуры области испарения.

Таким образом, учет массопереноса в порошке важен для адекватного предсказания скорости роста в случае неравномерного распределения температур в объеме порошка. В противоположность этому, в случае около изотермической порошковой смеси вкладом объемной сублимации порошка можно пренебречь. Отметим, при длительном ростовом процессе, когда порошковая смесь заметно истощается, объемная сублимация порошка исчезает и, в конце концов, скорость роста стремится к скорости, имеющей место, когда испарения происходят только с поверхности.

Заключение

Изменение параметров порошка во времени и их влияние на рост объемных кристаллов SiC были изучены с использованием двумерной модели массопереноса в порошке, учитывающей эволюцию и графитизацию порошковой смеси в течение длительного периода функционирования. Модель предсказывает интенсивную сублимацию SiC, сопровождаемую графитизацией гранул в горячих зонах около стенок тигля и рекристаллизацией на поверхности порошка, приводящей к образованию плотного диска. Последний эффект соответствует имеющимся в литературе экспериментальным данным. Скорость роста кристалла увеличивается вследствие ощутимого вклада объемной порошковой сублимации в массоперенос в ростовой ячейке, что не учитывалось в традиционных моделях процесса. Температурные перепады в порошке, высокая по-

ристость порошка и высокий средний размер гранул увеличивают этот вклад. Эволюция порошка, оказывается, влияет на долговременную стабильность скорости роста кристаллов.

Литература

1. K.Chourou M.Anikin J.M.Bluet J.M.Bluet J.M.Dedulle R.Madar M.Pons E.Blanquet C.Bernard P.Grosse C.Faure G.Basset and Y.Grande, *Mater,Sci.Eng.B*. Vol.B.61-62,1999,p82
2. St. Muller, Ph.D. Thesis, University of Erlangen-Nurnberg,Germany,1998
3. M.V.Bogdanov S.E.Demina S.Yu.Karpov A.V.Kulik D.Kh.Ofengeim M.S.Ramm E.N.Mokhov A.D.Roenkov Yu.A.Vodakov Yu.N.Makarov and H.Helava, *Journal of Crystal Growth*. Vol.225,2001,p307
4. S.Ergun, *Chem., Engng.Progr.* Vol.48, 1952,p89
5. D.S.Karpov O.V.Bord S.Yu.Karpov A.I.Zhmakin M.S.Ramm Yu.N.Makarov, *Mater,Sci.Forum* Vol.353-356,2001,p37
6. M.V.Bogdanov A.O.Galyukov S.Yu.Karpov A.V.Kulik S.K.Kochuguev D.Kh.Ofengeim A.V.Tsiryulnikov M.S.Ramm A.I.Zhmakin and Yu.N.Makarov, *Mat.Res.Soc.Symp.Proc.* Vol 742 K1.3,2003.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫРАЩИВАНИЕ ПРИБОРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕТОДОМ ЖИДКО-ФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.Б. Севастьянова

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.Т. Прокопенко

Рассматривается задача создания *p-i-n*-детекторов для регистрации оптического и ядерного излучения на основе полуизолирующего GaAs и получение резкого анизотипного перехода в структуре детектора. Описаны результаты экспериментальных исследований *p-i-n*-структур.

К настоящему времени разработаны многие виды приборов, регистрирующих свет и преобразующих его в электрические сигналы. В световодной технике и, в частности, в оптических сенсорных устройствах наибольшее применение получили полупроводниковые детекторы света в связи с тем, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним в этой области, как по своей чувствительности и частотным характеристикам, так и вследствие относительной простоты их изготовления и удобства в эксплуатации.

Фотодетекторы представляют собой полупроводниковые приборы, которые могут детектировать оптические сигналы посредством протекающих в них электронных процессов. Расширение спектрального диапазона излучения когерентных и некогерентных источников света в дальнюю инфракрасную область, с одной стороны, и в ультрафиолетовую – с другой, привело к увеличению потребности в быстродействующих, чувствительных фотодетекторах [1]. Они детектируют оптические сигналы, т.е. преобразуют изменения интенсивности излучения в электрические колебания, которые соответствующим образом усиливаются и подвергаются последующей обработке.

Для датчиков нужны светоприемные приборы, удовлетворяющие ряду требований, в первую очередь требованию малогабаритности, малого потребления мощности, высокой чувствительности, быстрой реакции. Среди подобных устройств в работе рассматриваются полупроводниковые приборы, в частности *p-I-n*-диоды.

Подобно тому, как освещение *p-n*-перехода светом приводит к появлению электрического напряжения, попадание в область перехода ядерной частицы вызывает во внешней цепи полупроводникового диода электрический импульс, который может быть усилен и зарегистрирован. Для изготовления такого детектора ядерных излучений необходимо осуществить *p-I-n*-структуру, где *i* – область полупроводника собственной проводимости [2].

Если на *p-n*-переход подать обратное напряжение смещения, то электрические заряды в нем исчезнут: электроны "потянутся" к положительному полюсу (*n*-слой), а дырки – к отрицательному полюсу (*p*-слой). Таким образом, можно создать условия, при которых в так называемом промежуточном слое, *i*-слое (англ. intrinsic – собственный, свойственный чему-либо), будут отсутствовать носители (обедненный слой). Благодаря обратному напряжению смещения возникает высокий электрический потенциал. При попадании в *p-n*-переход света внутри обедненного слоя возникают электроны и дырки, но благодаря высокому электрическому потенциалу электроны устремляются с большой скоростью к положительному полюсу, а дырки – к отрицательному, что проявляется в виде тока диффузии и может быть зафиксировано снаружи. В результате подобного ускорения носителей также достигается высокое быстродействие прибора.

Фотодиоды, в которых *i*-область значительна, что достигается приложением к прибору достаточно высокого обратного смещения, при некоторых особенностях конструкции прибора именуют *p-i-n*-фотодиодами. Они обладают более высокой квантовой эффективностью и большим значением отклика, чем простейшие *p-n*-диоды с рез-

ким электронно-дырочным переходом, и благодаря этим качествам их широко применяют в световодной технике, в частности в сенсорных системах.

В $p-i-n$ -фотодиоде концентрация донорной примеси в n -области особенно значительна, переходные сопротивления между омическими контактами и соответствующими областями p - и n -типа малы, а к прибору прикладывается относительно высокое обратное напряжение. При этих условиях i -область в фотодиоде получается значительной. Электрическое поле действует только в пределах i -области, имея максимум интенсивности возле ее границы с p -областью, на которую падает свет [3].

Требования высокой квантовой эффективности и высокого быстродействия для $p-i-n$ -фотодиода в известной степени взаимно противоречивы. Повышение квантовой эффективности этого прибора связано с увеличением ширины (области, в которой наиболее эффективно происходит процесс образования электронно-дырочных пар), а для увеличения скорости отклика $p-i-n$ -фотодиода, наоборот, желательно иметь узкую i -область, чтобы затраты времени на перемещение носителей тока в ней были бы минимальными. Спектральная чувствительность и квантовая эффективность $p-i-n$ -фотодиода зависят от ширины его области и длины волны регистрируемого излучения.

В фотодиоде типа $p-i-n$ поглощение одного фотона может вызвать образование лишь одной электронно-дырочной пары, и вносимый ею вклад в общий фототок мал. Однако $p-i-n$ -фотодиоды обладают значительно более высокой квантовой эффективностью и большей величиной отклика, чем $p-n$ -фотодиоды. Квантовая эффективность лучших фотодиодов может составлять 65–70 %, а отклик – 0,6–0,7 мА/мВт.

Благодаря этим обстоятельствам фотодиоды типа $p-i-n$ широко используют в световодных системах и сенсорных устройствах в качестве фотодетекторов при условии достаточной оптической мощности сигналов, поступающих на фотодетектор после прохождения по световодной линии [4]. Однако, если оптические сигналы слабы, то порог чувствительности $p-i-n$ -фотодиода может оказаться слишком высоким, чтобы их регистрировать. Возникла необходимость разработки приборов, позволяющих получать на выходе фотодетектора более высокие значения тока при малых значениях мощности светового пучка.

$P-i-n$ -фотодиод является наиболее распространенным фотодетектором, поскольку толщина обедненной области (слоя собственной проводимости) может быть создана такой, чтобы обеспечить оптимальную квантовую эффективность.

Устройства на основе детекторов, описанных в данной работе, необходимы для экспрессного мониторинга и применяются в различных областях (в экологии, астрономии (нейтрино), в ядерной технике, в медицине).

Исследовать получение $p-n$ -переходов можно с помощью метода жидкофазной эпитаксии. Под эпитаксией понимают ориентированное наращивание слое в полупроводникового материала на монокристаллическую подложку. Средой, в которой растет кристалл, может быть жидкость, газ или молекулярные потоки в вакууме. При жидкофазной эпитаксии монокристаллический слой растет из раствора-расплава, насыщенного полупроводниковым материалом ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$). Подложка помещается в раствор. При понижении температуры раствор становится пересыщенным по мышьяку, и на подложке растет эпитаксиальный слой, ориентация которого задана затравкой-подложкой. Толщина слоя зависит от объема расплава, температуры начала кристаллизации, интервала и скорости охлаждения.

Метод жидкофазной эпитаксии прост и надежен, удобен при выращивании многослойных структур, однако он редко применяется для выращивания тонких слое в (скорость их роста значительна).

Необходимо заметить что ранее i -материал не был идеально подходящим, а сравнительно недавно была разработана технология получения полуизолирующего арсенида галлия с низкой концентрацией носителей и высокой подвижностью электронов.

Ранее в качестве материалов для создания детекторов использовались германий и кремний. Для получения качественных приборов необходимы монокристаллы этих материалов с совершенной структурой, с минимальным содержанием примеси кислорода, присутствие которого препятствует образованию протяженной *i*-области. Более перспективным материалом является GaAs.

Сам полуизолирующий GaAs самостоятельно не действует, на нем обязательно должны быть выращены *p-n*-слои, тогда он будет выполнять свои свойства. Большая, чем у кремния, ширина запретной зоны позволяет повысить верхний предел рабочих температур полупроводниковых приборов. Рабочие температуры приборов, изготовленных из GaAs, могут достигать 300–350°C (для Si этот предел равен 180–200°C).

До недавнего времени детекторы, описанные в работе, растили на полуизолирующем GaAs, т.е. *p-GaAs/Ge*. В этой работе была предпринята попытка впервые вырастить твердые растворы *p*-типа GaAsSb, GaInAs/Ge, и только в этом случае получился резкий анизотипный переход.

Пластины GaAs получают с низкой концентрацией носителей и изготавливаются по специальной технологии. При попытке растить на полуизолирующем GaAs/Ge *p-GaAs/Ge*, а с другой стороны *N-GaAs/Ge* граница *p-n*-перехода получалась размытой. В то же время в данной работе необходимо достичь лучшего качества слоя. Из проведенных экспериментов следует, что чем выше температура и время нахождения подложки в печи, тем сильнее (глубже) портится приповерхностный слой подложки, а значит, вольтамперные характеристики будущего прибора будут плохими [6]. Чтобы этого избежать, необходимо добавить In и Sb, чтобы уменьшить температуру ликвидуса и время нахождения в печи (уменьшение времени достигается за счет использования переохлажденных жидких фаз). Следовательно, можно добиться высокого качества слоя.

Для уточнения условий выращивания производится измерение температуры ликвидуса приготовленной шихты и величины критического переохлаждения по методу "In Situ". Перед измерением температуры ликвидуса приготовленные кристаллы необходимо гомогенизировать, для чего их надо полностью расплавить и выдержать некоторое время. Температуру критического переохлаждения можно измерить при медленном охлаждении расплава, в котором отсутствует твердая фаза. Расплав необходимо периодически кратковременно встряхивать, чтобы облегчить образование спонтанных зародышей твердой фазы. В момент появления кристаллов фиксируется температура критического переохлаждения.

Эпитаксиальные слои GaAsSb и InGaAs, исследованные в данной работе, были получены методом жидкофазной эпитаксии в открытой системе в атмосфере проточного водорода, очищенного диффузией через палладий.

Технологические процессы эпитаксиального выращивания проводились в реакторе из оптического кварца в кассетах сдвигового типа, изготовленных из графита. Датчиком температуры являлась термопара Pt–Pt+10% Rh, рабочий спай которой располагался непосредственно под кассетой, а холодный поддерживался при 0°C [5].

В специальное углубление кассеты (на слайдере) помещается подложка, а в одну из ячеек – шихта. Перед выращиванием шихту в течение часа гомогенизируют в установке при температуре на 40–60°C выше температуры роста. Выращивание производится из переохлажденного раствора–расплава в течение 60 с. К моменту выращивания с помощью молибденового штока подложку помещают под расплав, а после выращивания удаляют из-под расплава, после чего установка охлаждается.

Когда происходит добавление Sb или In, параметр решетки твердого раствора увеличивается. Существует опасность несоответствия НПР, и этим можно все испортить (т.е. получится нерезкий *p-n*-переход).

Для измерения толщины эпитаксиальных слоев и выявления гетерограниц скол гетероструктуры анодировался в растворе электролита при напряжении 60 В в течение

1 мин, что позволило различать с помощью микроскопа в структуре четко видимые границы между эпитаксиальными слоями. Затем проводилось изготовление мезоструктур методом фотолитографии. Фотолитография – это процесс формирования на поверхности [7] пластины с помощью светочувствительного химически стойкого материала рельефного покрытия с изображением элементов прибора (схемы) и последующего переноса изображения на подложку.

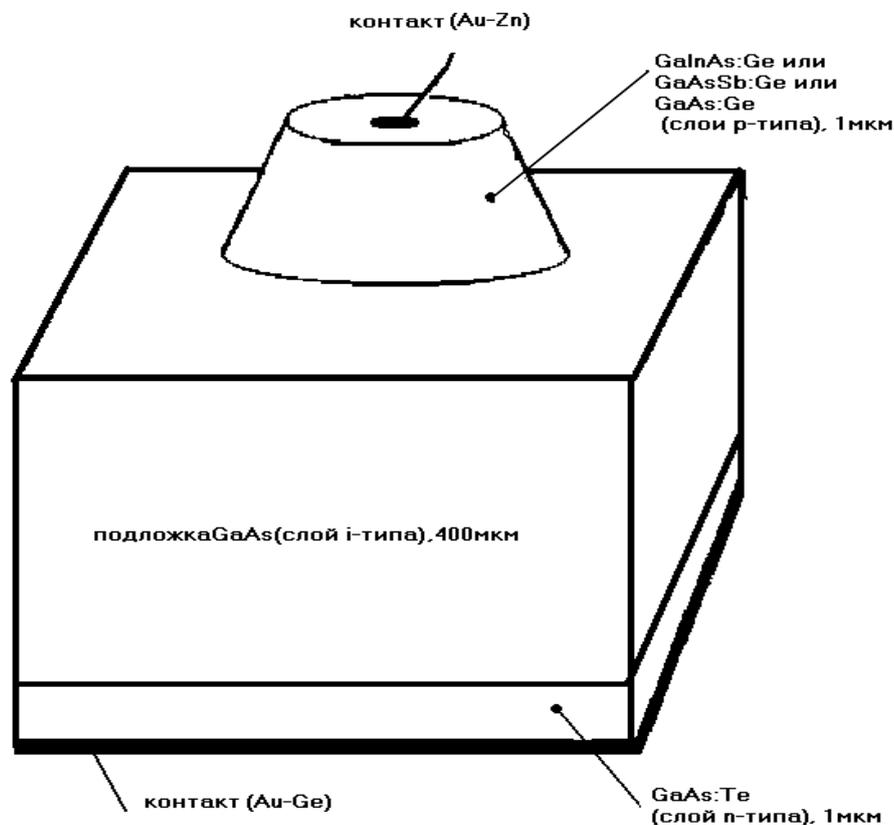


Рис.1. Схема детектора после изготовления меза-структуры и напыления контактов

Как уже отмечено, при получении $p-i-n$ -структур удельное сопротивление областей i -GaAs, прилегающих к n - и p - эпитаксиальным слоям, резко уменьшается. Глубина, на которой происходит подобная трансформация полужолирующего материала (исходя из проведенных экспериментов), составляет 3–25 мкм и увеличивается с повышением температуры роста и времени контакта с жидкой фазой. Это приводит к ухудшению характеристик детекторных $p-i-n$ -структур. В данной работе при выращивании p -области детекторной структуры использовались твердые растворы GaAsSb и GaInAs. Благодаря этому удалось понизить температурный диапазон эпитаксиального выращивания и уменьшить время контакта жидкой фазы с i -GaAs. В то же время, как было показано выше, введение Sb или In в GaAs приводит к увеличению параметра решетки эпитаксиального слоя. Сравнения обратных ветвей вольт-амперных характеристик мезоструктур, изготовленных на взятых нами образцах, доказывает, что кристаллическое совершенство гетероструктур существенно влияет на их электрофизические характеристики, (величина обратного напряжения меняется от 400 В до 1000 В) (рис. 2). Наши исследования показали, что для структур с НПР большим, чем $2 \cdot 10^{-3}$, наблюдается ухудшение электрофизических характеристик, что, очевидно, связано с наличием дефектов на гетерогранице. В случае, когда НПР было меньше, чем $2 \cdot 10^{-3}$, параметры выращенных гетероструктур были лучше, чем у полученных ранее p -GaAs/ i -GaAs/ n -GaAs.

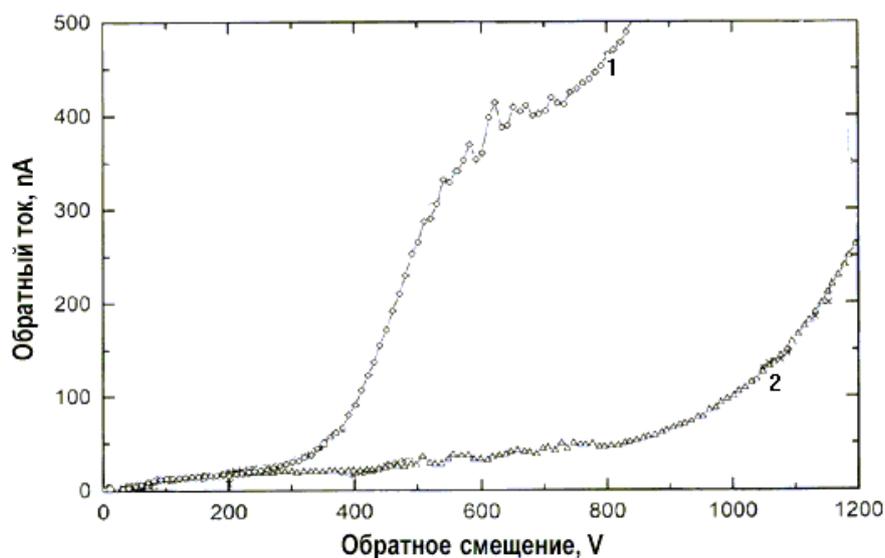


Рис. 2. Сравнение обратных ветвей вольт-амперных характеристик меза-структур. (1 – для образца NU-3, 2 – для образца NU-13)

В табл. 1 показан состав жидких фаз для двух образцов, исследуемых в работе.

масса навесок	Обозначение опыта	
	NU-3	NU-13
m_{In} , мг	-	-
m_{Ga} , мг	1823.9	1785.8 _{Ge} 1910 _{Te}
m_{GaAs} , мг	20.65	40.37 _{Ge} 15.68 _{Te}
m_{Ge} , мг	20.2	20.12
m_{Sb} , мг	134.16	87.39 _{Ge}
M_{Te} , мг	-	0.219
T_1 , °C	676	729

Таблица 1. Массы навесок и соответствующий им состав жидкой фазы при T_1 .

Для получения резкого высококачественного $p-n$ -перехода вместо GaAs выращивались твердые растворы GaAsSb и GaInAs, легированные Ge. Было показано, что характеристики приборных меза-структур зависят от величины НПР. Установлено, что величина НПР не должна превышать $2 \cdot 10^{-3}$. Замена эпитаксиальных слоев p -GaAs на изотипные GaAsSb и GaInAs позволила существенно улучшить электрофизические свойства данных детекторов и достичь наилучшего качества слоя (т.е. получить резкий анизотипный переход). Изготовленные $p-i-n$ -структуры применяются для производства эффективных устройств для регистрации оптического и ядерного излучения.

Литература

1. Зи С.//Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984..339 с.
2. Бусурин В.И., Носов Ю.Р.//Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения.- М.: Энергоатомиздат,1990

3. Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г. Световодные датчики. М.: Машиностроение, 1990
4. Окуси Т. и др. // Волоконно-оптические датчики: пер. с япон. -Л.: Энергоатомиздат, 1991
5. Абрамов А.В., Арсентьев И.Н., Мишурный В.А., Румянцев В.Д., Третьяков Д.Н Люминисцентные свойства и некоторые особенности выращивания из растворов-расплавов твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ // Письма в ЖТФ.1976. Т.2. В.5. С.204–207.
6. Черняев В.Н., Кожитов Л.В.//Технология эпитаксиальных слоев GaAs и приборы на их основе. М.: Энергия, 1974. С.17–30.
7. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М.//Технология полупроводниковых приборов,. М.: Высшая школа, 1984. С. 101

ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Д.В. Соловьев

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.Л. Ткалич

Рассматривается технология получения квантовых точек, а также методы получения тонких пленок и их последующий структурный анализ, дефектоскопия.

Введение

Наиболее интересным и перспективным направлением развития технологий полупроводниковых приборов являются нанокристаллические тонкопленочные технологии. Развитие этих технологий невозможно без контроля химической чистоты образца, атомной и электронной структур, электрофизических и оптических свойств, дефектоскопии получаемых пленок на всех стадиях технологического процесса. Эта задача может быть решена только в рамках комплексного развития технологий получения пленок и методов их дефектоскопии, функционального контроля.

Благодаря интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям в технологии тонких пленок достигнут значительный прогресс. В зависимости от решаемой задачи в распоряжении исследователей имеются различные методики, позволяющие получить пленки с воспроизводимыми и стабильными характеристиками. В настоящее время получены нанокристаллические пленки различных полупроводниковых материалов, имеющие фотолюминесценцию в видимой области спектра и уникальные тензо- и пьезоэлектрические свойства. У пленок полученных распылением материала на подложку, расположенную под углом относительно направления пучка вещества, осаждаемого на подложку, наблюдается аномально высокая величина фотопроводимости, что может быть использовано для разработки устройств оптической передачи и хранения информации [1, 2].

В последние 10 лет был получен ряд уникальных полупроводниковых устройств на основе нанокристаллических тонкопленочных технологий и технологий квантовых точек (квантовых ям). Отдельная квантовая точка представляет собой специальным образом сформированный наноразмерный объект, обладающий дискретным энергетическим спектром. Способы получения квантовых точек весьма различны: они могут быть созданы на планарных полупроводниковых гетероструктурах с помощью литографии, могут быть получены химическими методами, но наиболее распространенным способом получения квантовых точек является спонтанное формирование наноразмерных островков-включений одного полупроводникового материала (с меньшей шириной запрещенной зоны) в матрице другого (с большей шириной запрещенной зоны). Из-за различия ширины запрещенных зон электрон оказывается ограниченным в одном направлении, что приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Благодаря этой особенности квантовых точек на их основе сейчас созданы как новые виды полупроводниковых лазеров, так и принципиально новые устройства, например, источники одиночных фотонов для квантовой криптографии [3].

Методы получения полупроводниковых пленок

Традиционным методом получения пленок для изготовления таких полупроводниковых устройств является молекулярно-лучевая эпитаксия. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (molecular-beam epitaxy, МВЕ) используют для выращивания кристаллических структур в сверхвысоком вакууме с помощью пучков атомов или моле-

кул, являющихся компонентами растущего соединения. Таким образом, МВЕ представляет собой усовершенствование обычного способа напыления металлических пленок испарением в вакууме. Потoki вещества из источников столь малы, что при определенных условиях на поверхности нарастает один мономолекулярный слой вещества за другим. При этом осаждающиеся на поверхность атомы (молекулы) не остаются там, куда попали, а мигрируют по поверхности, встраиваясь в "подходящие места", что и обеспечивает высокое кристаллическое совершенство получаемых пленок и структур. Однако на свойства получающихся структур влияет множество факторов: температура подложки, интенсивности молекулярных пучков, свойства осаждаемых материалов, кристаллическое совершенство подложки и т.д., поэтому точно предсказать, что получится в каждом конкретном случае, к сожалению, невозможно. Поэтому очень большое значение имеет поиск оптимальных для той или иной задачи режимов роста.

Принципы технологии МВЕ формулировались постепенно. В 1964 г. с помощью молекулярных пучков были получены совершенные эпитаксиальные пленки PbS на монокристаллической подложке NaCl. В 1968 г. в условиях высокого вакуума были выращены эпитаксиальные пленки GaAs на монокристаллических подложках. Эти исследования стали основой дальнейшего развития методов выращивания совершенных пленок GaAs и других полупроводниковых соединений A₃B₅ и A₂B₆ методом МВЕ. Однако этот метод является чрезвычайно сложным, трудоемким, а кроме всего прочего, еще и дорогим, для промышленных технологических приложений невыгодным [4, 5].

Технологически более простым и распространенным методом получения тонких пленок является метод термического распыления материалов в высоком вакууме или в разряженной среде инертных газов. Этим методом получены монокристаллические, поликристаллические и аморфные тонкие пленки на различных подложках. Достоинства способа – возможность получения всех видов покрытий; большая скорость нанесения, что способствует изготовлению однородных по составу покрытий, возможность контроля характеристик пленок в процессе изготовления. Недостатки способа – невысокая механическая прочность, недостаточная влагостойкость и малая химическая стойкость покрытий. Возможно, что этим методом, при соответствующем подборе технологических режимов, удастся получить поликристаллические тонкие пленки с размерами зерна порядка нескольких десятков нанометров, а также нанокомпозиты [6].

Методы изучения структуры пленок

Получаемые, зачастую уникальные, электрофизические и оптические свойства полупроводниковых устройств не могут быть объяснены без знания их свойств, в том числе электронной и атомной структуры материалов. Традиционными методами анализа электронной структуры материалов являются различные спектроскопические методы, микроструктура тонких пленок исследуется с применением дифракции рентгеновских лучей и электронов. В последнее время все чаще применяется метод EXAFS-спектроскопии. Этот метод основан на обработке протяженной тонкой структуры (Extended X-ray Absorption Fine Structure), наблюдаемой в рентгеновских спектрах поглощения атомов. Им могут быть исследованы образцы, для которых неприемлемы рентгенографические методы, он позволяет исследовать ближнее окружение атомов [7].

Однако в последние годы растет интерес к методу эллипсометрии. Эллипсометрия – совокупность методов изучения поверхностей жидких и твердых тел по состоянию поляризации светового пучка, отраженного этой поверхностью и преломленного ею. Падающий на поверхность плоско поляризованный свет приобретает при отражении и преломлении эллиптическую поляризацию вследствие наличия тонкого переходного слоя на границе раздела сред. Зависимость между оптическими постоянными слоя и параметрами эллиптически поляризованного света устанавливается на основании фор-

мул Френеля. В качестве источника света в этом методе используется монохроматическое излучение зеленой линии ртути, а также лазерное излучение, что позволяет проводить исследования атомного состава неоднородных и анизотропных поверхностей и пленок [8].

Заключение

Таким образом, разработка технологий получения нанокристаллических и нанокompозитных тонких пленок материалов изоэлектронного ряда германия, в частности, германия и арсенида галлия, в совокупности с развитием методов анализа их микроскопических и макроскопических характеристик является одним из приоритетных направлений в современной физике полупроводников и микроэлектронике.

Литература

1. Белявский В.И. Физические основы полупроводниковой нанотехнологии. // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 10.
2. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника - основа информационных систем XXI века. // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5.
3. Эсаки Л. Молекулярно-лучевая эпитаксия и развитие технологии полупроводниковых сверхрешеток и структур с квантовыми ямами. / В кн: Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Пер. с англ. Под ред. Л. Ченга, К Плога. М. Мир, 1989.
4. «Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры». / Пер. с англ. Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. М. Мир, 1989.
5. Бахтизин Р.З., Сакурай Т., Хашицуме Т., Щуе К.-К. Атомные структуры на поверхности GaAs(001), выращенной методами молекулярно-лучевой эпитаксии. // Успехи физ. наук. 1997.
6. Ниссельсон Л.А. Физико-химические основы получения высокочистых веществ. // Высокочистые вещества. 1991. №4.
7. Вердинский Р.В. EXAFS – Спектроскопия – новый метод структурного анализа. // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 5.
8. Эллипсометрия субмонослойных покрытий и приповерхностный слой твердых тел. ВСГТУ - Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1998.

ЛОКАЛЬНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО СТЕКЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ YAG:Nd-ЛАЗЕРА

Д.В. Петров

Научный руководитель – д.т.н., проф. Е.Б. Яковлев

В работе приведены данные по исследованию возможностей обработки плоских пластин пористого стекла (ПС) состава $96\text{SiO}_2 \cdot 3.8\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 0.2\text{Na}_2\text{O}$ (мол. %) прозрачных для лазерного излучения. Приведены результаты исследований воздействия излучения YAG:Nd-лазера на обработанные пластины ПС. Установлено, что нанесение на поверхность ПС тонкого слоя продуктов карбонизации органических соединений позволит наиболее эффективно спекать ПС излучением YAG:Nd-лазера.

Введение

В работах [1, 2] авторами для изготовления оптических элементов на основе спекания пористого стекла (ПС) был использован технологический CO_2 -лазер. Поскольку основой каркаса ПС является SiO_2 (доля этого соединения достигает 96%), а длина волны CO_2 -лазера ($\lambda=10.6$ мкм) лежит в области фундаментального поглощения силикатного стекла, то излучение CO_2 -лазера, с учетом коэффициента отражения, полностью поглощается в поверхностном слое стекла толщиной $h \approx 10$ мкм. Минимальные значения линейных размеров оптических элементов при использовании излучения с длиной волны $\lambda=10.6$ мкм по данным работы [2] составляют величину ~ 200 мкм. На рис. 1 представлены характерные размеры типичного элемента, составляющего волноводную структуру планарной оптической интегральной микросхемы.

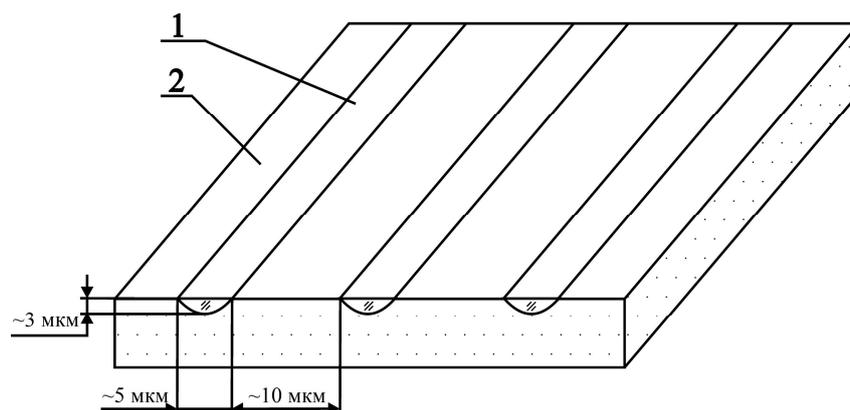


Рис. 1. Типичный элемент, составляющий волноводную структуру планарной оптической интегральной микросхемы. 1 – подложка ПС ($n \approx 1.37$); 2 – диффузионный планарный волновод ($n \approx 1.46$).

Для изготовления элементов с меньшими размерами требуется использовать излучение с меньшей длиной волны. Таким образом, требуется решить вопрос об обработке прозрачного для лазерного излучения материала. Для отработки методик обработки ПС излучением из области прозрачности может быть использован любой лазер с длиной волны в диапазоне 0.3–1 мкм, например YAG:Nd-лазер ($\lambda=1,064$ мкм). Основная задача в этом случае – обеспечить поглощение излучения в поверхностном слое ПС. Это можно сделать либо путем импрегнирования различных веществ в поверхностные слои стекла, либо нанесением на поверхность поглощающей пленки.

Анализ задачи

Процесс модификации структуры ПС начинается при нагревании поверхности стекла лазерным излучением до температур, обеспечивающих инициализацию вязкого

течения. В исходном состоянии ПС обладает большой поверхностной энергией из-за наличия в нем разветвленной системы пор, которая уменьшается за счет схлопывания пор, т.е. спекания стекла [3, 4].

Для обеспечения нагревания прозрачного для лазерного излучения ПС необходимо увеличить поглощение лазерного излучения в нем. Все существующие методы увеличения поглощения можно разделить на две категории:

- а) поглощающий материал соприкасается только с поверхностью ПС;
- б) поглощающий материал вводится непосредственно в объем ПС.

На рис. 2 представлены профили температурного поля при облучении ПС с нанесенным покрытием (а) и с импрегнированным в поверхностный слой стекла веществом (б).

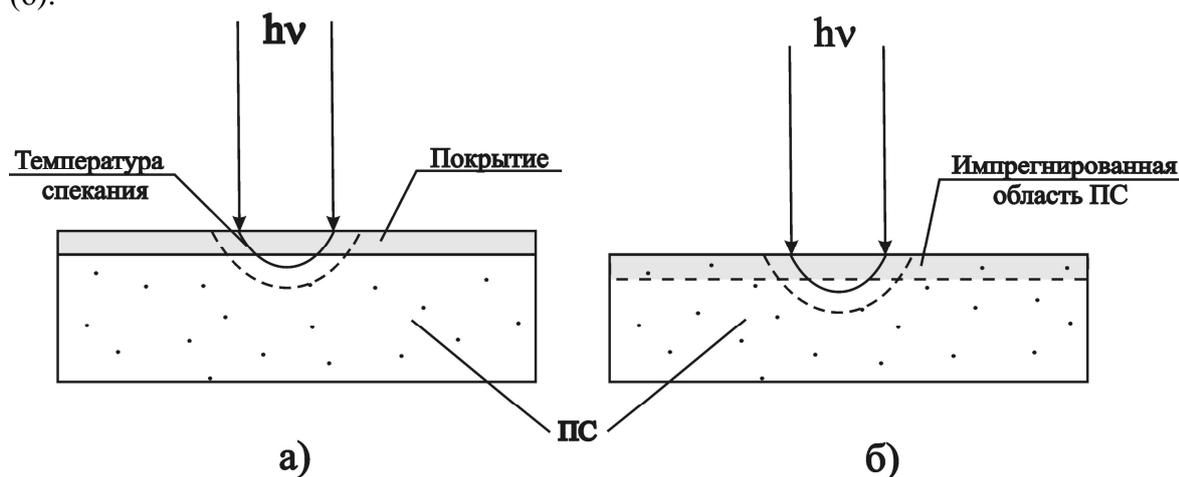


Рис. 2. Профили температурного поля при облучении ПС с нанесенным покрытием (а) и с импрегнированным в поверхностный слой стекла веществом (б)

Рассмотрим каждую из категорий более подробно.

Нанесение на поверхность ПС пленок различных материалов. Различные по толщине слои материала можно наносить как на всю поверхность ПС, так и на определенные участки по заданному рисунку с помощью самых различных методов (лазерный перенос, напыление в вакууме, фото- и лазерная литография). При необходимости покрытие необработанных участков поверхности может быть использовано в качестве защитного слоя для герметизации ПС или как оптическая маска. Во втором случае определенный рисунок, сформированный при нанесении покрытия, будет определять топографию поверхности ПС после обработки.

Возможно также нанесение на поверхность ПС мелкодисперсного порошка материала, сходного с ПС по составу. Нанесение, например, цветного стекла позволит получить режим обработки, при котором глубина усадки ПС будет равной толщине слоя этого порошка. Нулевая усадка позволит сразу получить положительный оптический элемент и исключить операцию последующей шлифовки ПС. Комбинация ПС – поглощающий слой – ПС позволит создать оптические элементы в объеме ПС.

Введение поглощающего материала в объем ПС. Возможности в использовании материалов здесь ограничены структурными особенностями ПС, такими как размер пор, общая пористость и коэффициент теплового расширения.

В объем ПС возможно вводить сразу несколько веществ с различными концентрациями и на различную глубину. Это позволит локально изменять показатель преломления ПС на заданную величину. В табл. 1 представлены наиболее распространенные материалы, наносимые на поверхность и вводимые в объем ПС.

Каждый из рассмотренных методов – поверхностный или объемный – имеет как достоинства, так и недостатки. Положительные и отрицательные стороны методов

представлены в сводной табл. 2. Очевидно, что только совместное использование различных методов позволит получить лучшие результаты.

Нанесение покрытия на поверхность ПС		
Материал	Вид покрытия	Метод
Металлы, Органика, Уголь, Полимеры	Пленка	Напыление
Стекло, Металлы	Мелкодисперсный порошок	Осаждение, Распыление
Введение материала в объем ПС		
Материал	Метод введения	
Металлы, Окислы, Соли, Красители	Диффузия из растворов, Гидролиз солей	
Ионы	Ионный обмен, Ионная диффузия	
Полимеры	Введение мономеров с последующей их полимеризацией	

Таблица 1. Материалы и методы, используемые для их нанесения на поверхность и введения в объем ПС.

Поверхностные методы (поглощающий материал наносится на поверхность)	Объемные методы (поглощающий материал вводится в объем)
Основные достоинства	
<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Многообразие материалов пригодных к применению. <input checked="" type="checkbox"/> Решение задачи герметизации поверхности ПС. <input checked="" type="checkbox"/> Возможность использования покрытия в качестве маски. <input checked="" type="checkbox"/> Возможность создания условий, когда усадка будет нулевой. 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Внедрение нескольких различных элементов (веществ) одновременно позволяет локально в разной степени изменять показатель преломления ПС. <input checked="" type="checkbox"/> Импрегнирование на заданную глубину.
Отрицательные стороны	
<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Необходимость плотного контакта поглощающего материала с поверхностью ПС. <input checked="" type="checkbox"/> Есть вероятность, что часть материала присоединится к спеченной поверхности или войдет в объем ПС. 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Размер пор и КТР ПС ограничивают область применения материалов. <input checked="" type="checkbox"/> Внедренный материал, оставшийся в спеченном объеме, может негативно сказаться на структурных и оптических свойствах конечного изделия.

Таблица 2. Сводная таблица сравнения двух типов методов обработки прозрачного материала

Экспериментальная часть

Для исследования возможности обработки прозрачного материала был проведен ряд экспериментов.

Используемые образцы были вырезаны из середины пластин ПС марки 8Б состава $96\text{SiO}_2 \cdot 3.8\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 0.2\text{Na}_2\text{O}$ (мол. %), с размерами $20 \times 20 \times 2$ мм. Далее образцы прошли обработку в муфельной печи при 500°C в течение 2 часов для удаления адсорбированных из воздуха органических примесей и воды.

После отжига образцы прошли обработку по следующим методикам.

1. Нанесение на поверхность порошка цветного стекла состава $64.22\text{SiO}_2 \cdot 15.48\text{Na}_2\text{O} \cdot 9.01(\text{TiO} + \text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 7.99\text{CaO} \cdot 1.38\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1.09\text{MnO}_4$ (мол. %) (толщина слоя порошка $H \approx 100$ мкм, типичный размер частиц порошка $l \approx 5$ мкм).

2. Нанесение на поверхность слоя продуктов карбонизации органических соединений (толщина слоя $H \approx 100$ мкм).
3. Введение в объем спиртового раствора теина (раствор вводился на всю глубину пластины ПС).
4. Введение в объем водного раствора сахара (раствор вводился на всю глубину пластины ПС).

Облучение обработанных пластин ПС проведено на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис. 3.

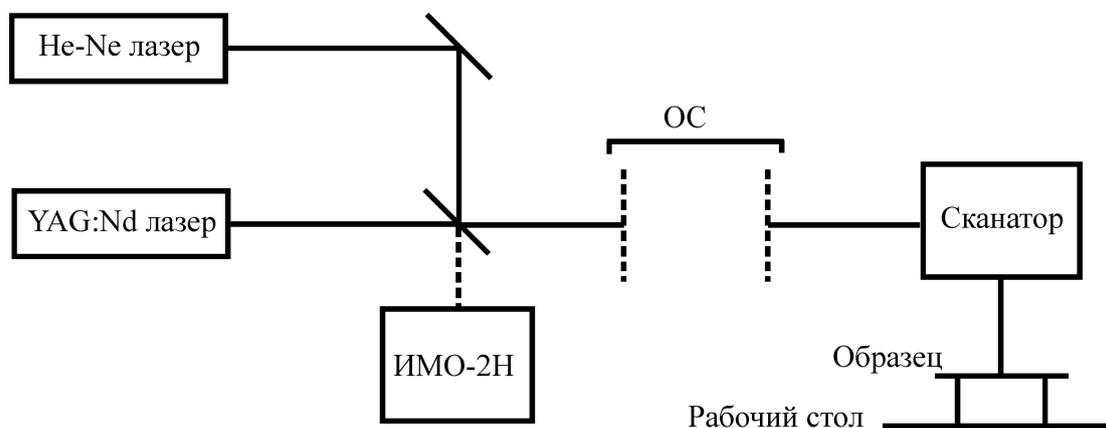


Рис. 3. Схема макета экспериментальной установки с YAG:Nd-лазером.

Элементы установки имеют следующее назначение:

- YAG:Nd-лазер марки ЛТИ-502 – источник рабочего излучения;
- He-Ne-лазер – юстировка схемы и визуализация рабочего излучения;
- измеритель ИМО-2Н – контроль и измерение мощности рабочего излучения;
- оптическая система (ОС) – формирование пятна с заданным распределением плотности мощности в плоскости обработки;
- двухкоординатный сканатор – перемещение луча без искажений по плоскости обработки.

Для определения условий начала спекания ПС эксперименты проведены при переменной мощности лазерного излучения P и постоянном времени воздействия τ . Для получения спеченных областей с заданными геометрическими параметрами проведены эксперименты при изменении времени воздействия τ и постоянной P .

Дополнительно образцы, обработанные при $P = \text{const}$, были облучены в импульсном режиме.

После проведения экспериментов все образцы прошли завершающую стадию по удалению остатков поглощающего вещества в муфельной печи при температуре 350°C в течение трех часов.

Основные результаты

Минимальные размеры областей, модифицированных излучением YAG:Nd-лазера, на поверхности ПС, обработанного различными методами, представлены в табл. 3. Из всех рассмотренных методов наилучшие результаты были получены при нанесении на поверхность ПС тонкого слоя продуктов карбонизации органических соединений. Результаты эксперимента, проведенного на образцах, прошедших предварительную обработку по этому методу, представлены на рис. 4. Минимальные размеры ширины спеченной области, полученные в эксперименте ~ 20 мкм.

Материал	Метод обработки	Минимальный размер модифицированной области
Порошок цветного стекла	Нанесение	300 мкм
Угольная пленка	Напыление	20 мкм
Спиртовой раствор теина	Пропитка всего объема образца	200 мкм
Водный раствор сахара		50 мкм

Таблица 3. Результаты модификации поверхности ПС, обработанного различными материалами

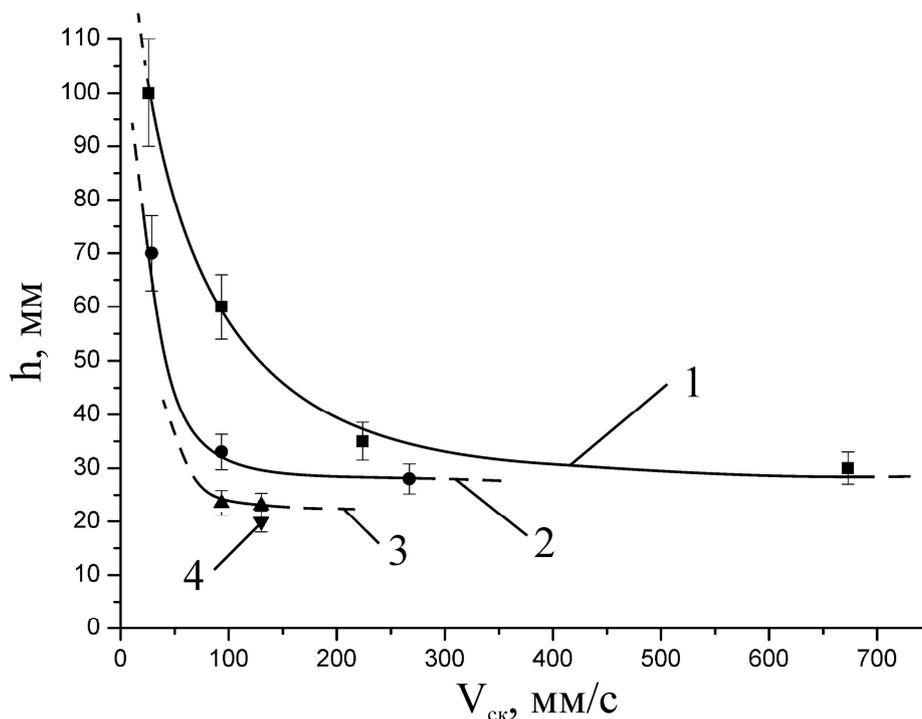


Рис. 4. График зависимости размера модифицированной области на поверхности ПС при изменении скорости сканирования $V_{ск}$ и различных значениях мощности излучения P YAG:Nd-лазера: 1 – $h=f(V_{ск}), P=5 \text{ Вт}$; 2 – $h=f(V_{ск}), P=3.75 \text{ Вт}$; 3 – $h=f(V_{ск}), P=2 \text{ Вт}$; 4 – $h=f(V_{ск}), P=2 \text{ Вт}$

Эксперименты при импульсном режиме облучения также позволили получить удовлетворительные результаты: ширина спеченной области $\sim 20 \text{ мкм}$. Однако при работе со стеклом в режиме спекания отдается предпочтение непрерывному режиму работы лазера, так как в этом случае спеченная область имеет лучше оптические свойства.

Заключение

Эксперименты показали, что наилучшим вариантом обработки ПС, прозрачного для излучения YAG:Nd-лазера, является покрытие ПС тонким слоем продуктов карбонизации органических соединений. При толщине слоя покрытия $H \approx 100 \text{ мкм}$ характерная величина ширины спеченной области, полученная в эксперименте, составляет 20 мкм . Предполагается, что нанесение слоя покрытия толщиной $H < 100 \text{ мкм}$ позволит получить ширину спеченного слоя меньше величины 20 мкм .

Работа выполнена при поддержке Президентской программы поддержки ведущих научных школ (НШ-1370.2003.8) и гранта №04-03-32165

Литература

1. Вейко В.П., Костюк Г.К., Роскова Г.П., Цехомская Т.С., Чуйко В.А., Яковлев Е.Б. Лазерное формирование оптических элементов. Л.: ЛДНТП. 1988. 20 с.
2. Veiko V. P., Jakovlev E. B., Nikiphorov A. J., and Chuiko V. A. Laser methods of control porous silica glass structure // Chemical processing of advanced materials. 1992. P. 919-931.
3. Молчанова О.С. Натриевоборосиликатные и пористые стекла. М.; Оборонгиз. 1961 с. 162.
4. Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И., Антропова Т.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. Л.: Наука. 1991 с. 276.
5. Мешковский И.К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. Монография. СПб. 1998. с. 332.
6. Borrelli N.F. Microoptics technology. Fabrication and applications of lens arrays and devices. Marcel Dekker Inc. New York – Basel. 1999.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ТОНКИХ СЛОЕВ

С.М. Сарнаков

Научный руководитель – к.ф.-м. н. Г.Д.Шандыбина

Показана возможность существования оптимального низкоэнергетического гидродинамического режима лазерного разрушения тонких слоев. Получены аналитические выражения, характеризующие условия реализации оптимального низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения для тонких слоев.

1. Введение

В связи с развитием новых лазерных технологий проблема оптимизации лазерного воздействия по минимальному потреблению энергии является весьма актуальной.

Задача об отыскании оптимального режима испарения рассматривалась в работе [1], где было показано, как необходимо сформировать лазерный импульс, чтобы при заданной энергии излучения получить максимальный удельный вынос материала. При этом были определены значения оптимальной плотности мощности светового потока q_{opt} и оптимальной длительности воздействия τ_{opt} :

$$q_{opt} = 2.8 \frac{aL_0^2}{Q}; \tau_{opt} = 0.35 \frac{Q^2}{aL_0^2}, \quad (1.1)$$

где L_0 – удельная теплота испарения, a – температуропроводность, Q – плотность энергии.

Также было показано, что оптимальный режим обеспечивается в случае, когда скорость движения фронта испарения близка к средней (за время импульса) скорости распространения волны нагрева в материале.

В то же время анализ оптимальных условий в гидродинамическом режиме разрушения представляет практический интерес, поскольку это самый частый случай в процессах лазерной резки и сварки. Из общего представления о гидродинамическом режиме лазерного разрушения следует, что чем меньше световой поток, тем более длительное время требуется для того, чтобы нагреть поверхность материала до температуры кипения. Однако при более высокой плотности мощности материал закипает быстро, но энергия испарения расходуется на перегрев расплава. Следовательно, существует оптимальная плотность мощности, при которой поверхность закипает, а пар удаляет расплавленный слой с минимальными затратами энергии для разрушения.

В настоящей работе получены аналитические выражения для q_{opt} , τ_{opt} и Q_{opt} , характеризующие условия оптимального низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения тонких слоев. В отличие от массивного материала, плавление происходит в пределах полной глубины слоя.

2. Теоретические расчеты

Время экспозиции лазерного воздействия на материал можно представить в виде двух слагаемых: $t = t_H + t_p$, где t_H – время, требуемое для нагревания материала до температуры кипения (T_k), а t_p – время выдавливания расплава, определяемых формулами [2]:

$$t_H = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{aq^2}, \quad (2.1)$$

$$t_p = \frac{h}{v}. \quad (2.2)$$

Здесь k – коэффициент теплопроводности, q – поглощенная плотность светового потока, h – глубина слоя, v – скорость понижения уровня расплава вследствие вытеснения на краях, которая определяется как [3]

$$v = \left(\frac{2qC_z}{L_0} \right)^{1/4} \left(\frac{2a}{r_0} \right)^{1/2}, \quad (2.3)$$

где C_z – скорость звука в испаряемом материале, r_0 – радиус облученной зоны.

Тогда выражение для потока энергии, требуемого для удаления материала в гидродинамическом режиме, приобретает вид:

$$Q = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{aq} + h \left(\frac{L_0}{2C_z} \right)^{1/4} \left(\frac{r_0}{2a} \right)^{1/2} q^{3/4}, \quad (2.4)$$

Введем обозначения: $\varphi = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{a}$, $\psi = h \left(\frac{L_0}{2C_z} \right)^{1/4} \left(\frac{r_0}{2a} \right)^{1/2}$. Для материала с заданной толщиной это величины постоянные, связанные с теплофизическими a , k и геометрическими h , r_0 параметрами.

Тогда выражение

$$Q = \frac{\varphi}{q} + \psi q^{3/4}$$

представляет собой зависимость плотности энергии, необходимой для разрушения, от плотности мощности.

На рис представлена аналитическая зависимость Q от q .

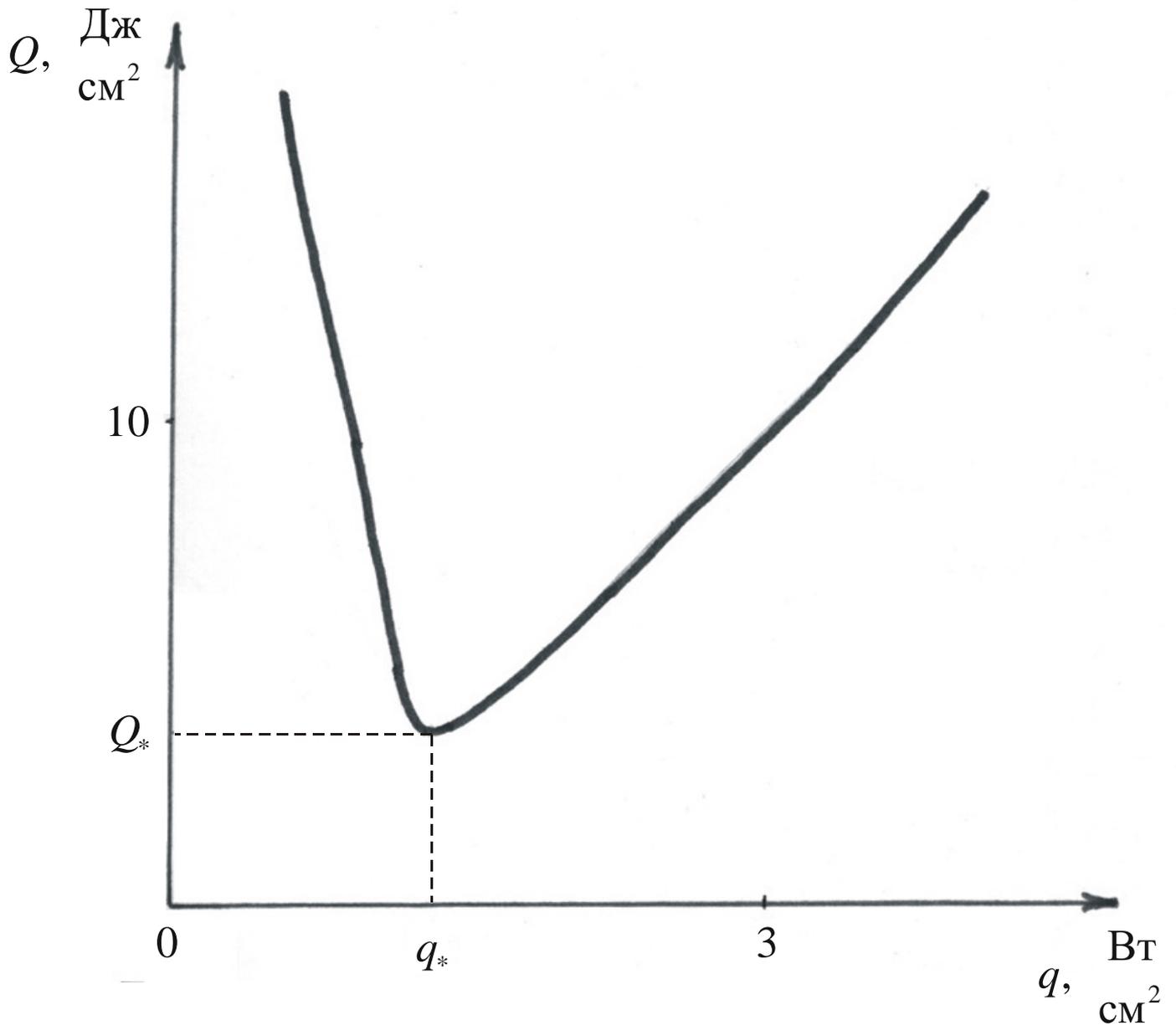


Рис. 1. Зависимость плотности энергии Q от плотности мощности q .

Из определения положения точки экстремума функции $Q(q)$ можно получить выражения для параметров оптимального режима облучения:

$$q_{opt} = 1.2 \left(\frac{\varphi}{\psi} \right)^{4/7}, \quad (2.5)$$

$$\tau_{opt} = 1.7 \psi^{8/7} \varphi^{-1/7}, \quad (2.6)$$

$$Q_{opt} = \frac{\varphi}{q_{opt}} + \psi q_{opt}^{3/4}. \quad (2.7)$$

Рассчитанные значения q_{opt} , τ_{opt} и Q_{opt} для ряда материалов приведены в таблице.

Таблица. Расчетные значения оптимальных параметров гидродинамического режима.

Полученные значения оптимальных параметров почти на два порядка ниже, чем значения, полученные для соответствующих материалов по формуле (1).

Можно решить также обратную задачу, а именно, получить аналитические выражения для теплофизических характеристик (a , L_0) обеспечивающих минимальное энергопотребление:

$$a = \frac{Q_{onm} q_{onm}}{20\pi r c T_k^2}, \quad (2.8)$$

$$L_0 = \left(\frac{Q_{onm} C_z^{1/4} a^{1/2}}{q_{onm}^{3/4} h r_0^{1/2}} \right)^{1/4}. \quad (2.9)$$

Заключение

Таким образом, оптимизация режима лазерного воздействия при фиксированной плотности энергии позволила получить аналитические выражения, характеризующие условия реализации низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения для тонких слоев.

Литература

1. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970, 272с.
2. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ТОНКИХ СЛОЕВ

С.М. Сарнаков

Научный руководитель – к.ф.-м. н., доц. Г.Д. Шандыбина

Показана возможность существования оптимального низкоэнергетического гидродинамического режима лазерного разрушения тонких слоев. Получены аналитические выражения, характеризующие условия реализации оптимального низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения для тонких слоев.

1. Введение

В связи с развитием новых лазерных технологий проблема оптимизации лазерного воздействия по минимальному потреблению энергии является весьма актуальной.

Задача об отыскании оптимального режима испарения рассматривалась в работе [1], где было показано, как необходимо сформировать лазерный импульс, чтобы при заданной энергии излучения получить максимальный удельный вынос материала. При этом были определены значения оптимальной плотности мощности светового потока q_{opt} и оптимальной длительности воздействия τ_{opt} :

$$q_{opt} = 2.8 \frac{aL_0^2}{Q}; \tau_{opt} = 0.35 \frac{Q^2}{aL_0^2}, \quad (1.1)$$

где L_0 – удельная теплота испарения, a – температуропроводность, Q – плотность энергии.

Также было показано, что оптимальный режим обеспечивается в случае, когда скорость движения фронта испарения близка к средней (за время импульса) скорости распространения волны нагрева в материале.

В то же время анализ оптимальных условий в гидродинамическом режиме разрушения представляет практический интерес, поскольку это самый частый случай в процессах лазерной резки и сварки. Из общего представления о гидродинамическом режиме лазерного разрушения следует, что чем меньше световой поток, тем более длительное время требуется для того, чтобы нагреть поверхность материала до температуры кипения. Однако при более высокой плотности мощности материал закипает быстро, но энергия испарения расходуется на перегрев расплава. Следовательно, существует оптимальная плотность мощности, при которой поверхность закипает, а пар удаляет расплавленный слой с минимальными затратами энергии для разрушения.

В настоящей работе получены аналитические выражения для q_{opt} , τ_{opt} и Q_{opt} , характеризующие условия оптимального низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения тонких слоев. В отличие от массивного материала, плавление происходит в пределах полной глубины слоя.

2. Теоретические расчеты

Время экспозиции лазерного воздействия на материал можно представить в виде двух слагаемых: $t = t_H + t_p$, где t_H – время, требуемое для нагревания материала до температуры кипения (T_k), а t_p – время выдавливания расплава, определяемых формулами [2]:

$$t_H = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{aq^2}, \quad (2.1)$$

$$t_p = \frac{h}{v}. \quad (2.2)$$

Здесь k – коэффициент теплопроводности, q – поглощенная плотность светового потока, h – глубина слоя, v – скорость понижения уровня расплава вследствие вытеснения на краях, которая определяется как [3]

$$v = \left(\frac{2qC_z}{L_0} \right)^{1/4} \left(\frac{2a}{r_0} \right)^{1/2}, \quad (2.3)$$

где C_z – скорость звука в испаряемом материале, r_0 – радиус облученной зоны.

Тогда выражение для потока энергии, требуемого для удаления материала в гидродинамическом режиме, приобретает вид:

$$Q = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{aq} + h \left(\frac{L_0}{2C_z} \right)^{1/4} \left(\frac{r_0}{2a} \right)^{1/2} q^{3/4}, \quad (2.4)$$

Введем обозначения: $\varphi = \frac{10\pi k^2 T_k^2}{a}$, $\psi = h \left(\frac{L_0}{2C_z} \right)^{1/4} \left(\frac{r_0}{2a} \right)^{1/2}$. Для материала с заданной толщиной это величины постоянные, связанные с теплофизическими a , k и геометрическими h , r_0 параметрами.

Тогда выражение

$$Q = \frac{\varphi}{q} + \psi q^{3/4}$$

представляет собой зависимость плотности энергии, необходимой для разрушения, от плотности мощности.

На рис представлена аналитическая зависимость Q от q .

Рис. 1. Зависимость плотности энергии Q от плотности мощности q .

Из определения положения точки экстремума функции $Q(q)$ можно получить выражения для параметров оптимального режима облучения:

$$q_{opt} = 1.2 \left(\frac{\varphi}{\psi} \right)^{4/7}, \quad (2.5)$$

$$\tau_{opt} = 1.7 \psi^{8/7} \varphi^{-1/7}, \quad (2.6)$$

$$Q_{opt} = \frac{\varphi}{q_{opt}} + \psi q_{opt}^{3/4}. \quad (2.7)$$

Рассчитанные значения q_{opt} , τ_{opt} и Q_{opt} для ряда материалов приведены в таблице.

Материал	q_{opt} , Вт/см ²	Q_{opt} , Дж/см ²	τ_{opt} , с
Al	$5.6 \cdot 10^6$	0.56	$1 \cdot 10^{-7}$
Cr	$5.4 \cdot 10^6$	1.1	$1.9 \cdot 10^{-7}$
Cu	$1.6 \cdot 10^7$	1.12	$7.2 \cdot 10^{-8}$

Таблица. Расчетные значения оптимальных параметров гидродинамического режима.

Полученные значения оптимальных параметров почти на два порядка ниже, чем значения, вычисленные для соответствующих материалов по формуле (1).

Можно решить также обратную задачу, а именно, получить аналитические выражения для теплофизических характеристик (a , L_0) обеспечивающих минимальное энергопотребление:

$$a = \frac{Q_{onm} q_{onm}}{20\pi r c T_k^2}, \quad (2.8)$$

$$L_0 = \left(\frac{Q_{onm} C_z^{1/4} a^{1/2}}{q_{onm}^{3/4} h r_0^{1/2}} \right)^{1/4}. \quad (2.9)$$

Заключение

Таким образом, оптимизация режима лазерного воздействия при фиксированной плотности энергии позволила получить аналитические выражения, характеризующие условия реализации низкоэнергетического гидродинамического механизма разрушения для тонких слоев.

Литература

1. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970., 272 с.
2. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973.
3. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

ОСОБЕННОСТИ СВЕРЛЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ ИМПУЛЬСАМИ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

М.В. Волков, А.С. Ерёменко

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.П. Вейко

Исследованы особенности прошивки микроотверстий в металлических образцах лазерными импульсами микросекундного диапазона. Проведен микроструктурный анализ образцов. Исследована зависимость измененного слоя материала от параметров лазерных импульсов.

Введение

Во многих применениях микроотверстий в медицине, компьютерных технологиях, машиностроении, авиационной промышленности важна не только геометрическая форма отверстий, точность, и воспроизводимость, но и сохранение неизменной структуры материала. Для сверления таких отверстий уже давно применяют лазерные технологии, которая сегодня обладает широким диапазоном длительностей импульсов излучения. Для этого используют, в основном, твердотельные лазеры импульсно-периодического действия миллисекундного–микросекундного диапазона [1]. В последние годы для сверления микроотверстий стали применять лазеры наносекундного и субнаносекундного диапазона длительностей импульсов, но такие лазеры имеют низкую производительность и высокие эксплуатационные расходы [2, 3]. Лазеры, работающие в режиме миллисекундных длительностей импульсов, позволяют прошивать микроотверстия в любых материалах (до нескольких десятков миллиметров глубиной) при большой производительности и низких эксплуатационных расходах.

Целью работы было определение возможности получения отверстий в металлах с малой конусностью без нарушения структуры материала лазерными импульсами микросекундной длительности.

Экспериментальная установка

В качестве источника лазерного излучения в экспериментах использован лазер на неодимовом стекле ГЛС-22 размером 7.5×100 мм, с плоскопараллельным резонатором (см. рис. 1). База резонатора составляла 500 мм. В многомодовом режиме изменение длительности (40–700 мкс) и энергии импульса генерации (0,2–8,5 Дж) осуществлялось изменением индуктивности и емкости разрядного контура блока питания лампы накачки. Полный угол расходимости излучения лазера составлял 90° . Для улучшения угловой расходимости лазерного излучения использован внешний пространственный фильтр (2). Для фокусировки лазерного излучения на образец (4) использованы линзы (3).

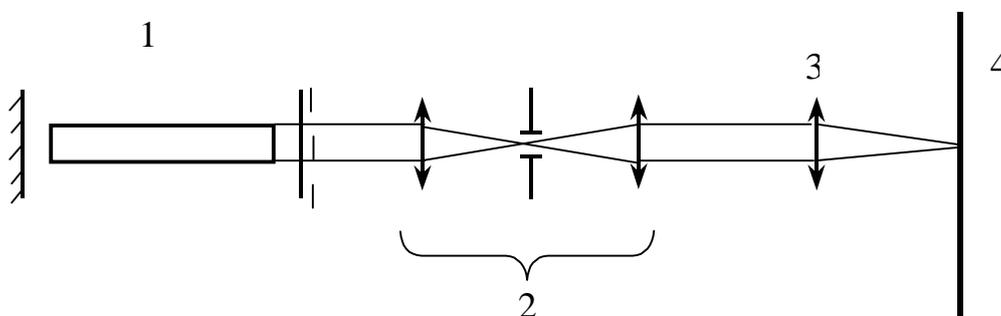


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – пространственный фильтр, 3 – фокусирующая линза, 4 – образец

При прошивке отверстий применена короткая серия импульсов. В большинстве случаев для прошивки отверстия энергией импульса 8,5 Дж достаточно было одного

импульса. Для получения отверстий с минимальной конусностью было достаточно экспериментально определить зависимость конусности от параметров обработки.

Результаты эксперимента

Зависимость от свойств фокусирующей системы. В эксперименте использованы различные фокусирующие линзы. Положение фокальной плоскости определено с точностью до 100 мкм. Типичные входные и выходные диаметры отверстий для образца толщиной 3 мм при энергии импульса 0,8 Дж и длительности импульса 240 мкс приведены в табл. 1.

f , мм	$\varnothing_{\text{вход}}$, мкм	$\varnothing_{\text{выход}}$, мкм	N , число импульсов
49	320	295	6
49	380	380	6
49	400	350	6
49	400	300	6
67	300	200	8
100	470	300	10
100	470	300	10
100	480	280	10

Таблица 1. Конусность отверстий от числа импульсов и фокусного расстояния линзы

Зависимость от параметров лазерного импульса. Произведена обработка стального образца толщиной 3 мм. Использовалась линза с фокусным расстоянием 49 мм. Результаты эксперимента сведены в таблицу 2.

$E_{\text{ген}}$, Дж	$\tau_{\text{ген}}$, мкс	h , мм	$\varnothing_{\text{вход}}$, мкм	$\varnothing_{\text{выход}}$, мкм	N , число импульсов
0,6	170	3	210	145	12
0,9	240	3	220	145	6
0,9	240	3	230	145	6
0,9	420	3	210	60	6
0,9	275	3	210	145	6
1,2	275	3	210	210	6
1,1	275	3	230	145	6
1,35	240	3	230	210	5

Таблица 2. Параметры отверстий от числа импульсов, фокусного расстояния линзы и длительности импульсов лазерного излучения

Обработка с подстройкой фокуса. Подстройка фокуса осуществлена следующим образом: в процессе обработки образец передвигали к фокусирующей системе, так что положение фокуса было на дне растущего отверстия. Входные и выходные диаметры отверстий практически не отличались (см. рис.2).

Обработка серией профилированных импульсов. В эксперименте использованы образцы толщиной 0,5 мм. Первый импульс длительностью 80 мкс и энергией 0,5 Дж прошивал коническое отверстие. Вторым, более мощным импульсом удалялся некоторый слой материала, увеличивая выходной диаметр. Последующие импульсы не изменяют выходной диаметр отверстия.

Объяснить этот эффект можно следующим образом. Лазерное излучение в перетяжке имеет гауссово распределение. Входная часть отверстия действует как виньетирующая диафрагма, обрезая крылья этого распределения. Максимальная по интенсивности часть гауссового распределения проходит в сформированное отверстие. Стенки поглощают часть излучения менее интенсивную, чем в центре, что приводит к

незначительному расплавлению стенок отверстия. Поэтому стенки отверстий получаются более гладкими, а входные и выходные диаметры – порядка 220 мкм и 170 мкм соответственно.

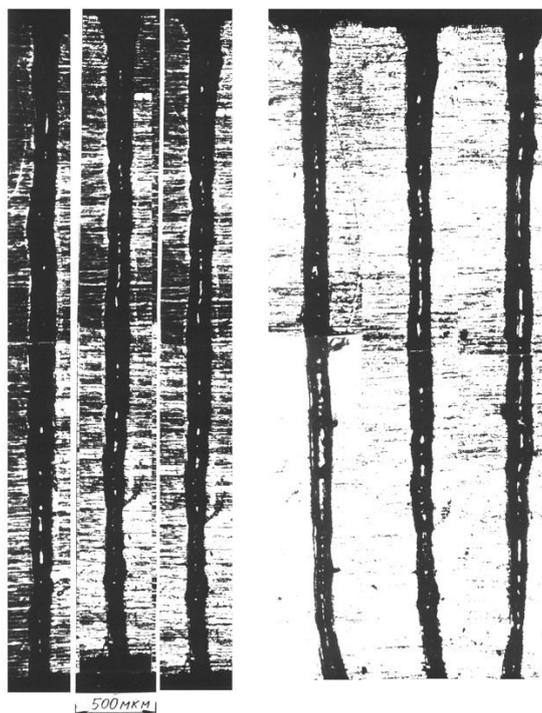


Рис.2. Продольный разрез микроотверстия в стальном образце толщиной 5 мм.

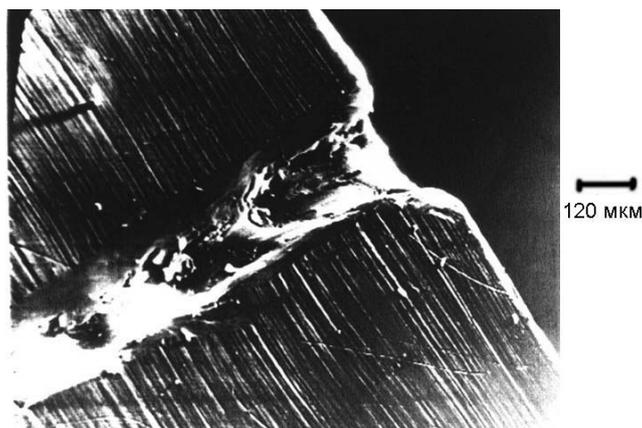
Обработка с прочисткой микроотверстий. В ходе эксперимента задняя стенка образцов помещалась на водную поверхность. После прошивки микроотверстия происходит испарение воды, водяной пар вырывается наружу, прочищая его, что приводит к формированию более чистой поверхности выхода микроотверстия. Однако выходной диаметр микроотверстия в этом случае несколько меньше, чем при обычной обработке. Получены типичные значения входных и выходных диаметров 220 мкм и 140 мкм соответственно.

Обработка с поддувом газа. В лазерных технологиях для увеличения эффективности обработки используют поддув разных газов. В эксперименте для уменьшения валика на передней поверхности использовали поддув воздуха вдоль поверхности образца. Для этого применено сопло с косым срезом (около 20°), воздух в котором нагнетался компрессором. В результате сдува продуктов взаимодействия, валик вокруг входного отверстия становился асимметричным и уменьшался в размере. Изменение входного и выходного диаметров практически не наблюдалось.

Изучение формы микроотверстий. На рис. 3. показаны микрофотографии продольного разреза микроотверстий с разным увеличением. На них отчетливо виден перераспределенный закристаллизовавшийся расплав, который искажает форму отверстия. При реализованных режимах обработки в отверстиях образовывался большой объем расплава, который удалялся из отверстия лишь частично. Это неблагоприятные и почти не управляемые факторы, которые сильно снижают эффективность и точность сверления, влияя на повторяемость и геометрическую форму отверстий (см рис. 2). На рис. 3.б показано искривление оси микроотверстия, которое возникло из-за экранирования и переотражения лазерного излучения от застывшей жидкой фазы на боковых стенках отверстий. Действительно, на рис 3.б хорошо заметно большее количество закристаллизованного расплава вдоль стенок микроканалов.



а



б

Рис. 3. Микрофотографии продольного разреза входной части микроотверстия в металлическом образце

При обработке короткой серией из 5–12 импульсов идет эффективное сверление микроотверстий глубиной до 5 мм и более с диаметром отверстий 200–300 мкм, но на стенках микроотверстий (см. рис. 3.б.) видны следы от воздействия каждого импульса из серии. Поэтому необходимо производить чистовую доводку.

Проведен металлографический контроль стальных образцов, обработанных короткой серией импульсов с различной длительностью и энергией. Образцы разделены на три группы. Первая группа обработана импульсами с энергией 8,5 Дж и длительностью импульса $\tau=700$ мкс, вторая группа – импульсами с энергией 1,4 Дж и $\tau=120$ мкс, соответственно, третья группа обработана импульсами с энергией от 0,5 до 1,5 Дж и $\tau=120$ мкс.

Пример поперечного среза микроотверстия приведен на рис. 4. (см. также табл. 3).

Первая группа. При большой энергии излучения материал значительно расплавлен. Диаметр отверстий – наибольший из трех групп. Стенки отверстий имеют минимальную толщину измененного слоя, часть микротрещин из измененного слоя входит вглубь материала.

Вторая группа. Отверстия меньшего диаметра. Обработка произведена большим числом импульсов, чем в первой группе. Измененный слой на боковых стенках отверстий расположен "ступенчато" (см. рис. 3.б). Микротрещины из измененного слоя не входят в основной материал.

Третья группа. Отверстия обработаны в режиме, аналогичном второй группе, но с изменением энергии в импульсе. Материал расплавлен не полностью. Диаметр отвер-

стей наименьший. Измененный слой имеет наибольшее число микротрещин, которые входят в основной материал.

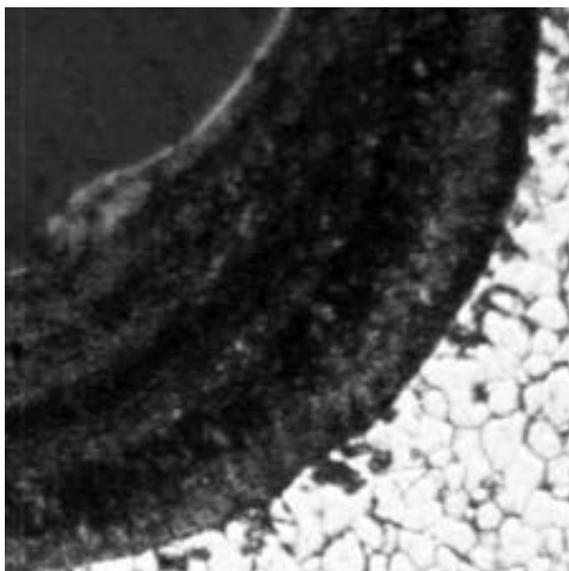


Рис. 4. Микрофотография поперечного среза микроотверстия в стальном образце. Хорошо заметен измененный слой основного материала. Увеличение $500\times$

Группа	$E_{ген}, Дж$	$\tau_{ген}, мкс$	Плотность мощности на образце, $Вт/см^2$	Число импульсов	$\varnothing_{отв}, мкм$	Максимальная величина измененного слоя, мкм	Минимальная величина измененного слоя, мкм	Характеристика трещин
I	8,5	700	$7,6 \times 10^7$	1	450	58	7	Трещины входят в основной материал
II	1,4	120	2×10^7	5	340	118	6	Трещины не входят в основной материал
III	0,5–1,4	120	$8 \times 10^6 - 1,3 \times 10^7$	7	240	67	8	Трещины входят в основной материал

Таблица 3. Результат микроструктурного анализа

Заключение

На стальных образцах разных толщин проведено сверление микроотверстий лазерными импульсами микросекундного диапазона, как одиночными импульсами, так и серией импульсов. Качество боковых стенок отверстия при таком режиме сверления оказывается неудовлетворительным. Необходима чистовая обработка таких микроотверстий. Кроме того, образуется измененный слой с большим числом микротрещин, которые распространяются в основной материал. Известно, что толщина измененного слоя материала $h \sim \sqrt{\tau_{ген}}$, поэтому уменьшение длительности импульса должно привести к уменьшению толщины измененного слоя материала. Диаметр микроотверстий и толщина измененного слоя при сверлении в таком режиме зависят от энергии импульсов и длительности импульса. Так, для группы I толщина измененного слоя оказалась наименьшей, что можно объяснить удалением расплава отверстия за счет избыточного давления газа.

Для повышения точности обработки и уменьшения толщины измененного слоя при сверлении микроотверстий следует применять более короткие импульсы лазерного излучения. Но переход к наносекундным и субнаносекундным импульсам резко уменьшает производительность процесса сверления как глубоких микроотверстий, так и отверстий с диаметром более сотни микрон, так как в этом случае при увеличении энергии импульса, а, следовательно, и объема удаляемого материала идет интенсивное плазмообразование [4]. Образующаяся внутри канала плазма отражает, поглощает и рассеивает, т.е. экранирует лазерное излучение, процесс сверления прекращается. Поэтому следует производить сверление отверстий в режимах до порога интенсивного плазмообразования, для которых плотность мощности излучения на образце составляет 10^8 – 10^9 Вт/см². Для обеспечения такого режима по плотности мощности, уменьшения бокового теплоотвода, увеличения качества боковых стенок отверстия и сохранения производительности процесса следует использовать импульсы с длительностью порядка сотен наносекунд с частотой повторения несколько десятков кГц [5, 6]. Тогда для большинства металлов при длительности импульса 200–300 нс величина измененного слоя составляет не более 15–20 мкм, что соответствует большинству требований к качеству поверхности.

Литература

1. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София, 1991.
2. Кононенко Т.В., Кононов В.И. и др. Сравнительное исследование абляции материалов фемтосекундными пико/наносекундными лазерными импульсами. // КЭ. 1999. №2.
3. J. Radke, C. Jasper, F. Dausenger Helical drilling of high quality micro holes in steel and ceramics with short and ultrashort pulsed laser. Institut für strahlweryeuge, Stuttgart, Germany.
4. Кононенко Т.В., Кононов В.И., Гарнов С.В. и др. Особенности плазменной экранировки при абляционном формировании глубоких каналов высокоинтенсивным лазерным излучением. // КЭ. 1998. Т.25. №1.
5. Chen Xiangli, Report of short pulse high intensity laser machining. 1999. (<http://www.columbia.edu/cu/mechaning/mrl/ch5index.html>)
6. High accuracy microdrilling of steel with solid state UV laser at 10 mm/sec rate. // Lambda Physik USA, Ft. Lauderdale, FL.

ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МР-ТОМОГРАФИИ

Н. А. Уткина

Научный руководитель – к.т.н., доц. М. Я. Марусина

Рассмотрен способ фазовой коррекции сигналов спинного эха в двумерной 2D Фурье-томографии. Фазовый сдвиг при этом является функцией только числа повторений последовательности и не изменяется в процессе регистрации резонанса. Амплитуда фазокодирующего градиента фиксирована. Приведены результаты численного моделирования.

Введение

Магнитно-резонансная томография (МРТ) за последние годы стала одним из ведущих методов неинвазивной диагностики. С 70-х годов, когда принципы магнитного резонанса впервые стали использоваться для исследования человеческого тела, до сегодняшних дней этот метод медицинской визуализации неизменно изменялся и продолжает быстро развиваться. Совершенствуются техническое оснащение, программное обеспечение, развиваются методики получения изображений, разрабатываются парамагнитные и ферромагнитные контрастные препараты. Это позволяет постоянно находить новые сферы применения МРТ. Если сначала ее применение ограничивалось лишь исследованиями центральной нервной системы, то сейчас МРТ с успехом применяется практически во всех областях медицины.

1. Двумерная 2D Фурье-томография

На практике широкое распространение получили методы двумерной (2D) Фурье-томографии. Это основной математический аппарат реконструкции магнитно-резонансных изображений в интегральных методах, который используется для преобразования временных характеристик в частотные и обратно.

Преобразование Фурье определяется интегралом

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) [\cos(\omega t) - i \sin(\omega t)] dt. \quad (1)$$

Фактически преобразование Фурье использует информацию на входе, состоящую из действительной и мнимой частей. Представим M_x как поданную на вход действительную часть, а M_y – как поданную на вход мнимую часть. Следовательно, на выходе результат преобразования Фурье будет иметь действительную и мнимую части.

Рассмотрим следующую функцию:

$$f(t) = e^{-at} e^{-i2\pi vt}. \quad (2)$$

В ЯМР-спектроскопии действительная часть, полученная на выходе преобразования Фурье, принимается за частотную компоненту спектра. Для того чтобы получить эстетически правильную (абсорбционную) частотную компоненту спектра, надо подать на вход преобразования Фурье функцию косинуса как действительную часть и функцию синуса как мнимую часть.

Чтобы получить спектр поглощения как действительную часть на выходе преобразования Фурье, либо к временной, либо к частотной компоненте спектра необходимо применить фазовую коррекцию. Этот процесс аналогичен преобразованию координат – переводу координат вектора из одной системы координат (XY) в другую ($X''Y''$):

$$\begin{bmatrix} RE'' \\ IM'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RE \\ IM \end{bmatrix}.$$

Если спад свободной индукции записан так, что его действительная и мнимые части имеют фазовый сдвиг, составляющий 40° , матрица преобразования координат может быть использована с $\varphi = -45^\circ$. Действительные части скорректированных спадов свободных индукций будут выглядеть как функции косинуса, а мнимые части – как функции синуса.

Преобразование Фурье над скорректированными по фазе спадами свободных индукций дает спектр поглощения для действительной части, получающейся из преобразования Фурье. Эта коррекция может быть реализована в частотной области также как и во временной области.

ЯМР-спектр требует проведения как константной, так и линейной коррекций фазы сигнала после преобразования Фурье:

$$\varphi = m\omega + b. \quad (3)$$

Необходимость в константных фазовых коррекциях, b , возникает из-за невозможности спектрометром измерять точные значения M_x и M_y . Необходимость в линейных фазовых коррекциях, m , возникает из-за невозможности спектрометром измерять поперечную намагниченность сразу же после РЧ импульса.

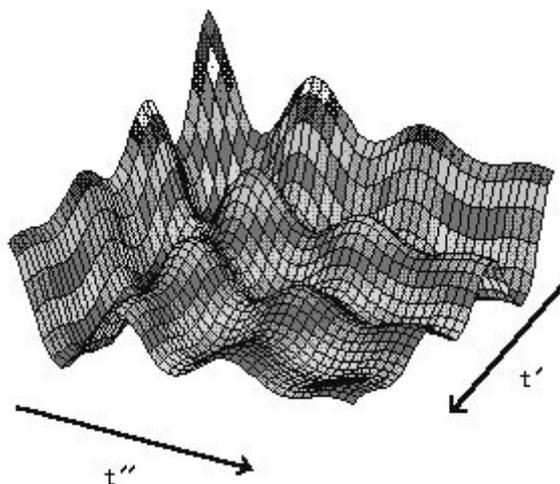


Рис. 1. Двумерный массив данных

В магнитно-резонансной томографии сигналы M_x или M_y отображаются редко. Вместо этого используется модуль сигнала. Модуль сигнала равняется квадратному корню из суммы квадратов M_x и M_y .

Рассмотрим двумерный массив данных, показанный на рис. 1. Эти данные имеют два измерения: t' и t'' . Преобразование Фурье над данными производится сначала в одном, а затем в другом направлениях. Первая часть преобразований Фурье проводится в t' измерении для получения $f' \times t''$ множества данных (рис. 2, а). Вторая часть преобразований Фурье производится в t'' измерении для получения $f' \times f''$ множества данных (рис. 2, б).

Двумерное преобразование Фурье необходимо для проведения МРТ на современном уровне. В МРТ данные собираются в эквиваленте t' и t'' измерениям, называемом К-пространством. Эти исходные данные преобразуются для получения изображения, которое эквивалентно описанным ранее $f' \times f''$ данным.

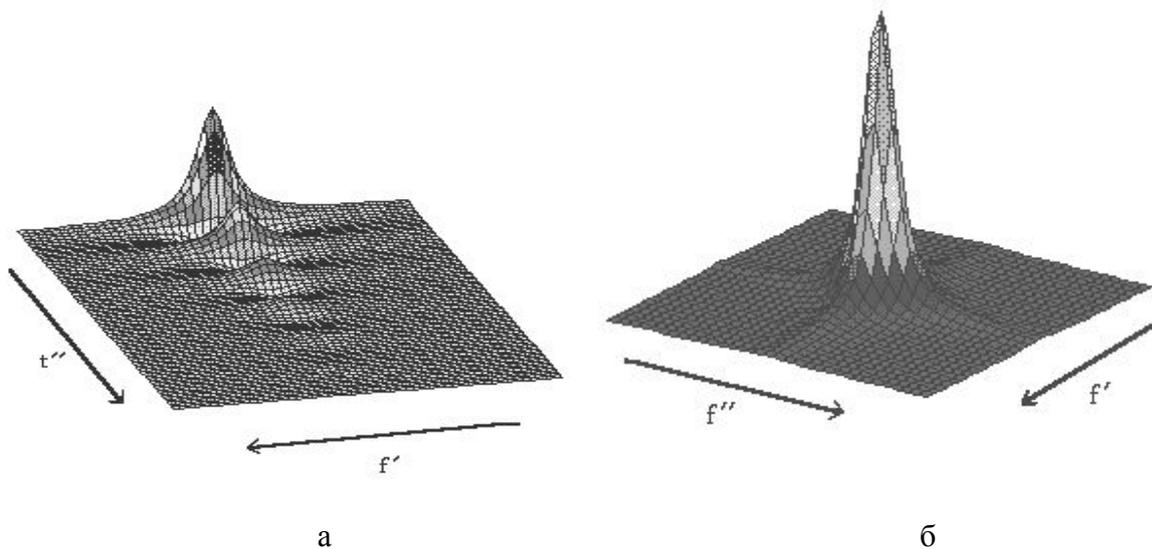


Рис. 2. Преобразования Фурье в t'' измерении (а), преобразования Фурье в f'' измерении (б).

2. Фазовая коррекция сигналов в двумерной 2D Фурье-томографии

В настоящее время известен ряд способов построения изображений на основе магнитного резонанса. На практике широкое распространение получили методы двумерной (2D) Фурье-томографии, основанные на частотном и фазовом кодировании прецессирующих спиновых магнитных моментов возбужденного слоя в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Импульсная последовательность, реализующая способ, повторяется N раз при различных значениях амплитуды фазокодирующего градиента g_y . Сигнал спинового эха $S(t, p)$ формируется в частотно-кодирующем градиенте g_x и может быть записан в виде:

$$S(t, p) = \exp[i\varphi(t, p)] \iint \rho(x, y) \exp[i\gamma(xg_x(t-t_0) + yg_y pT_y)] dx dy . \quad (4)$$

Здесь $\rho(x, y)$ – распределение спиновой плотности в слое; γ – гиромагнитное отношение исследуемых ядер; t – время; t_0 – момент формирования спинового эха; pg_y ($p = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2} - 1$) – амплитуда фазокодирующего градиента; T_y – его длительность. Множитель $\exp[i\varphi(t, p)]$ характеризует нестабильность фазы сигнала, связанной, например, с нестабильностью параметров электронной аппаратуры, поляризуемого магнитного поля и т.д. Недостаточная фазовая стабильность сигнала искажает изображение, представляющее собой 2D преобразование Фурье выражения (4), или полностью "разрушает" его.

В данной статье предлагается способ фазовой коррекции, реализуемый при условии, что фазовый сдвиг остается постоянным (или изменением его можно пренебречь) в интервале регистрации сигнала резонанса и является произвольной функцией только числа повторений последовательности p .

Воздействие на образец фазокодирующим градиентом приводит к возникновению какого-то начального распределения фазы прецессии магнитных моментов и, соответственно, начальной фазы θ прецессирующего вектора намагниченности. Она полностью определяется распределением резонирующих ядер и площадью под кривой фазокодирующего градиента и несет информацию, необходимую для восстановления спинового распределения в направлении оси y :

$$\theta(p) = \arctg \frac{\iint \rho(x, y) \sin(\gamma g_y y p T_y) dx dy}{\iint \rho(x, y) \cos(\gamma g_y y p T_y) dx dy}. \quad (5)$$

В результате фаза сигнала представляет собой сумму информативной фазы $\theta(p)$ и мешающего фазового сдвига $\varphi(p)$, которая может быть определена через значения сигнала резонанса в момент формирования спинового эха:

$$\varphi(p) + \theta(p) = \arctg \frac{\text{Im}[S(t_0, p)]}{\text{Re}[S(t_0, p)]}. \quad (6)$$

Для коррекции фазы $\varphi(p)$ необходимо разделить информативную фазу и мешающий сдвиг. Это можно сделать, если дополнительно воздействовать на исследуемый объект импульсной последовательностью. Регистрируемый сигнал при этом будет иметь вид

$$S_1(t) = \iint \rho(x, y) \exp[i\gamma g_y (t - t_0')] dx dy. \quad (7)$$

Этот сигнал можно рассматривать как калибровочный, позволяющий определить информативную фазу:

$$\theta(t - t_0') = \arctg \frac{\text{Im}[S_1(t)]}{\text{Re}[S_1(t)]}. \quad (8)$$

Возможный постоянный фазовый сдвиг для данного сигнала устраняется следующим способом. Фиксируя N моментов времени для $S_1(t)$ ($t = t_0' + pT_y$), находим $\theta(p)$ при каждом из N значений амплитуды фазокодирующего градиента. Фазовая ошибка $\varphi(p)$ определяется из соотношения

$$e^{i\varphi(p)} = \frac{S_1^*(t_0' + pT_y) S(t_0', p)}{|S_1(t_0' + pT_y) S(t_0', p)|}, \quad (9)$$

где S_1^* – величина, комплексно-сопряженная с S_1 . Известное значение угла фазового сдвига $\varphi(p)$ позволяет скорректировать сигналы магнитного резонанса, получаемые с помощью базисной последовательности, и устранить тем самым искажения изображения.

Изложенная модель применима и к коррекции фазовых искажений изображений, полученных в нестабильных магнитных полях. Дополнительный набег фазы φ_p , вызванный нестабильностью поля $H_p(t)$ при каждом из значений p повторений последовательности, можно представить в виде

$$\varphi_p = \varphi_0(p) + \gamma \int_{t_0}^t \Delta H_p(\tau) d\tau, \quad (10)$$

где $\Delta H_p(t) = (\omega_0 / \gamma) - H_p(t)$; ω_0 – опорная частота квадратурного фазового детектора,

$$\varphi_0(p) = \gamma \int_0^{t_0} \Delta H_p(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Величина $\varphi_0(p)$ представляет фазовую ошибку в момент формирования спинового эха. Поскольку t_0 больше интервала, в котором регистрируется сигнал магнитного резонанса, то искажения изображения в основном определяются фазовым множителем $\varphi_0(p)$. Например, при построении изображения, взвешенного по времени поперечной релаксации T_2 , t_0 много больше указанного интервала. Расчеты показывают, что вели-

чиной $\exp\{i\gamma \int_{t_0}^t \Delta H_p(\tau) d\tau\}$ можно пренебречь при условии, что в интервале наблюдения

сигнала $\gamma\Delta H\rho(\tau)$ представляет собой медленно изменяющуюся функцию, абсолютное значение которой не превышает частотного интервала, приходящегося на единичный элемент изображения. При этих условиях можно также исключить из рассмотрения изменение фазы калибровочного сигнала, получаемого с помощью воздействия на образец дополнительной импульсной последовательности. Дальнейшая фазовая коррекция сигналов резонанса осуществляется представленным выше способом.

3. Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования условий построения изображения образца с равномерной спиновой плотностью в форме прямоугольника в нестабильном поле и данные коррекции приведены на рис.3, а, б.

Выполнен численный расчет изображения функции, соответствующей постоянной спиновой плотности в квадрате со сторонами 2 см. Параметры импульсной последовательности выбирались следующими: считывающий градиент $g_x = 8 \cdot 10^{-5}$ Тл/см ($t \leq te$) и $g_x = 4 \cdot 10^{-5}$ Тл/см ($t > te$), градиент фазового кодирования $g_y = 2.5 \cdot 10^{-6}$ Тл/см, длительность импульса фазокодирующего градиента $t_0 = 2.7 \cdot 10^{-3}$ с. Частота дискретизации составляла 11900 и 5950 Гц, соответственно, временной интервал между селективным возбуждающим импульсом и моментом формирования максимума эхо-сигнала 10^{-2} с; время повторения последовательности 1 с, число повторений 64. Соответственно выбирались 64 значения сигнала спинового эха. Рассчитанное изображение содержит 64×64 элемента, что соответствует 186 Гц для единичного элемента при градиенте $8 \cdot 10^{-5}$ Тл/см. Дрейф поля во времени описывался соотношением $10^{-6}(t - 0.01t^2)$, пространственное распределение – выражением $10^{-5}(x^2 + 2y)$. Таким образом, максимальное временное изменение поля эквивалентно ~ 6 ед./элемент, неоднородность ~ 11.5 . Временной интервал между максимумом сигнала эха и началом выборки спада свободной индукции (ССИ) 10^{-2} с. Фазовый множитель для ССИ определялся по 32 точкам. На рис. 3 представлено изображение, рассчитанное по соотношению (4) при $g_x = 8 \cdot 10^{-5}$ Тл/см

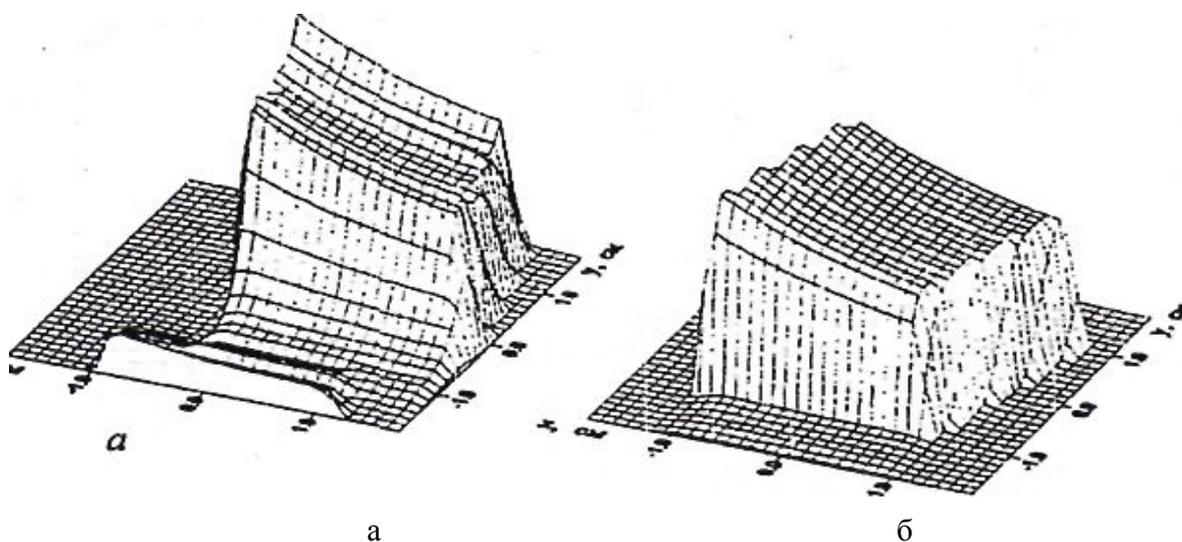


Рис. 3. Изображения объекта, рассчитанные в предположении нестабильного магнитного поля (а) и после коррекции фазы (б)

Проблема (или артефакт) наложения в магнитно-резонансной томографии есть изображение одной половины отображаемого объекта на противоположной стороне. С точки зрения одномерных частотных компонент спектра, наложение является следствием наличия низкочастотных вершин на противоположной (неверной) стороне спектра. Артефакты изображения на рис. 3, б связаны с потерей информации о сигналах ре-

зонанса как функции p , происшедшей вследствие замены половины значений каждого из них нулевыми.

Заключение

Рассмотренный способ фазовой коррекции сигналов спинового эха в 2D Фурье-томографии прост в реализации и обладает высокой эффективностью при условии, что паразитный фазовый сдвиг является функцией только числа повторений последовательности и не изменяется (или этим изменением можно пренебречь) в процессе регистрации резонанса при фиксированной амплитуде фазокодирующего градиента. Выполнение последнего условия является принципиальным для любого метода построения видео изображения. Применение данного способа к построению изображений существенно (на 2–3 порядка) снижает требования к стабильности поляризующего магнитного поля.

Литература

1. Лукьянович И.К., Савицкий. А.А. // Весті АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук, № 2, 1991, с 77-80
2. Лукьянович И.К., Савицкий. А.А. // Журнал прикладной спектроскопии, №2 (1999) с. 70-74
3. J. P. Hornak, The basics of MRI. <http://www.cis.rit.edu/people/faculty/hornak/>.

ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КАРТИРОВАНИЯ НЕСТАБИЛЬНОГО И НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯРИЗУЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. А. Чиркова

Научный руководитель – к.т.н., доц. М. Я. Марусина

Представлен ряд методов картирования магнитных полей, которые позволяют достаточно быстро и точно производить настройку магнитных систем МР-томографов.

Введение

В настоящее время известен ряд методов построения ЯМР-изображений. На практике широко применяются методы томографии спинового эха, основанные на фазовом и частотном кодировании прецессирующих магнитных моментов по взаимно перпендикулярным направлениям. Использование фазы прецессии в качестве информативного параметра предъявляет высокие требования к стабильности параметров аппаратуры. При частотном кодировании предполагается линейное соответствие координат и частоты прецессирующих спинов, что требует высокой однородности поля. Обычно стабильность поля поддерживается на уровне 10^{-7} Тл, причем это относится как к кратковременной (за время регистрации единичного сигнала), так и долговременной (за время полного эксперимента) стабильности. На этом же уровне допускается и неоднородность поля [1].

Достижение высокой стабильности и однородности поляризуемого поля предполагает наряду с решением других задач тщательную настройку и регулировку магнитной системы. Контроль изменений поля во время этих операций может быть выполнен датчиками ЯМР. Но такие измерения требуют больших временных затрат, поэтому в последнее время предложен ряд томографических методов картирования поля.

1. Метод А. А. Maudslej

Распределение поля в слое получают после трехмерного Фурье-преобразования сигналов, регистрируемых в неоднородном поле, выступающем в роли считывающего градиента [2].

Объекты, полученные отбором, ограничивающим пространственную область наблюдения, позволяют легко получить распределение магнитного поля и облегчить настройку магнитов. В представленном методе показан эффект набора корректирующих катушек суперпроводящего магнита – соленоида, используемого для получения ЯМР-изображения.

Распределение поля в различных областях может быть измерено посредством определения формы объекта, от которого получают ЯМР-сигнал. Изображения распределения поля получают в одном, двух или трех измерениях. Для всех вариантов основная последовательность для РЧ возбуждения, переключения градиентов и приобретения данных одинакова (рис. 1). Объект, помещенный в пределах области отображения – тонкая пластина ЯМР-заметных ядер, ориентируемых на плоскости, по которой должно быть сделано измерение поля.

Объект рассматривается в центральном поперечном сечении. Широкая РЧ полоса порождает сигнал, который возбуждает все спины. Затем спины разворачиваются в присутствии пространственных градиентов, амплитуды которых для этого случая изменяются по закону:

$$G'_x = l * G_x, \quad G'_y = l * G_y$$

для всех значений l от $L/2$ до $L/2-1$ и m от $M/2$ до $M/2-1$ в способе Фурье изображения. Затем 180° дефокусирующий сигнал возвращает ЯМР-сигнал, и результирующий эхоспин наблюдается в отсутствии любого градиента поля.

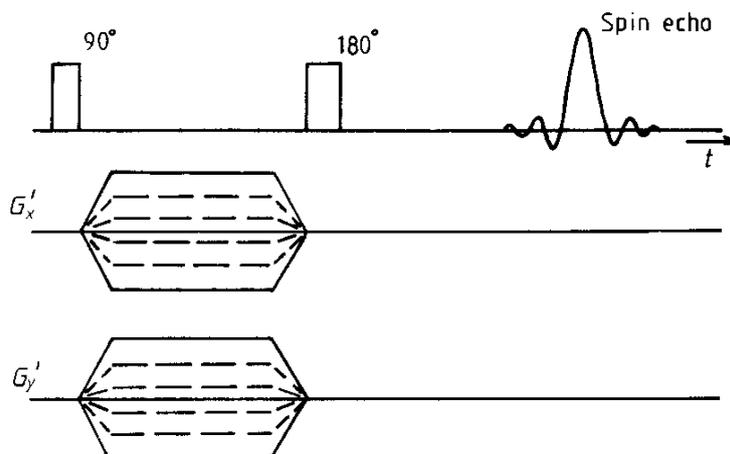


Рис. 1. Импульсная последовательность РЧ возбуждения и переключения градиентов

В течение наблюдаемого периода спины поворачиваются только под влиянием неоднородно меняющегося магнитного поля. Преобразование Фурье каждой эхомодели содержит информацию об изменениях поля около объекта вместе с изменениями фазы и интенсивности, возникающими из-за приложения градиентов G'_x и G'_y , которые обеспечивают пространственное декодирование информации. Эхо измерено для всех величин обоих градиентов, дающих трехмерный набор данных. Затем трехмерное преобразование Фурье обеспечивает набор данных, в котором две оси представлены пространственными координатами, а третья ось – частотой ЯМР-резонанса, которая прямо пропорциональна силе поля в каждой точке сечения. Эта последовательность измерения поля была применена для множества геометрических и магнитных распределений полей.

Трехмерные наборы данных описываются в сечениях. Размер каждого сечения 128×128 точек. Время сбора данных для изображений обычно составляет около 30 минут, хотя подобные данные с более низким пространственным разрешением можно получить через 10 минут. Для двумерных наборов данных показывается конечное изображение матрицы 512×512 точек, обычно составляемое из 256 первоначальных измерений, полученных за полное время (менее чем четыре минуты) сбора и обработки данных.

Получение полного набора изображений распределений поля, обеспеченных различными корректирующими катушками (к ним добавляется дополнительный магнитный поток) ($[X^2 - Y^2]$, $[Z^2]$, $[XY]$, $[YZ]$) устанавливает общее понимание эффектов, создаваемых каждой из катушек, следовательно, становится возможным их применение в процедуре настройки.

Этот метод измерения поля значительно увеличил скорость процедуры настройки. В результате калибровки каждой корректирующей катушки можно произвести прямое количественное измерение распределения поля.

2. Метод получения распределения поля по фазовым артефактам изображения

Данный метод описан в статье К. Sekihara, S. Matsui, H. Kohno [3].

Описанный выше способ измерения распределения статического поля эффективен, однако в нем большую часть времени занимает сбор данных. Данный метод использует один набор комплексных изображений, полученных путем небольшого изменения обычных Фурье-отображений и является более простым и легко осуществимым.

Метод использует обычную импульсную последовательность, разложенную в ряд Фурье, с тем исключением, что временной интервал между $\pi/2$ и π импульсами не равен интервалу между π импульсом и формированием спинового эха (рис. 2). В изображениях, полученных из импульсной последовательности, дистанция между этими двумя временными интервалами определяется фазовым сдвигом, который зависит от распределения статического магнитного поля. Эта временная разница между двумя периодами определена как ε . Таким образом, информация о распределении поля может быть взята из этих фазовых сдвигов.

РЧ последовательность и последовательность градиента поля используются для трехмерного отображения поля. Обозначим $\rho(x,y,z)$ – распределение плотности сигнала, $E(x,y,z)$ – статическое распределение поля, представленное отклонением от напряженности поля, для соответствующей частоты в фазочувствительном представлении. Таким образом, трехмерный сигнал, наблюдаемый в последовательности $F_\varepsilon(G_x, G_y, G_z, t_z)$ может быть выражен во вращающейся системе координат как

$$F_\varepsilon(G_x, G_y, G_z, t_z) = \int \rho(x, y, z) \exp\{i\gamma[E(x, y, z)\varepsilon + G_x x t_x + G_y y t_y + (G_z z + E(x, y, z))t_z]\} dx dy dz,$$

где γ – гиромагнитное отношение, а G_x, G_y, G_z – амплитуды градиентных полей по x, y, z . Предположим, что $G_z \gg |E(x, y, z)|$. Тогда преобразование, полученное из $F_\varepsilon(G_x, G_y, G_z)$ будет:

$$S_\varepsilon(x, y, z) = \rho(x, y, z) \exp[i\gamma E(x, y, z)\varepsilon]. \quad (1)$$

Таким образом, для отклонения напряженности получается соотношение

$$E(x, y, z) = \frac{1}{\gamma\varepsilon} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{S_\varepsilon(x, y, z)\}}{\text{Re}\{S_\varepsilon(x, y, z)\}} \right). \quad (2)$$

Здесь $\text{Re}\{\}$ и $\text{Im}\{\}$ обозначают действительную и мнимую части изображения, соответственно. Так, распределение поля $E(x,y,z)$ может быть получено при помощи уравнения (2), если мы выбираем ε так, чтобы соблюдалось условие $|\gamma E_{max}\varepsilon| < \pi/2$, где E_{max} – максимальная величина $E(x, y, z)$ в области видимости.

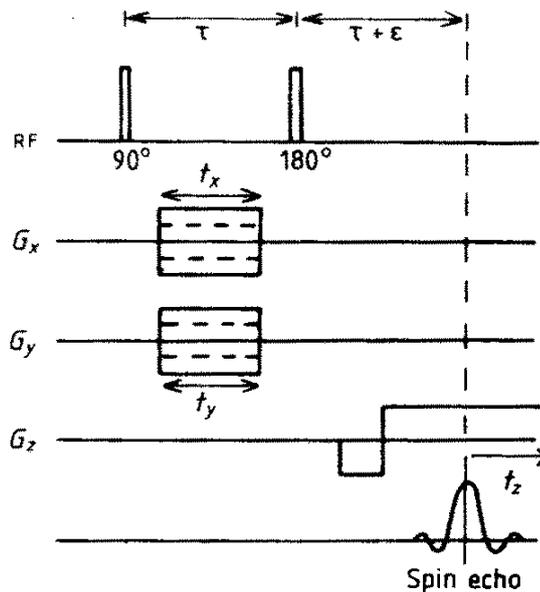


Рис. 2. Последовательность РЧ и градиентных полей, используемых для трехмерного отображения магнитного поля

Данный способ может содержать ошибки при измерениях полей высокой степени неоднородности, так как неоднородность является причиной кривизны выбранного слоя. Более того, выбираемые π импульсы могут вызвать неправильное определение слоя.

Измерение трехмерного поля выполняется путем трехмерного отображения, или двухмерного отображения в совокупности с многослойной технологией. Последний метод выгоден благодаря возможности осуществления его с почти таким же периодом получения данных, как при двухмерном отображении. Однако, как только многослойная технология начинает использовать процесс выбора слоев, их искажения оказывают влияние на точность измерения распределения. Таким образом, трехмерное отображение более предпочтительно для измерения полей с высокой степенью неоднородности.

В сравнении с методом А.А. Maudslej данный способ имеет два значительных преимущества:

- 1) содержит гораздо более короткий период запроса данных, тогда как количество ячеек данных увеличено;
- 2) нет необходимости в построении специальных РЧ и градиентных последовательностей. Реализовать метод позволяет обычная последовательность изображений с очень небольшой модификацией.

3. Определение искажения поля по геометрическим искажениям изображения фантома

В данном случае применяется способ формирования изображений с использованием ЯМР-резонанса и нежелательных компонентов магнитных полей, которые приводят к искажению изображения (пространственные колебания статических полей и нелинейные компоненты градиентных полей). С помощью преобразования Фурье выведена зависимость между этими нежелательными компонентами и искажением изображения [4].

Существование нежелательных компонентов магнитных полей – результат смещения изображения в определенном направлении. Следовательно, распределение поля может быть получено выбором множества точек объекта и определением каждой точки на искаженном изображении.

Использование данного способа позволяет измерить поле быстрее, чем в первом описанном методе. Предложенный способ не только уменьшает время исследования, но может также применяться для коррекции искаженных изображений.

Для того чтобы объяснить зависимость между нежелательными компонентами магнитного поля и искажением изображения, изображения протонной плотности получают точно из эхо-сигнала:

$$s(\tau, p) = -A' \iint c(x, y) \exp[i(\omega_0 + \gamma g_x x + \gamma \Delta g_x + \gamma \Delta B)\tau + i\gamma T_y (g_y y + \Delta g_y) p] dx dy$$

Набор отраженных сигналов становится двумерной функцией $s(\tau, p)$ (p – кратность изменения градиента G_y , для каждого измерения эхо-сигнала), которая представлена пространственным интегралом компонентов ЯМР-сигнала от каждого намагничивания. Частотная вариация зависит от координаты x и нежелательных компонентов ΔB и Δg_x , в то время как фазовая вариация зависит от координаты y и нежелательного компонента Δg_y . Смещение полученного изображения в направлении x зависит от ΔB и Δg_x , а в направлении y – от Δg_y .

Отношение между нежелательными компонентами магнитного поля и искажением изображения точно выводится из выражения для набора эхо-сигналов.

$$\Delta B = g_y (\Delta x'(x, y) - \Delta y(x, y)) \quad (3)$$

показывает, что нежелательные компоненты магнитных полей могут быть определены смещением изображения предмета.

Рассмотрим эксперимент, основанный на данном методе. Объект исследования – толстая акриловая пластина, в которой просверлены отверстия, заполненные водой (всего 145 отверстий диаметром 1.5 мм на расстоянии 6 мм друг от друга). Пластина

размещена так, что оси отверстий параллельны оси z . Для получения изображений используются две последовательности импульсов, меняющих роли используемых градиентов G_x и G_y .

Полученные в результате исследования изображения показывают искажения искомого объекта. По полученным искажениям можно рассчитать нежелательные нелинейные составляющие магнитных полей (рис 3–5).

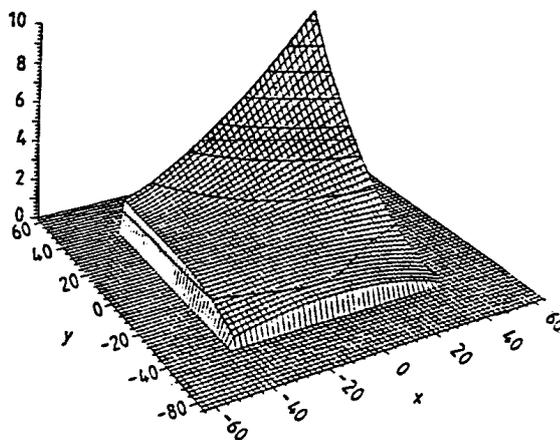


Рис. 3. Распределение статического поля

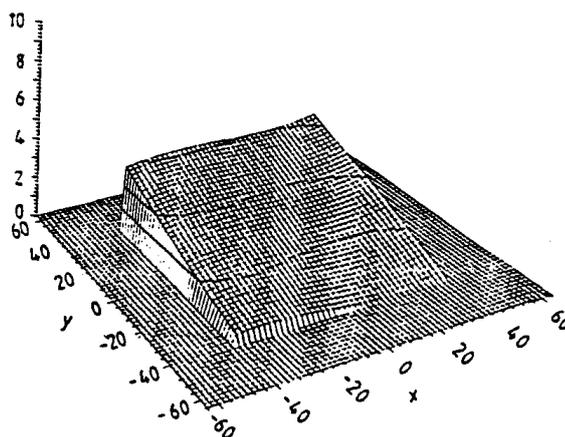


Рис. 4. Распределение нежелательного компонента градиентного поля G_x

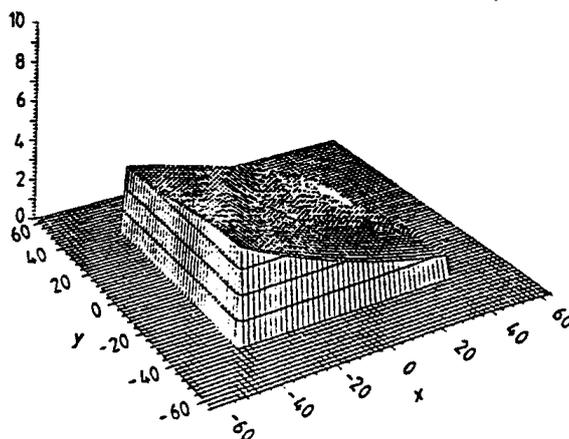


Рис. 5. Распределение нежелательного компонента градиентного поля G_y

Точность метода зависит от точности оценок смещения точечных объектов и распределения поля посредством метода наименьших площадей. Оценка точности смещения предмета зависит от размера точечного предмета и количества пикселей в полученном изображении.

Также для обеспечения точности предпочтительно использовать объекты исследования как можно меньших размеров и как можно большим числом отверстий, диаметром приблизительно 1 пиксель.

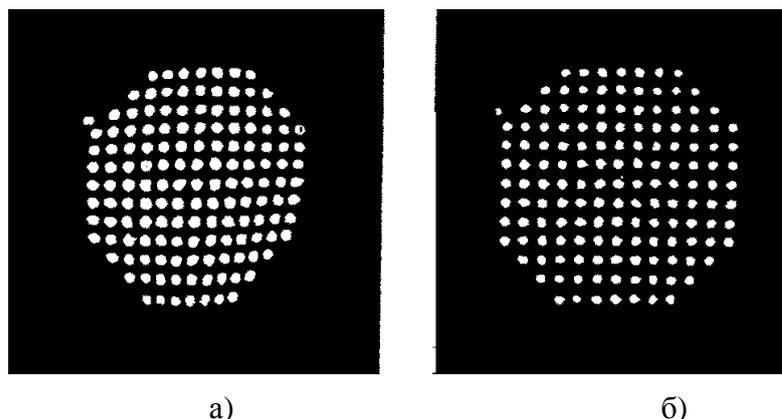


Рис. 6. Изображение экспериментального образца: а) искаженное изображение, б) исправленное изображение

Заключение

С измерением распределения поля связана задача коррекции искажений ЯМР-изображений, полученных в магнитных полях с недостаточной степенью однородности. Как правило, она решается следующим образом: с помощью фантома измеряется либо вычисляется распределение магнитного поля в рабочем объеме томографа, строится изображение исследуемого объекта, которое корректируется по известному распределению поля. Такой способ устранения искажений имеет существенные недостатки.

- при восстановлении изображения используется величина частной производной неоднородности поля по одной из координат. Ошибки ее определения приводят к падению отношения сигнал/шум восстановленного изображения по сравнению с исходным;
- увеличивается время сбора данных;
- измеренное распределение магнитного поля не соответствует реальному, если отдельные фрагменты объекта имеют различную магнитную восприимчивость.

Следовательно, необходим контроль за изменением поляризующего поля и его распределением во время получения ЯМР-изображения.

Литература

1. Лукьянович И.К., Савицкий А.А.. Фазовая коррекция сигналов магнитного резонанса в 2D Фурье-томографии. // Журнал прикладной спектроскопии. 1999. №2. С. 77–80.
2. A. A. Maudslej, H. E. Simon, S. K. Hilal. Magnetic field measurement by NMR imaging // J.Phys. E: Sci. Instrum. 1984. №17. P. 216–220.
3. K. Sekihara, S. Matsui, H. Kohno. A new method of measuring static field distribution using modified Fourier NMR imaging. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1985. №18. P. 224.
4. A. Kawanaka, M. Tskagi. Estimation of static magnetic field and gradient fields from NMR image. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1986. №19. P. 871–875.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСКООДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В КАТУШКАХ МР-ТОМОГРАФОВ

Н.Г. Рущенко

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.С. Сизиков

В работе дано дальнейшее развитие методики формирования высокооднородных магнитных полей в катушках МР-томографов. Эта методика основывается на разложении поля в ряд Тейлора на оси катушки и компенсации (обнулению) нескольких членов ряда путем введения дополнительных катушек.

Введение

Подход, рассматриваемый в работе, можно назвать *методом компенсирующих катушек (МКК)*. Он основывается на разложении поля в ряд Тейлора на оси катушки и компенсации (обнулению) нескольких членов ряда путем введения дополнительных катушек. Его первые формулировки восходят к работам [1, 2]. Затем этот метод получил развитие в монографии Монтгомери [3] и особенно в работах Галайдина и Замятина ([4] и др.). К этому направлению примыкают также работы Андерсона ([5], ряд по полиномам Лежандра и использование токовых витков в двух плоскостях), Луганского ([6], определение параметров витков путем минимизации функционала невязки поля), Тихонова, Рубашова и др. ([7], метод математического проектирования – типа метода Луганского, но с регуляризацией).

Однако, несмотря на наличие большого числа публикаций, метод компенсирующих катушек требует своего дальнейшего обоснования и развития, разработки алгоритмического и программного обеспечения, а также внедрения в возрождающееся производство отечественных томографов.

Пространственное магнитное поле соленоида.

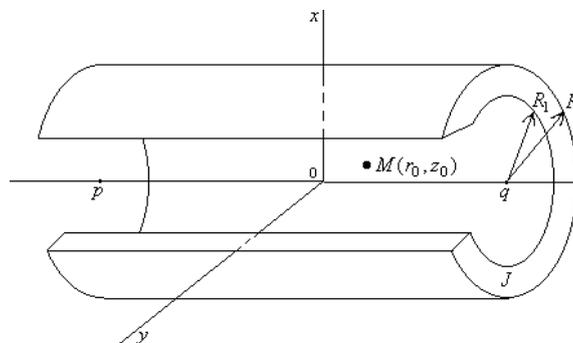


Рис. 1. Соленоид в виде толстой цилиндрической катушки

Рассмотрим *соленоид в виде толстой цилиндрической катушки* (рис. 1).

На рис. 1 R_1 – внутренний радиус, R_2 – внешний радиус, p и q – z -координаты соответственно левого и правого краев катушки, r – расстояние от оси симметрии. Введем в рассмотрение также угол φ и $L = q - p$ – длину катушки.

Продольная составляющая вектора магнитной индукции в некоторой точке $M(r_0, z_0)$ равна интегралу по виткам и толщине обмотки, а именно [4, 8],

$$B_z(r_0, z_0) = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \int_p^q \frac{r(r - r_0 \cos \varphi) d\varphi dr dz}{[r^2 + r_0^2 - 2r r_0 \cos \varphi + (z_0 - z)^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл м/А – магнитная постоянная, J – плотность тока в обмотке в А/м² или А/мм². Формула (1) вытекает из известной формулы для поля одного кругового витка.

Следуя идее работ Галайдина и Замятина, возьмем интегралы по r и по z в (1) аналитически, а интеграл по φ будем вычислять численно. В результате получим:

$$\begin{aligned}
 B_z(r_0, z_0) = C \left[\Delta z \int_0^\pi \ln \left| r - r_0 \cos \varphi + \sqrt{r^2 - 2rr_0 \cos \varphi + r_0^2 + \Delta z^2} \right| d\varphi + \right. \\
 + \frac{r_0}{2} \frac{\Delta z}{|\Delta z|} \int_0^\pi \cos \varphi \ln \frac{\sqrt{r^2 - 2rr_0 \cos \varphi + r_0^2 + \Delta z^2} - |\Delta z|}{\sqrt{r^2 - 2rr_0 \cos \varphi + r_0^2 + \Delta z^2} + |\Delta z|} d\varphi - \\
 \left. - r_0 \frac{\Delta z}{|\Delta z|} \int_0^\pi \sin \varphi \operatorname{arctg} \frac{|\Delta z| (r - r_0 \cos \varphi)}{r_0 \sin \varphi \sqrt{r^2 - 2rr_0 \cos \varphi + r_0^2 + \Delta z^2}} d\varphi \right] \Bigg|_{\substack{r = R_2 \\ r = R_1}}^{\substack{\Delta z = \Delta z_2 \\ \Delta z = \Delta z_1}},
 \end{aligned} \quad (2)$$

где $C = \frac{\mu_0 J}{2\pi}$, $\Delta z_1 = z_0 - q$, $\Delta z_2 = z_0 - p$.

Разработана программа *Vzr0z0* на языке MS Fortran 5 для вычисления $B_z(r_0, z_0)$ согласно (2), причем интегралы по φ вычисляются по квадратурной формуле трапеций с постоянным шагом $h \equiv \Delta\varphi = \pi/n$, где $n = 200$ – число шагов подобрано так, что позволяет вычислять интегралы при любых r , Δz , r_0 быстро и с точностью до ≈ 7 цифр. Если же вычисления выполнять с автоматическим выбором шага, то это увеличит время вычислений на порядок.

Типы магнитных систем

Рассмотрены магнитные системы (МС), состоящие из нескольких катушек (рис. 2–5). Рассмотрены также МС из четырех и шести катушек.

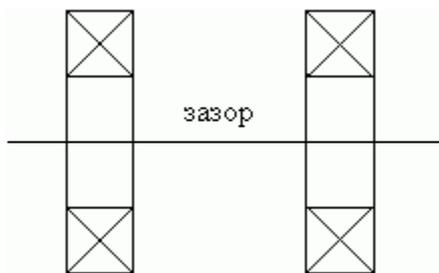


Рис. 2. Магнитная система из двух катушек (система Гельмгольца)

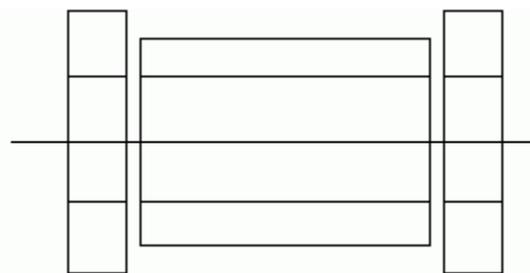


Рис. 3. Магнитная система из трех катушек – основной (в центре) и двух компенсирующих (по краям)

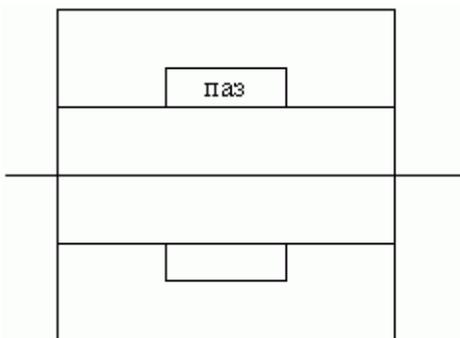


Рис. 4. Магнитная система с внутренним пазом

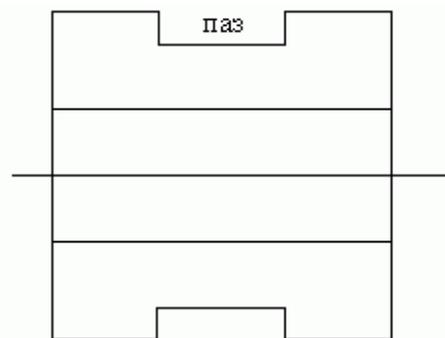


Рис. 5. Магнитная система с внешним пазом

Идея метода компенсирующих катушек

Рассмотрим одну катушку (рис. 1) при $q = -p = z_c$, где $z_c = L/2$ – полудлина соленоида. Введем обозначения:

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1}, \quad \beta = \frac{z_c}{R_1}, \quad \zeta = \frac{z_0}{R_1}, \quad \kappa = \mu_0 J R_1. \quad (3)$$

Тогда поле на оси соленоида (продольная составляющая вектора магнитной индукции) можно записать в виде:

$$B_z \equiv B_z(\zeta, \alpha, \beta) = \frac{\kappa}{2} \left[(\zeta + \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\zeta + \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\zeta + \beta)^2}} - (\zeta - \beta) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\zeta - \beta)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\zeta - \beta)^2}} \right], \quad (4)$$

а поле в центре соленоида

$$B_z(0, \alpha, \beta) \equiv B_0(\alpha, \beta) = \kappa \beta \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}. \quad (5)$$

Представим $B_z(\zeta, \alpha, \beta)$ в виде ряда Тейлора (точнее, ряда Маклорена) по степеням ζ (нормированному расстоянию от центра соленоида вдоль его оси):

$$B_z(\zeta, \alpha, \beta) = B_0(\alpha, \beta) + B_2(\alpha, \beta)\zeta^2 + \dots + B_n(\alpha, \beta)\zeta^n + \dots, \quad (6)$$

где

$$B_n(\alpha, \beta) \equiv B_n = \frac{1}{n!} \left. \frac{\partial^n B_z(\zeta, \alpha, \beta)}{\partial \zeta^n} \right|_{\zeta=0}, \quad (7)$$

причем разложение ведется только по четным степеням ζ в силу симметрии задачи (n – четное число).

Однако вычисление по формуле (7) затруднительно. Нами доказано, что

$$B_n(\alpha, \beta) \equiv B_n = \frac{1}{n!} \frac{\partial^n B_z(0, \alpha, \beta)}{\partial \beta^n} \equiv \frac{1}{n!} \frac{\partial^n B_0(\alpha, \beta)}{\partial \beta^n}. \quad (8)$$

Вычисление коэффициентов B_n по формуле (8) проще, чем по формуле (7).

Теперь используем МС в виде суперпозиции катушек (см. рис. 2–5). При этом из поля основной (наружной) катушки (см., например, рис. 2) будем вычитать поле дополнительной (внутренней, компенсирующей) катушки таким образом, чтобы скомпенсировать один или более членов B_2, \dots ряда (6). Математически задача сведется к определению таких параметров α и β основной и компенсирующей катушек, при которых после вычитания их полей обнулятся несколько первых коэффициентов B_2, \dots ряда (6). В результате будет рассчитана МС некоторого порядка N , который равен номеру первого некомпенсированного члена ряда (6).

Технически магнитная система, например, на рис. 2 не будет содержать основную и внутреннюю катушку (это слишком громоздко), а будет состоять из двух коротких катушек. Математически же такая МС будет рассчитываться в виде основной катушки и внутренней катушки с противоположными направлениями их полей (это упрощает расчеты).

Общая методика расчета параметров катушек

Чтобы рассчитать параметры α и β катушек, нужно решить так называемую *синтезирующую систему из $(N-2)/2$ нелинейных уравнений*:

$$B_{ns} = 0, \quad n = 2, 4, \dots, N-2, \quad (9)$$

где B_{ns} – коэффициент B_n суммарного поля, создаваемого всей магнитной системой.

Формулы для коэффициентов B_2, B_4, B_6 и B_8 для одного соленоида получены в работах [3, 4]. Для эффективного решения систем уравнений (9) при различных N нами разработана методика, сочетающая графический способ для оценки начального приближения решения и получение более точного решения методами вилки и/или Ньютона (ср. [9]).

Магнитные системы 10-го порядка

Это наиболее эффективные МС. Они пока что рассмотрены лишь в работах Галайдина и Замятина. Для их расчета должна быть решена система четырех нелинейных уравнений:

$$B_{ns} = 0, \quad n = 2, 4, 6, 8. \quad (10)$$

Рассмотрим МС 10-го порядка из трех катушек (см. рис. 3). Синтезирующая система четырех нелинейных уравнений имеет вид:

$$B_n(\alpha_1, \beta_2) + B_n(\alpha_2, \beta_4) - B_n(\alpha_2, \beta_3) = 0, \quad n = 2, 4, 6, 8. \quad (11)$$

В ней пять неизвестных: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_2, \beta_3, \beta_4$, т.е. это недостаточная система (число уравнений меньше числа неизвестных), имеющая в принципе множество решений. Однако если один из параметров, например, α_1 фиксировать, то это будет система четырех уравнений относительно четырех неизвестных.

Решение системы (11) осуществляем следующим образом. Задаем ряд значений α_1 и при каждом α_1 находим $\alpha_2, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ путем решения системы четырех уравнений (11) методом Ньютона, причем для обеспечения сходимости итераций в методе Ньютона в качестве начальных приближений $\alpha_2, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ берем их значения при предыдущем α_1 .

Разработан пакет программ на языке MS Fortran 5 для расчета МС 4-го, 6-го, 8-го и 10-го порядков с построением графиков в системе MathCAD2000/2001.

На рис. 6 представлен результат расчета МС 10-го порядка из трех катушек в виде так называемых расширенных диаграмм, где B_{0s} – суммарное поле в центре МС, равное

$$B_{0s} = B_0(\alpha_1, \beta_2) + B_0(\alpha_2, \beta_4) - B_0(\alpha_2, \beta_3), \quad (12)$$

V – объем МС, $G = B_{0s}/V$ – коэффициент эффективности (можно положить $G = B_{0s}/P$, где P – потребляемая мощность), z_6 – значение z на оси МС, при котором $\delta B_{\text{отн}} = 10^{-6}$, причем

$$\delta B_{\text{отн}} = \frac{|B_z(r_0, z_0) - B_z(0, 0)|}{B_z(0, 0)} \quad (13)$$

– относительная неоднородность поля. Использование расширенных диаграмм позволяет удобно выбирать подходящие варианты сначала графически, а затем для них делать высокоточный расчет параметров катушек путем решения системы уравнений (11), используя «графические значения» параметров в качестве начальных приближений, что гарантирует сходимость метода Ньютона.

На рис. 7 приведены изолинии $\lg \delta B_{\text{отн}}$ для одного из вариантов.

О влиянии погрешностей параметров катушек на картину поля

Погрешности технического изготовления катушек влияют на картину изолиний $\lg \delta B_{\text{отн}}$. На рис. 8 приведены изолинии $\lg \delta B_{\text{отн}}$ для МС, изображенной на рис. 7, однако со значениями $\alpha_2, \beta_2, \beta_3, \beta_4$, округленными до 5 цифр – это соответствует погрешности параметров катушек в несколько десятых долей мм, что технически вполне выполнимо.

Сравнение рис. 7 и 8 показывает, что погрешности параметров катушек в несколько десятых долей мм приводят к сокращению примерно вдвое области $\delta B_{отн}=10^{-6}$, но практически не изменяют область $\delta B_{отн}=10^{-5}$.

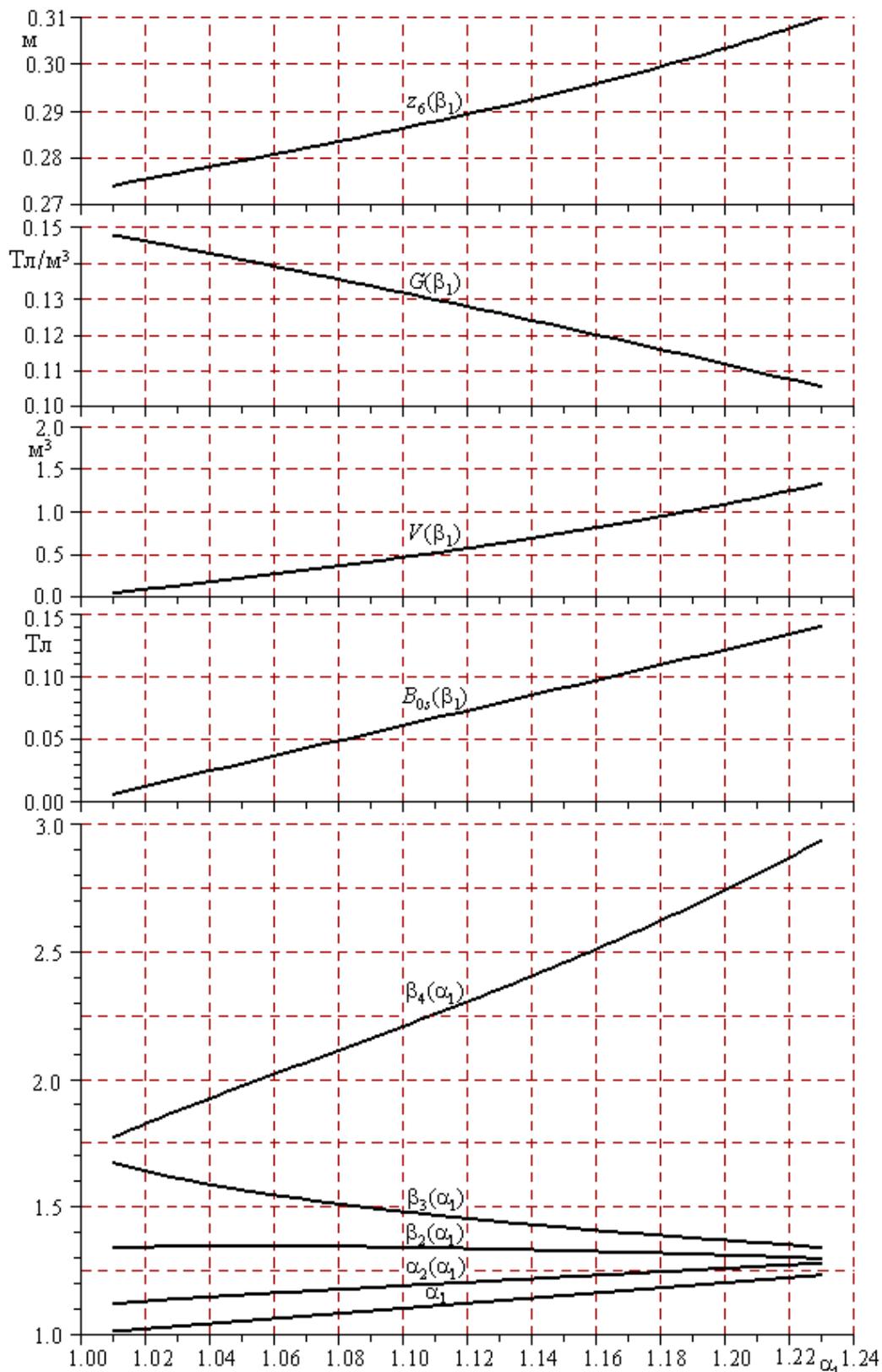


Рис. 6. Результат расчета МС 10-го порядка из трех катушек в виде расширенных диаграмм (при $J = 1 \text{ A/мм}^2$, $R_1 = 0.5 \text{ м}$)

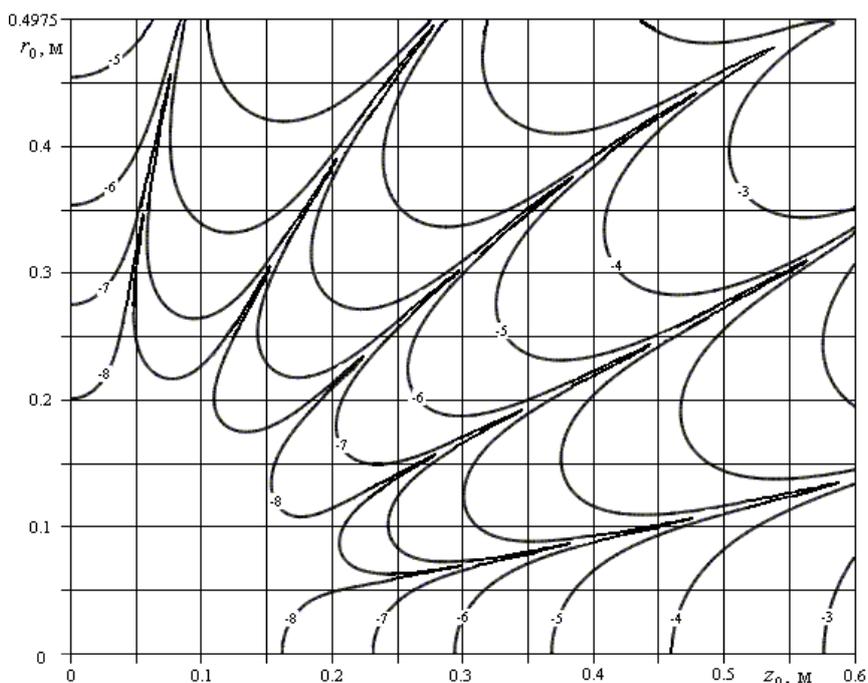


Рис. 7. Изолинии $\lg \delta B_{\text{отн}}$ для МС 10-го порядка из трех катушек ($\alpha_1 = 1.15$, $\alpha_2 = 1.223995$, $\beta_2 = 1.327725$, $\beta_3 = 1.418084$, $\beta_4 = 2.451198$, $J = 1 \text{ А/мм}^2$, $R_1 = 0.5 \text{ м}$)



Рис. 8. Изолинии $\lg \delta B_{\text{отн}}$ для МС 10-го порядка из трех катушек ($\alpha_1 = 1.15$, $\alpha_2 = 1.2240$, $\beta_2 = 1.3277$, $\beta_3 = 1.4181$, $\beta_4 = 2.4512$, $J = 1 \text{ А/мм}^2$, $R_1 = 0.5 \text{ м}$)

На рис. 9 представлена также совокупная картина, а именно, приведены катушки МС и изолинии $\lg \delta B_{\text{отн}}$ для того же варианта, что и на рис. 7.

Сопоставление метода компенсирующих катушек с другими методами

Выполнено сравнение метода компенсирующих катушек с методом витков Луганского, с методом проектирования Тихонова–Рубашова–Арсенина и с методом круговых шимм Андерсона. Это сравнение показало, что метод компенсирующих катушек дает результаты, сопоставимые с методами Луганского и Тихонова–Рубашова–Арсенина, но дает более однородное поле, чем метод Андерсона.

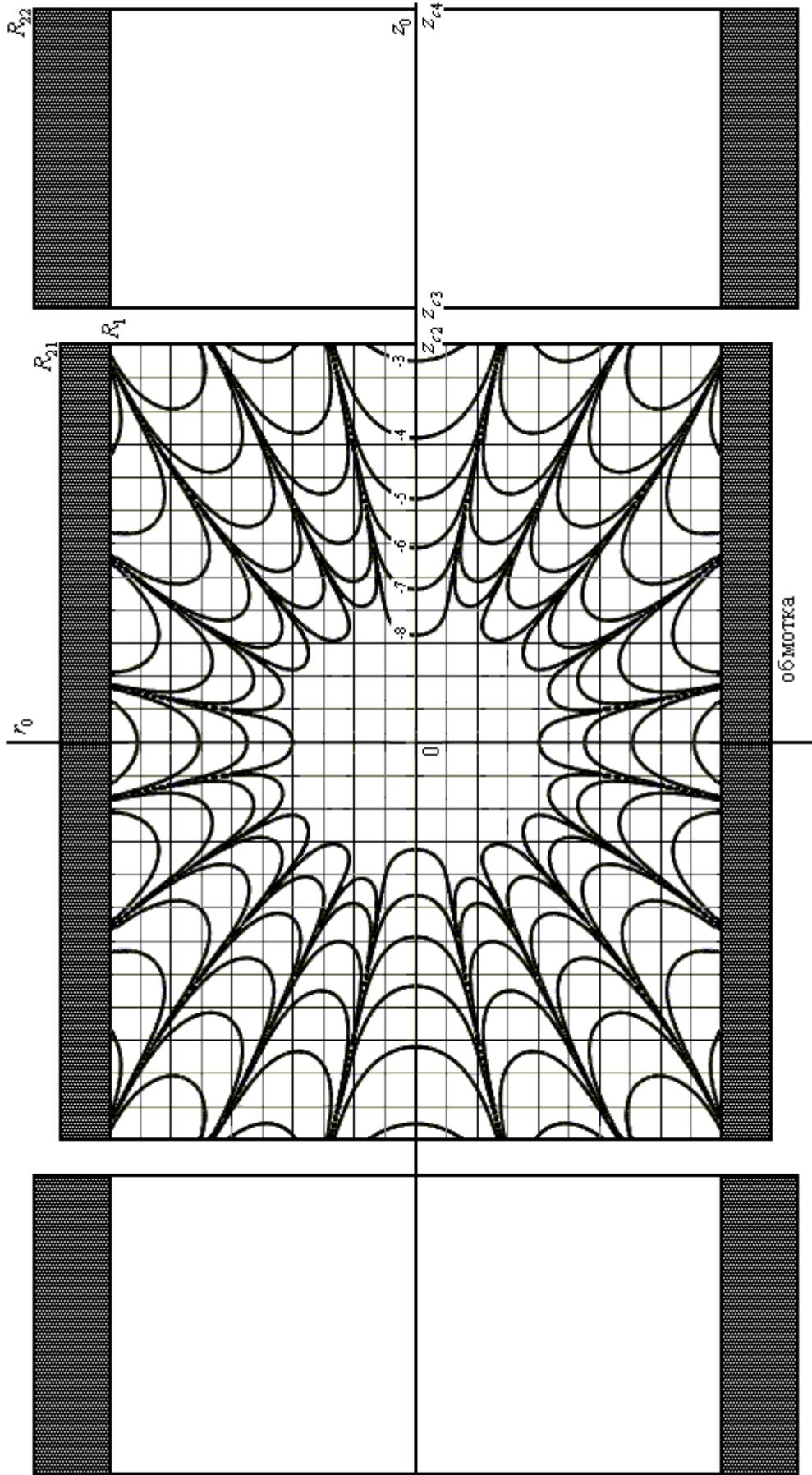


Рис. 9. Совокупная картина МС 10-го порядка из трех катушек
 ($\alpha_1=1.15$, $\alpha_2=1.223995$, $\beta_2=1.327725$, $\beta_3=1.418084$, $\beta_4=2.451198$, $J=1A/mm^2$, $R_1=0.5m$)

Литература

1. Sauter A., Sauter F. Die Erzeugung von moglichst homogenen Magnetfeldern durch Stromsysteme // Z. Phys., 1944, b. 122, s. 120–136.
2. Garrett M.W. Axially symmetric systems for generating and measuring magnetic fields // J. Appl. Phys., 1951, v. 22, N 9, pp. 1091–1107.
3. Монтгомери Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. – М.: Мир, 1971.
4. Галайдин П.А., Замятин А.И., Иванов В.А. Расчет и проектирование электромагнитных систем магниторезонансных томографов. Уч. пособие. – СПб: Изд-во ИТМО, 1998.
5. Андерсон. Применение токовых шимм для коррекции магнитных полей // Приборы для научных исследований, 1961, № 3, с. 3–12.
6. Lugansky L.B. Optimal coils for producing uniform magnetic fields // J. Phys. E: Sci. Instrum., 1987, vol. 20, pp. 277–285.
7. Тихонов А.Н., Рубашов И.Б., Арсенин В.Я. и др. О математическом проектировании конструкции ЯМР-томографа. – М.: Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР, 1987.
8. Марусина М.Я., Рущенко Н.Г., Сизиков В.С. Распределение магнитных полей в катушках магниторезонансных томографов // Изв. вузов. Приборостроение, 2003, т. 46, № 6, с. 32–36.
9. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М.: Наука, 1987.

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ТОЧНЫХ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

А.Н. Серёгин

Научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина

Приводится развитие метода создания неискаженных магнитно-резонансных изображений при высоких уровнях неоднородности статического поля. Выводится математическая модель изображения, полученного посредством МР-томографии. Эта модель преобразуется к одномерному виду, что дает возможность, используя математические методы, преобразовать изображение к неискаженной форме. Для наглядности приводится программа, написанная в среде Matlab, строящая модель с искажением и модель, исправленную данным методом.

Введение

Процедура МР-томографии – построение на регистрирующем устройстве МР-изображения. Состояние каждого элемента изображения определяется амплитудой сигнала МР от соответствующего элемента объема изучаемого объекта. Эта амплитуда пропорциональна числу резонирующих ядер, поэтому получаемое таким способом изображение характеризует, прежде всего, пространственное распределение ядерных спинов – так называемую спиновую плотность $\rho(x,y,z)$.

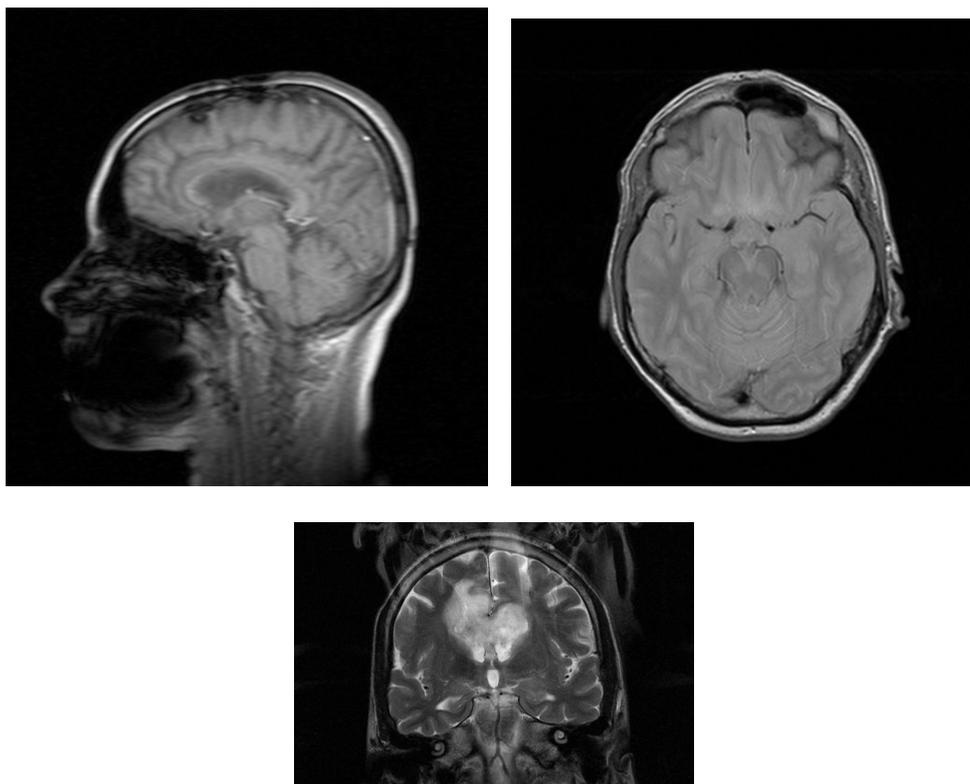


Рис. 1. Примеры снимков томографа

МР-томография предполагает однородность магнитного поля B_0 . Неоднородное поле B_0 будет вносить искажения в изображение объекта. Искажения могут быть пространственными, интенсивными или и теми, и другими. Интенсивностные искажения являются результатом локальной неоднородности основного магнитного поля. Пространственное искажение является результатом неоднородности градиентов поля, которые должны быть постоянными. Эти искажения заставляют спины ядер резонировать

с частотами Лармора, отличными от предписанных отображающей последовательностью. Именно поэтому рядом ученых были предприняты попытки создания способов обработки искаженных изображений [1]. В данной работе проведено развитие метода, предложенного в статье [1]. На рис. 1 приведены примеры искажений. На томограммах головного мозга видны затемнения, которые обусловлены наличием неоднородностей магнитных полей.

В предложенной работе описывается методика создания неискаженных магнитно-резонансных изображений при высоких уровнях неоднородности статического поля, вызываемой различными причинами. Методика требует сбора данных для двух изображений одного объекта с измененными градиентами. Основываясь на знании этих градиентов, а также применив ряд вычислений с использованием некоторых инвариантных характеристик искажений, методика позволяет создать исправленное изображение из двух приобретенных. При этом не применяются ни фантомное отображение, ни операционные взаимодействия. Естественно, эта методика не является единственной в своем роде, существует немало способов по борьбе с искажениями, но все они имеют свои минусы [2–4].

1. Математическая модель томограммы

Рассмотрим обычную последовательность применительно к протонам. В этой последовательности G_x – считывающий градиент, G_y – фазокодирующий градиент, G_z – градиент выбора среза. В нашем анализе мы рассматриваем форму сигнала после удаления его высокочастотной составляющей γB_0 . Для упрощения анализа мы опустим зависимость сигнала во время считывания от затухания T_1 и T_2 (T_1 – время спин-спиновой релаксации; T_2 – время спин-решеточной релаксации) и конечную толщину слоя. Определим функцию плотности $\rho(x, y, z)$. Значение этой функции плотности в точке (x, y, z) зависит от плотности протонов, T_1 , T_2 , и уровня РЧ смещения в этом положении.

Сначала мы рассмотрим сигнал спада свободной индукции после 180° импульса. Пусть t_x и t_y – продолжительность G_x и G_y соответственно. При отсутствии неоднородности статического поля 90° импульс выделяет слой $z_1 = (\omega_1 - \omega_0) \gamma G_z$, где ω_1 – центральная угловая частота избирательного импульса, ω_0 – номинальная угловая частота в отсутствие градиентов, т.е. $\omega_0 = \gamma B_0$, где B_0 – статическое поле, γ – гиромагнитное отношение протона. Сигнал на протяжении интервала времени $TE - t_x \leq t \leq TE + t_x$, при отсутствии неоднородности принимает вид:

$$s(t, G_y, z_1) = -A \iiint \rho(x, y, z) \delta(z - z_1) e^{j\gamma[xG_x(t-TE) - yG_y t]} dx dy dz, \quad (1)$$

где A – константа пропорциональности, определяемая геометрией и чувствительностью РЧ катушек. [1] Мы использовали δ -функцию для моделирования выбора слоя. (Именно посредством использования этой функции мы игнорируем конечную толщину слоя). Теперь мы рассмотрим эффект неоднородности поля. Когда локальное магнитное поле отклоняется от его описанного значения на величину $B_c(x, y, z)$, модель выбора слоя $\delta(z - z_1)$ должна быть заменена на $\delta[z'(x, y, z) - z_1]$, где $z'(x, y, z) = z + B_c(x, y, z) / G_z$. Кроме того, нарушение в поле добавляет побочную составляющую $\gamma B_c(x, y, z) t$ к фазе протонов по x, y, z . Таким образом, при наличии $B_c(x, y, z)$ сигнал становится равным

$$s(t, G_y, z_1) = -A \iiint \rho(x, y, z) \delta(z'(x, y, z) - z_1) e^{j\gamma[B_c(x, y, z) + xG_x(t-TE) - yG_y t]} dx dy dz. \quad (2)$$

Сигнал отбирается во время этого интервала времени, и выполняется Фурье-преобразование изображения относительно двух переменных, $\tau \equiv t - TE$, $k \equiv -G_y t$. Выражая сигнал как функцию этих двух переменных, получаем

$$s(\tau, k, z_1) = -A \iiint \rho(x, y, z) \delta(z'(x, y, z) - z_1) e^{j\gamma[B_c(x, y, z) + xG_x|\tau + ky_1]} dx dy dz. \quad (3)$$

Чтобы увидеть соотношения между результирующим искаженным изображением и изображением, которое было бы результирующим, если бы не было неоднородности, полезно произвести замену интеграционных переменных, как показано ниже:

$$x_1 \equiv x + \frac{B_c(x, y, z)}{G_x}, \quad (4)$$

$$y_1 \equiv y, \quad (5)$$

$$z' \equiv z + \frac{B_c(x, y, z)}{G_z}. \quad (6)$$

После подстановки получаем:

$$s(\tau, k, z_1) = -A \iiint \rho[x(x_1, y_1, z'), y(x_1, y_1, z'), z(x_1, y_1, z')] \delta(z' - z_1) e^{j\gamma[G_x x_1 + ky_1]} [J(x_1, y_1, z')]^{-1} dx_1 dy_1 dz',$$

где $J(x_1, y_1, z')$ – Якобиан преобразования между (x_1, y_1, z') и (x, y, z) . Считаем, что преобразование является непосредственным, и поэтому Якобиан конечен и не равен нулю. Проинтегрировав по z' , получим

$$s(\tau, k, z_1) = -A \iint \rho[x(x_1, y_1, z_1), y(x_1, y_1, z_1), z(x_1, y_1, z_1)] e^{j\gamma[G_x x_1 + ky_1]} [J(x_1, y_1, z_1)]^{-1} dx_1 dy_1, \quad (7)$$

где

$$z_1 \equiv z + \frac{B_c(x, y, z)}{G_z}. \quad (8)$$

Фурье-преобразование $s(\tau, k, z_1)$ по τ и k создает искаженное изображение,

$$i_1(x_1, y_1, z_1) \equiv F\{s(\tau, k, z_1)\} = -A\rho(x, y, z) / J(x_1, y_1, z_1) = i(x, y, z) / J(x_1, y_1, z_1), \quad (9)$$

где $i(x, y, z)$ – точное изображение, которое было бы получено, если бы не было неоднородности магнитного поля. Здесь есть две составляющие искажения изображения: i_1 – геометрическое искажение, даваемое уравнениями (4) и (8), и искажение интенсивности, проявляющееся при делении на якобиан в (9). Уравнения (4) и (8) показывают, что в точках, где $B_c \neq 0$, изображение смещено из x, y, z в x_1, y_1, z_1 . Отношения между x, y и z составляющими постоянны по всему изображению. В частности, $y_1 - y = 0$, а $z_1 - z = (G_x/G_z) \times (x_1 - x)$. Из-за этих постоянных отношений якобиан имеет простую форму:

$$J(x_1, y_1, z_1) = 1 + \frac{1}{G_x} \frac{\partial B_c(x, y, z)}{\partial x} + \frac{1}{G_z} \frac{\partial B_c(x, y, z)}{\partial z}. \quad (10)$$

Пока мы рассматривали все изображения как объемные. Эти изображения обычно представляют собой набор двумерных послойных изображений. Однако возможно приблизительно исправить искажение по x в слое изображения путем накопления и комбинирования только двух отдельных слоев. Из (8) видно, что смещение по z идентично на изображениях, которые мы обозначим как $i_1(x_1, y, z_1)$ и $i_2(x_2, y, z_1)$. Поскольку y и z_1 одни и те же для каждого изображения, можно для удобства опустить зависимости от y и z_1 в уравнениях. Эти два изображения получены от того же среза. Форма этого среза дается уравнением (8). Форма среза останется неизменной, а искажения внутри слоя будут исправлены нашим методом. Ниже будет показано, как степень аппроксимации влияет на размеры градиентов и неоднородность.

Искажения внутри слоя ограничиваются приведенными в уравнении (4), которое с подавленными зависимостями по y и z_1 имеет форму

$$x_1 = x + \frac{B_c(x)}{G_x}. \quad (11)$$

G_z принято достаточно большим, чтобы поддерживать следующее неравенство во всех точках среза:

$$\frac{1}{G_z} \frac{\partial B_c}{\partial z} \ll 1. \quad (12)$$

Выражение для Якобиана в уравнении (10) тогда принимает вид

$$J(x_1) = 1 + \frac{1}{G_x} \frac{\partial B_c(x)}{\partial x} = \frac{dx_1}{dx}. \quad (13)$$

Таким образом, можно рассматривать пару двумерных изображений как набор независимых пар одномерных изображений, по одному для каждого значения y . Каждая такая пара одномерных изображений может быть обработана независимо для создания исправленного одномерного изображения. Результирующий набор одномерных изображений создает единственное исправленное двумерное изображение. Другими словами, задача создания исправленного двумерного изображения уменьшается до задачи создания исправленных одномерных изображений.

Получив изображение первого слоя, обратим внимание на одномерное изображение по y как $i_1(x_1)$. Мы получили второй слой со считывающими градиентами, измененными на G_x/α , где α – некоторый выбранный номер. Обозначим второе одномерное изображение по y как $i_2(x_2)$. Наша задача – определить исправленное одномерное изображение $i(x)$ по y , когда даны эти два искаженных изображения.

Рис. 2 иллюстрирует данный подход. Небольшое волнение $B_c(x)$ однородного поля B_0 показано на рис 2а. Когда включается линейный градиент G_x , общее поле в положении x становится равным $(B_0 + B_c(x_0) + x_0 G_x)$. Как продемонстрировано на рис. 2б, изохромата спина в x_0 будет обладать частотой прецессии, пропорциональной $(B_0 + B_c(x_0) + x_0 G_x)$ из-за присутствия волнения, вместо его описанного значения $B_0 + x_0 G_x$. Замечая что $(B_0 + B_c(x_0) + x_0 G_x)$ равно по амплитуде $(B_0 + x_1 G_x)$, после реконструкции изображения без знания $B_c(x)$ можно увидеть, что изохромата спина в x_0 возникнет на изображении, как если бы это было в x_1 . Как показывает рис. 2с, использование различных градиентов вызывает спиновую изохромату в x_0 , возникающую, как если бы это было в x_2 . Смещение $\Delta x_1 \equiv x_1 - x$ и $\Delta x_2 \equiv x_2 - x$ зависит от G_x и α . Для частного случая $\alpha = -1$, как в этом примере, $\Delta x_2 = -\Delta x_1$. Таким образом, x равноудален от x_1 и x_2 . Этот рисунок иллюстрирует основу метода: искажение может управляться настройкой градиента.

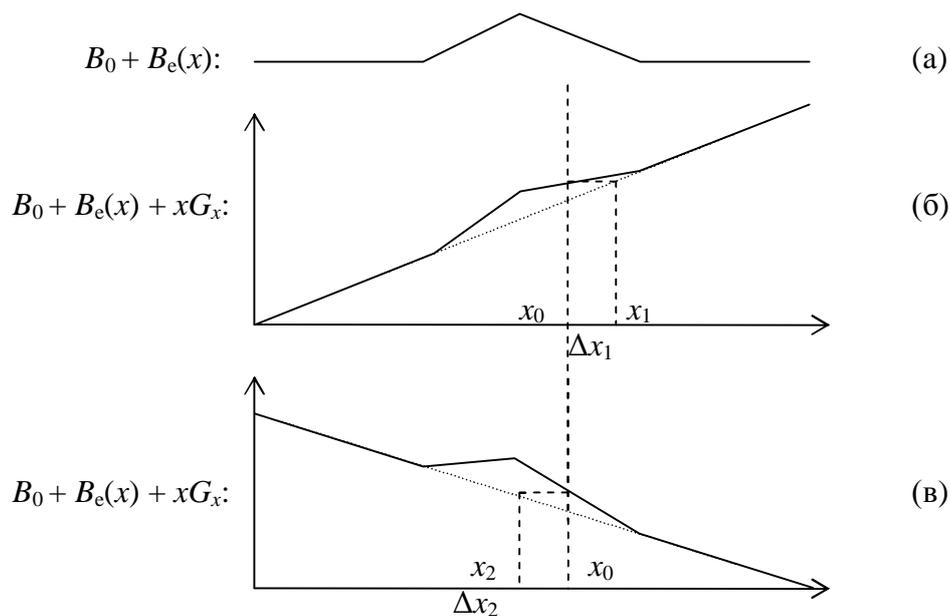


Рис. 2. Градиенты и искажения

Можно получить уравнение, связывающее положения во втором изображении $i_2(x_2)$ с положениями в неискаженном изображении путем замены x_2 на x_1 и G_x/α на G_x в уравнении (6):

$$x_2 = x + \alpha B_c(x) / G_x. \quad (14)$$

Решая (11) и (14) относительно x , найдем выражение

$$x = (\alpha x_1 - x_2) / (\alpha - 1), \quad (15)$$

которое для частного случая $\alpha = -1$ показанного на рис. 1, сокращается до $x = (x_1 + x_2) / 2$. В случае точечных объектов значения $i_1(x_1)$ и $i_2(x_2)$ можно определить в интерактивном режиме, как в фантоме, применяемом Yamamoto [2].

В более общих случаях, когда объекты являются протяженными, эти соответствия автоматически определяются без использования фантомов следующим образом. Отметим, что для одномерного случая формулу (9) можно записать, используя (13), как

$$i_1(x_1) = i(x) / \frac{dx_1}{dx}. \quad (16)$$

Следовательно, два искаженных изображения соотносятся с неискаженными изображениями как

$$i_1(x_1) \frac{dx_1}{dx} = i(x), \quad i_2(x_2) \frac{dx_2}{dx} = i(x). \quad (17)$$

Применяя правило соединения дифференциалов для этих двух уравнений, найдем, что

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{i_1(x_1)}{i_2(x_2)}. \quad (18)$$

2. Вывод формулы для создания неискаженного изображения

Построим систему координат $i(dx)$, выделив на оси абсцисс dx_2 и dx_1 , положение которых напрямую зависит от dx . Используя (17) и (18), построим на координатной плоскости точки $i_1(x_1)$, $i_2(x_2)$. Представив (13) для второго изображения, получим:

$$J(x_2) = 1 + \frac{\alpha}{G_x} \frac{\partial B_c(x)}{\partial x} = \frac{dx_2}{dx} \quad (19)$$

Для частного случая, когда $\alpha = -1$, из (13) и (19) можно легко заключить, что dx находится ровно посередине между dx_2 и dx_1 , для общего случая $dx - dx_2 = -\alpha(dx_1 - dx)$. Другими словами, при изменении α меняется лишь разность $dx - dx_2$. Так как при вычислении $i(x)$ используются лишь отношения дифференциалов, можно ввести условные координаты по оси абсцисс, взяв при этом центр координат на расстоянии от dx_2 , равном $dx_1 - dx$. Пусть длина этого отрезка будет равна 1 условной единице (у.е.). (рис. 3)

Теперь можно легко найти положение точки $i(x)$, используя любую из формул (17). Завершающим шагом данного метода вычисления неискаженных координат будет вывод формулы без использования у.е. Для начала найдем выражение для определения положения dx . В общем случае это будет выглядеть следующим образом:

$$dx = \frac{dx_2 - \alpha dx_1}{1 - \alpha}. \quad (20)$$

Подставляем это выражение в формулу (17), получим

$$i(x) = \frac{i_1(x_1) \cdot dx_1 \cdot (1 - \alpha)}{-\alpha dx_1 + dx_2}. \quad (21)$$

Используя график, можем заменить dx_2 на $i_1(x_1)$, а dx_1 на $i_2(x_2)$, так как они пропорциональны. В итоге получим:

$$i(x) = \frac{i_1(x_1) \cdot i_2(x_2) \cdot (1 - \alpha)}{-\alpha i_2(x_2) + i_1(x_1)}. \quad (22)$$

Формула верна как в случае положительных, так и в случае отрицательных α .

Обращаем внимание, что любая ошибка в определении x_2 для данного x_1 войдет в ошибку при расчете интенсивности изображения. Если x_2 ошибочно сдвинут из-за ошибок в решении (18), вызванных численными аппроксимациями, расчет $i(x)$ будет основан на интенсивностях, возникающих от двух различных анатомических положений. Результатом будет размывание $i(x)$. При решении рассмотренным способом любые ошибки исключены, благодаря использованию графического, а не алгебраического способа.

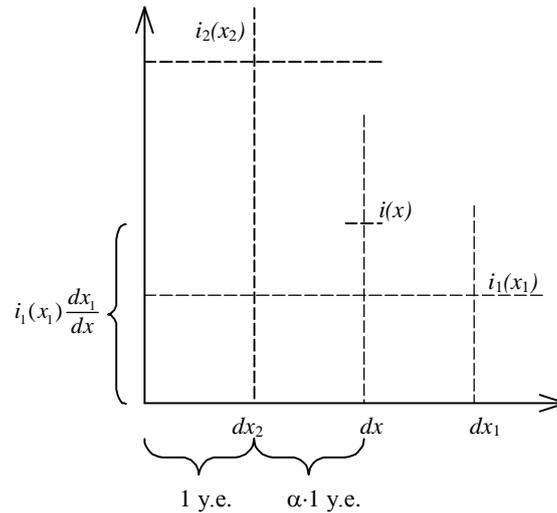


Рис. 3. Расположение искаженных и неискаженных координат и изображений

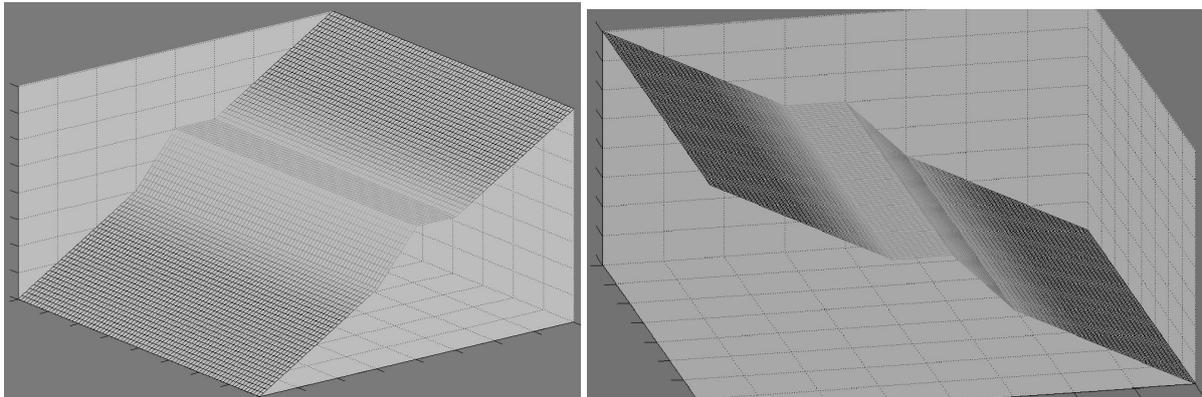


Рис. 4. Искаженные интенсивности, построенные с разными градиентами

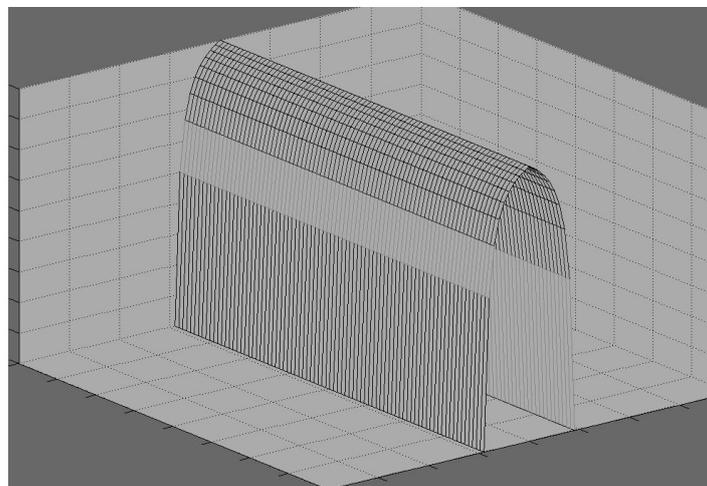


Рис. 5. Неискаженная интенсивность

Для рассмотренной аппроксимации получено исправленное 1-мерное изображение по y . Для создания приближенно восстановленного 2-мерного изображения, можно повторить этот вывод для всех значений y и собрать результирующий набор 1-мерных изображений в 2-мерное изображение $i(x, y, z_1)$, после чего приступить к созданию точного трехмерного изображения. Рис. 4 и 5, полученные в среде Matlab при использовании частного случая формулы (22), подтверждают ее правильность.

На рис 4 и 5 показаны искаженные интенсивности, полученные при различных градиентах. Они были использованы при построении изображения (рис.6) при помощи формулы (22) при заданном $\alpha = -1$. Ниже приведен текст программы, написанной в среде matlab:

```
h=.2;x=-8:h:8;[X]=meshgrid(x);
f1=2-abs(X);g1=f1;g1(f1<0)=0;
a=X+g1;b=-X+g1;
mesh(x,x,a),pause;
mesh(x,x,b),pause;
k=a+b;
ut=a.*b.*2;
u=k.\ut;
mesh(x,x,u)
```

Заключение

В работе улучшен метод создания неискаженных магнитно-резонансных изображений. Метод значительно упрощен, за счет использования элементов графического построения при решении. В качестве доказательств правильности решения по приведенным и выведенным формулам построены графики.

Литература

1. Chang H., Fitzpatrick J.M.. A technique for accurate magnetic resonance imaging in the presence of field inhomogeneties // IEEE Transactions on Medical Imaging. 1995. №152
2. Yamamoto E., Kohno H., Correction of distortions caused by field errors in MR imaging // Proc. Soc. Magnetic Resonance in Medicine, NY, 1987
3. Schmitt. F., Correction of Geometrical Distortions in MR-images // Proc. CAR. 1985
4. Bendel P., Echo Projection Imaging – a method to obtain NMR images undistorted by magnetic field inhomogeneties // IEEE Transactions on Medical Imaging. 1985. Vol. MI-4.

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

Е.Н. Хлистунова

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.Л. Ткалич

В статье описывается программа, позволяющая более простым и удобным способом проводить анализ изображений, полученных с помощью ПЭТ. Приведены некоторые альтернативные методы решения данной проблемы.

Введение

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), основы которой были заложены в середине семидесятых годов, в настоящее время является мощнейшим и уникальным инструментом изучения здорового и больного мозга человека. Велики ее возможности в кардиологии и онкологии. Как метод позитронная томография "выросла" из радионуклидной диагностики. Она представляет собой неинвазивный прижизненный метод определения концентраций соединений, меченных позитронными эмиттерами, в заданных исследователем биологических тканях. Поскольку среди позитронных эмиттеров имеются изотопы основных элементов-органогенов (углерода, азота и кислорода), имеется принципиальная возможность использовать в качестве радиотрейсеров самые разнообразные биологически важные соединения, как содержащиеся в нормально функционирующем живом организме, так и ксенобиотики.

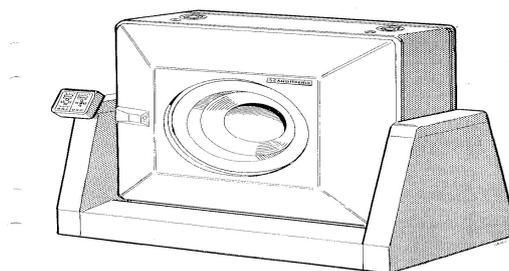


Рис. 1 ПЭТ – камера

Поэтому ПЭТ может быть использована для измерения региональных биохимических и физиологических параметров процессов, происходящих при участии химических соединений, меченных позитронными эмиттерами. В частности при использовании метода ПЭТ при исследованиях живого мозга появляется возможность количественной оценки важнейших функциональных физиологических параметров (церебрального кровотока, церебрального объема крови и др.), характеристик различных метаболических процессов, а также статуса рецепторов, ферментных систем и т. д. Этот метод открыл клиницистам новые возможности, позволив выявлять ранее неизвестные отклонения от нормы в функционировании систем головного мозга, что дало возможность связывать и количественно оценивать наблюдаемые патологические отклонения с дисфункцией биохимических и/или физиологических параметров. При исследованиях головного мозга использование ПЭТ позволяет легче решать и традиционные задачи радионуклидной диагностики: определение контуров новообразований, дифференциальная диагностика и т.д.

Уникальная специфика ПЭТ заключается в том, что ПЭТ позволяет отслеживать не только концентрацию "помеченных" радиоактивными изотопами молекул, но и их кинетику [1].

1. Проблема анализа ПЭТ-изображений

В течение уже долгого времени врачи, использующие ПЭТ-изображения для постановки диагноза и наблюдения за ходом лечения, сталкивались с проблемой невозможности определения влияния выбранного метода лечения на состояние пациента. Уже давно установлено закрытое отношение между функциональной деятельностью и церебральным использованием глюкозы в дискретных мозговых регионах. Поэтому анализ накопления в тканях головного мозга глюкозы, помеченной радиоактивными изотопами, может быть использован для исследований местных изменений функциональной деятельности в различных физиологических и патологических состояниях [2]. Цветовая гамма, отражающая на полученном изображении концентрацию глюкозы, не позволяет увидеть человеческому глазу незначительные изменения в процессах, происходящих в изучаемой области головного мозга пациента, но которые являются очень важными для выбора дальнейшего хода лечения. Приходится тратить большое количество времени на обработку числовых значений, отражающих происходящие в организме процессы.

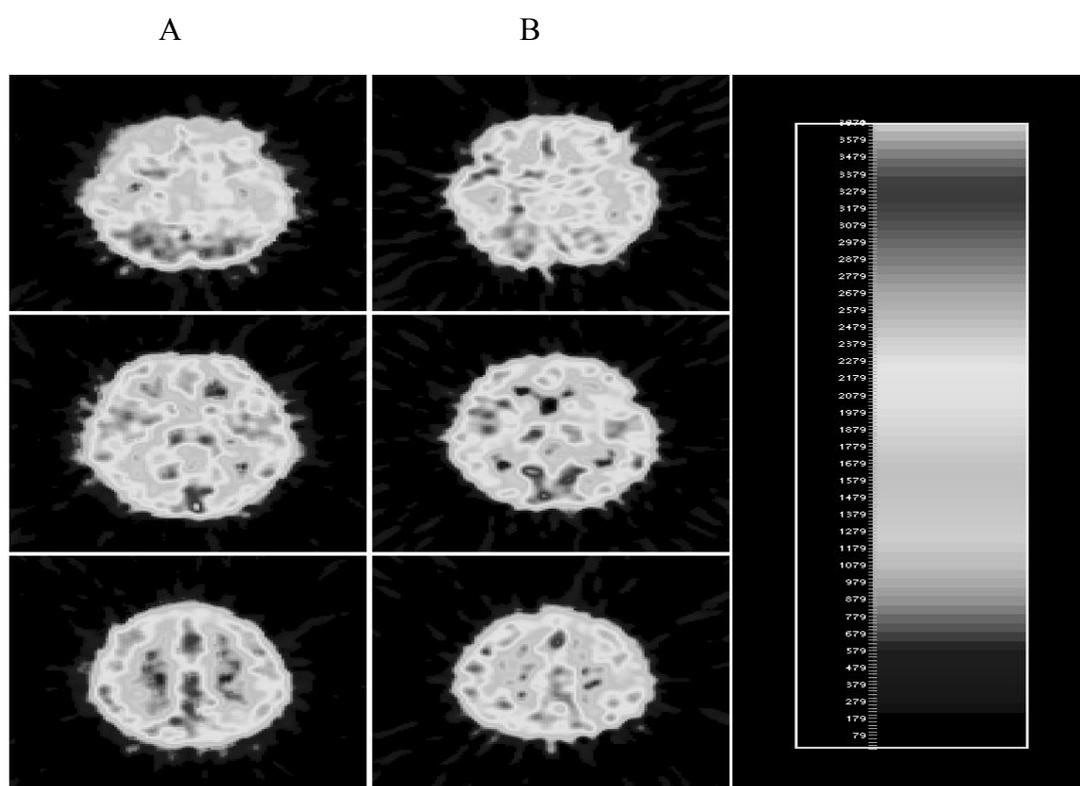


Рис. 2 При визуальном анализе ПЭТ-изображения мозгового кровотока в норме (А) и при невротической депрессии (В) неотличимы

В публикациях исследователей разных стран можно увидеть некоторые решения этого вопроса. Это и статистический метод [2], и различные попытки математического решения проблемы, путем нахождения производных входных функций [3].

2. Применение фтор-18

Фтор-18 фторид был описан в качестве вещества для получения изображений костей приблизительно 40 лет назад [1]. Позднее было описано применение этого индикатора для ПЭТ в качестве метода для измерения регионального скелетного метаболизма, что позволяет измерить ряд параметров [2]. Эти параметры включают в себя выделение фтора из плазмы в костную ткань (K_1), однонаправленное выделение фтора из

плазмы и константы интенсивности, описывающие обмен фтора между плазмой, межклеточной жидкостью и костными минеральными ячейками [2].

Для измерения этих параметров необходимо знать концентрацию фтора в артериальной плазме, а также иметь динамические видеоданные для скелетной области интереса. Затем параметры могут быть рассчитаны с применением нелинейной регрессии. В качестве альтернативы выделение фтора из плазмы в костную ткань может быть рассчитано при помощи графического анализа Патлака [5]. Это возможно, так как высвобождение фтора из костной ткани на протяжении одночасового исследования принимается незначительным [2].

3. Анализ артериальной, венозной и входной функции по изображениям

Измерение артериальной входной функции требует частого отбора проб артериальной крови. Обычно для этого используют лучевую артерию. Особенно это касается начальных этапов исследования, когда скорости изменения активности максимальны. Пункция лучевой артерии является безопасной процедурой. Тем не менее, лучевую артерию иногда трудно катетеризировать, и изредка эта процедура связана с болезненными ощущениями. Было доказано, что доза облучения персонала может быть уменьшена, если требуется использовать меньшее количество проб крови. Это усиливает привлекательность методов, использующих меньшее количество проб или измеряющих артериальную активность постоянно при помощи анализатора, работающего в режиме он-лайнного времени [6, 7] (если такое оборудование доступно).

Метод использования артериализированных венозных проб, в соответствии с которым рука или предплечье нагреваются до 43 °С для минимизации артериально-венозных различий, был уже ранее описан, но не сравнивался напрямую с артериальным методом. Кроме того, было отмечено, что использование он-лайнных анализаторов при низких интенсивностях кровотока может быть иногда менее достоверным [6, 7], что делает эту методику менее подходящей для сравнительно низких интенсивностях кровотока и давления при отборе проб из вен.

Также привлекательными являются методы получения входной функции по изображениям. Уже описывалось использование данных о крови в пределах области интереса изображения – например, левого желудочка сердца. Но этот метод требует поправок на коэффициенты активности цельной крови к плазме, которые не обязательно постоянны во времени и подвержены эффектам парциального объема. Применение к данным факторного анализа, метода, при помощи которого возможно выводить входную функцию из изображений, тоже выглядит многообещающе, но здесь необходимы дальнейшие исследования [8].

Альтернативным является подход, основанный на совокупностях, в соответствии с которым средняя входная функция из вошедшей в исследование совокупности может быть отмасштабирована для каждого конкретного случая при помощи меньшего числа проб крови. Он был оценен при измерениях интенсивности мозгового регионального метаболизма глюкозы [9]. Мы сравнили подход, основанный на совокупностях, и метод получения входных функций по изображениям с прямыми артериальными пробами при измерении кинетики фтор-18 фторида в поясничном отделе позвоночника.

4. Материалы и методы

В исследовании участвовали десять нормальных постклимактерических женщин. Никто из участниц не страдал от нарушений костного метаболизма и не принимал лекарственные препараты, влияющие на скелетный метаболизм. Исследование было одобрено местным комитетом по этике.

5. Радиоактивный индикатор

Фтор-18 фторид был получен в результате ядерной реакции $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ в циклотроне путем бомбардировки высокообогащенной H_2^{18}O протонами с энергией 18 МэВ. После очистки раствор был пропущен через 0,22 мкм фильтр для стерилизации.

6. Отбор образцов крови

У всех испытуемых брались пробы крови через 2, 4, 10 и затем через каждые 10 минут в течение часа после введения фтор-18 фторида. Часть каждой из проб была центрифугирована, и затем при помощи кросс-калиброванного с ПЭТ сканером счетчика была измерена концентрация активности в плазме и цельной крови. В течение первых 30 минут исследования, когда концентрация активности в крови изменялась больше всего, при помощи автоматизированной онлайн-системы отбора проб крови (Allog АВ, Швеция) проводилось непрерывное измерение активности в артериальной крови. Скорость течения через систему была равна 300 мл/час, использовались полиэтиленовые трубки длиной 1 м., имеющие внутренний диаметр 1 мм. Эти непрерывные данные о цельной крови были использованы совместно с серией дискретных артериальных образцов, взятых с 5-минутным интервалом для вывода входной функции плазмы. Эти дискретные пробы брались ниже по току крови, за детектором, на периферии линии лучевой артерии при помощи тройника.

7. Получение изображений

Снимки были получены на ПЭТ сканере Siemens ECAT 951R, имеющем осевое поле обзора 10,8 см. Испытуемые размещались так, чтобы средняя часть поясничного отдела позвоночника находилась в поле обзора. Для коррекции затухания был произведен 15-минутный трансмиссионный скан с использованием внешних $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ стержней. Внутривенно вводилось 189 МБк фтор-18 фторида, затем через 10 с 10 мл солевого раствора.

До 60 минут проводилось динамическое получение изображений с интервалами времени: 12×10 с, 4×30 с и 14×240 с. Скорректированные изображения поясничного отдела позвоночника были реконструированы с применением фильтра Hann 0,5. Для каждого кадра были реконструированы срезы размером 31×3.48 мм с 2 мм пикселями, что дало пространственное разрешение полученных изображений в 8,5 мм (полная ширина на половине максимума). Кадры 23–30 (32–60 минуты) были просуммированы с целью получения статических изображений для размещения областей интереса.

8. Входная функция, полученная из изображений

Области интереса, использованные для выведения основанной на изображениях входной функции (IF_i), были определены ранним динамическим кадром, в котором лучше всего визуализировалась область активности (в виде шарика). Была использована автоматическая процедура, которая помещала области размером 1×1 см на пиксели с наибольшей интенсивностью в каждой плоскости. Затем средние значения внутри каждой области интереса еще раз усреднялись по всем плоскостям. Ограниченное пространственное разрешение системы привело к тому, что кривая время-активность $R_{aorta}(t)$, которая получалась путем применения этих областей интереса к динамическим графическим данным, состояла из вкладов артериальной крови и избытков активности из тканей на заднем плане. Для расчета истинной концентрации активности в аорте, $C_{aorta}(t)$, было применена следующая аппроксимация:

$$R_{aorta}(t) = \beta \times C_{aorta}(t) + (1 - \beta) \times C_{bgnd}(t), \quad (8.1)$$

где β – средний коэффициент возврата для аортальных областей интереса, а $C_{bgmd}(t)$ – концентрация активности в окружающих тканях. Фоновая активность была рассчитана при помощи дополнительных кольцевых областей интереса, которые находились в-округ аорты с внешним и внутренним радиусом 25 мм и 35 мм соответственно. Были получены значения венозной концентрации активности для аппроксимирования артериальной концентрации после срока 2400 с, а также для определения β . Последние венозные пробы крови были использованы для расчета $C_{aorta}(t)$. Затем было применено сглаживание по методу наименьших квадратов для определения значения β , которое минимизировало разницу между левой и правой частями выражения (1) для значений времени, в течение которых были получены данные для венозных образцов. Различия между требуемыми концентрациями в плазме и концентрациями в цельной крови, полученными из изображений, были также скорректированы по данным венозных проб крови. Отношение активности в плазме к активности в цельной крови было измерено для каждой из 8-ми дискретных венозных проб. Затем было применено линейное сглаживание по методу наименьших квадратов для описания изменения во времени отношения активности в плазме к активности в цельной крови для каждого испытуемого. Соответствующие, зависящие от времени поправочные коэффициенты для отношения плазма/цельная кровь были затем применены к данным по цельной крови, $C_{aorta}(t)$, полученным из изображений.

9. Результаты

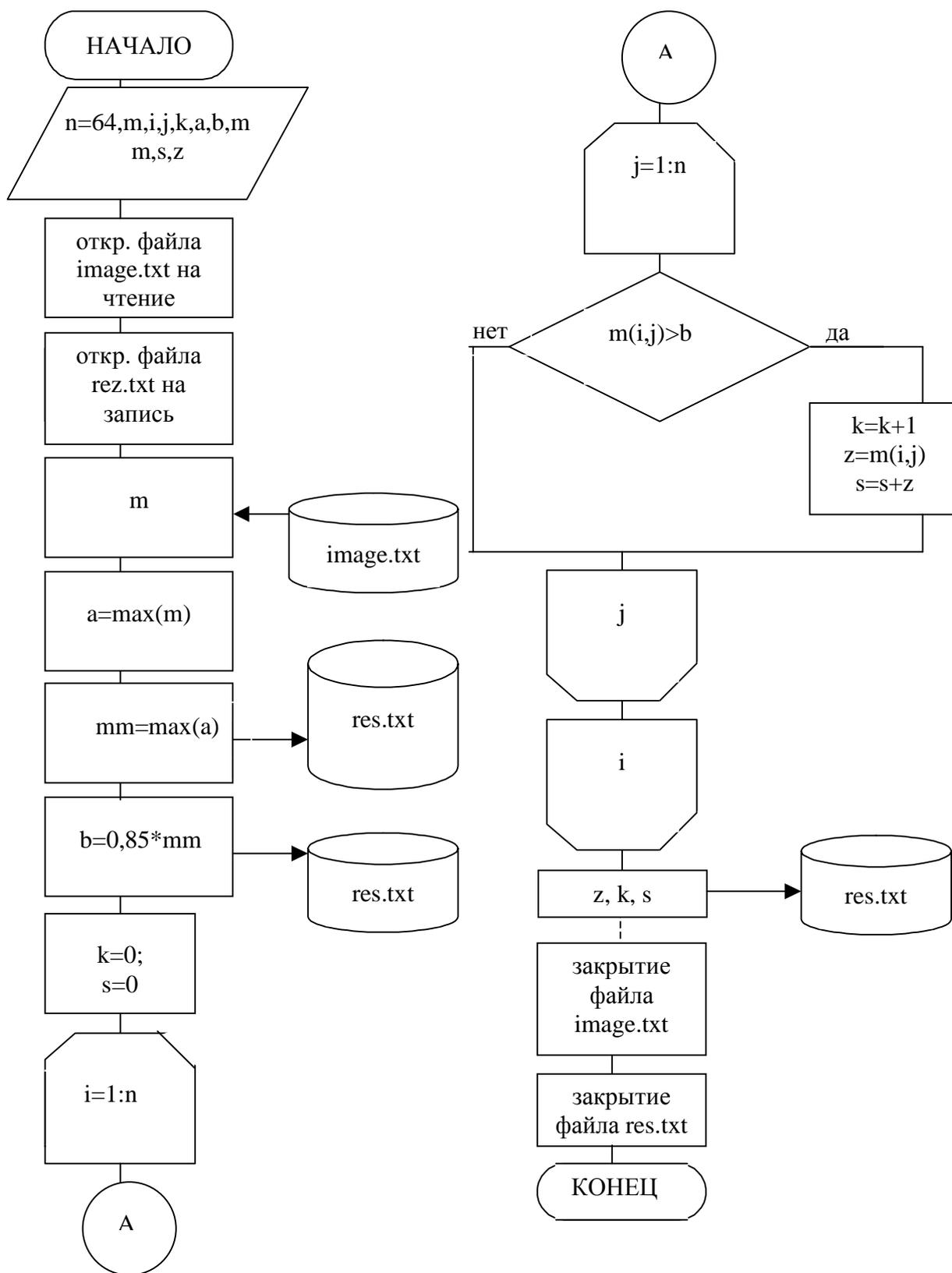
При использовании метода получения функции по изображениям было отмечено, что кривая время-активность, полученная из аортальной области интереса, имела тенденцию преуменьшать измеренную артериальную активность в ранних кадрах и преувеличивать ее в последних кадрах. Было решено, что к недооценке в ранних кадрах привел парциальный объемный эффект, а к преувеличению привел вклад активности соседних тканей.

Результаты исследования подтверждают, что входные функции, полученные либо методом, основанным на совокупностях, либо методом, использующим изображения аорты, требующими малого количества венозных проб крови, могут быть использованы для определения выделения фтора из плазмы в костную ткань при помощи фтор-18 фторидной ПЭТ. Если бы измерение выделения фтора из плазмы в костную ткань (K_i) было единственным требованием для какой-либо группы нарушений костного метаболизма, то предпочтительнее было бы использовать метод получения входной функции по изображениям. Тем не менее, этот метод применим только тогда, когда в поле обзора сканера имеется крупная артерия или левый желудочек сердца. Кроме того, этот метод более чувствителен к перемещению пациента, что является потенциальным источником погрешностей.

10. Описание алгоритма и программы анализа ПЭТ-изображений

Наша программа является ещё одной попыткой найти решение данной проблемы. Используя уже сформированную томографом матрицу, находится максимальное значение активности среди всех значений. Матрица формируется на основе входной функции, отражающей интенсивность поглощения глюкозы различными тканями головного мозга. Далее начинается сравнение всех элементов исходной матрицы со значениями, которые отражают приближение к максимуму от 50% до 95%. По этим данным и делают выводы о пользе или бесполезности выбранного метода лечения путем сравнения числовых эквивалентов активности до и после лечения. Помимо этого, в программе

предусмотрена функция нахождения суммарной активности в выбранных по степени приближенности к максимуму пикселах.



В программе используются следующие переменные: n – размерность исходной матрицы; m – исходная матрица размерностью $i \times j$; a – матрица, сформированная из максимальных значений каждого столбца исходной матрицы; mm – максимальный эле-

мент исходной матрицы; b – числовое отражение какого-либо процента от максимума; k – количество значений матрицы, приближающихся к максимальному на определенное количество процентов; z – числовое значение каждого элемента матрицы, приближающегося к максимальному на определенное количество процентов; s – суммарная активность выбранных программой пикселей.

Заключение

Предложенный алгоритм и сама программа помогли намного упростить и ускорить задачу постановки диагноза по изображениям сечений в позитронно-эмиссионной томографии. Предложенный метод дает возможность наблюдать даже за самыми незначительными изменениями в состоянии пациентов и процессах, протекающих в интересующих врачах областях. В настоящее время метод дополняется новыми функциональными возможностями и находится в разработке.

Литература

1. Blau M, Nagler W, Bender MA. A new isotope for bone scanning. // J Nucl Med. 1962. 3. 332–334.
2. Messa C, Goodman WG, Hoh CK, et al. Bone metabolic activity measured with positron emission tomography and ^{18}F -fluoride ion in renal osteodystrophy: correlation with bone histomorphometry. // J Clin Endocrinol Metab. 1993. 77. 949–955.
3. Hawkins RA, Choi Y, Huang SC, et al. Evaluation of skeletal kinetics of fluorine-18-fluoride ion with PET. // J Nucl Med. 1992. 33. 633–642.
4. Schiepers C, Nuyts J, Bormans G, et al. Fluoride kinetics of the axial skeleton measured in vivo with fluorine-18-fluoride PET. // J Nucl Med 1997 38 1970–1976.
5. Piert M, Zittel TT, Machulla HJ, et al. Blood flow measurements with ^{15}O and ^{18}F fluoride ion PET in porcine vertebrae. // J Bone Miner Res. 1998. 13. 1328–1336.
6. Patlak CS, Blasberg RG, Fenstermacher JD. Graphical evaluation of blood-to-brain transfer constants from multiple time uptake data. // Cereb Blood Flow Metab. 1983. 3. 1–
7. Al-Kutoubi A, de Jode M, Gibson M. Radial artery approach for outpatient peripheral arteriography. // Clin Radiol. 1996. 51. 110–112.
8. Eberl S, Anayat AR, Fulton RR, Hooper VK, Fulham MJ. Evaluation of two population-based input functions for quantitative neurological FDG PET studies. // Eur J Nucl Med. 1997. 24. 299–304.
9. Eriksson L, Ingvar M, Rosenqvist G, Stone-Elander S, Ekdahl T, Kappel P. Characteristics of a new automated blood sampling system for PET. // IEEE Trans Nucl Sci. 1995. 42. 1007–1011.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЯМР-ТОМОГРАФИИ

А.О. Казначеева

Научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина

Рассматривается задача создания устройства для контроля качества параметров изображения в магнитно-резонансной томографии. Предлагаемый фантом, состоящий из ряда секций, является единой компактной системой, позволяющей одновременно измерять целый ряд параметров МР-изображения и сократить время тестирования системы томографа.

Введение

Широкое использование магнитно-резонансной томографии как метода точной неинвазивной диагностики вызвало потребность в эффективном средстве оценки работы магнитно-резонансного (МР) томографа [1-2]. Оценка работы томографа и представление практических методов тестирования производится с помощью специальных устройств для контроля качества изображения, называемых фантомами.

МР-фантомом является стандартный искусственный объект, изображение которого получают для проверки качества работы и настройки параметров МР-томографа [3, 4]. Фантомы сделаны из стекла или пластика и заполнены веществами, имеющими МР-сигнал. Такими веществами являются водные парамагнитные растворы, чистые желатиновые гели, агар, гели с органическими или парамагнитными добавками и др.

Часто бывает необходимо настраивать времена спин-решеточной T_1 и спин-спиновой T_2 релаксации так, чтобы можно было получать изображения за подходящие периоды времени (например, короткое время повторения TR). Для настройки времени релаксации протонов в воде обычно используются водные растворы таких парамагнитных веществ, как никель, марганец, натрий, кислород.

Виды фантомов

МР-фантомы проектируются для исследования широкого диапазона инструментальных параметров и позволяют определять геометрические искажения изображений, пространственное разрешение, расстояние между срезами, толщину среза и его смещение, обусловленное физическими и электронными свойствами. Также фантомы позволяют обнаруживать низкую контрастность, оценивать однородность изображения и определять отношение сигнал/шум.

Каждый отдельный фантом может быть предназначен для тестирования одной или нескольких вышеперечисленных функций. Это становится возможным при комбинировании соответствующих элементов фантома. Существует два основных вида фантомов: разрешающий и РЧ однородностный [5].

Разрешающий фантом может использоваться для тестирования нескольких характеристик пространственного разрешения томографа, включая плоскостную разрешающую способность, толщину срезов, линейность и отношение сигнал/шум в зависимости от положения исследуемой области. Разрешающие фантомы обычно делаются из пластмассы. Участки внутри фантома удаляются для формирования тестового рисунка, а фантом заполняется водным раствором. Для получения изображения такого фантома регистрируется сигнал от воды в тех областях, где удален пластик. Кроме того, некоторые фантомы имеют стандартные элементы с известными значениями T_1 , T_2 и протонной плотности ρ , что позволяет использовать их для проверки соотношений контраст-шум.

На рис. 1а представлен пример разрешающего фантома фирмы General Electric. На изображении аксиального среза данного фантома виден ряд элементов, предназна-

ченных для тестирования соответствующих характеристик. Ряды одинаковых по размеру квадратов используются для проверки линейности. Плоскостная разрешающая способность определяется с помощью расположенной в верхней части фантома группы тонких областей, поглощающих сигнал. Толщина среза оценивается с помощью клиновидного выреза в пластике (на рисунке справа), ширина которого на изображении увеличивается по мере увеличения толщины среза. Иногда разрешающий фантом содержит три стандартных элемента, заполненных жидкостями с известными значениями T_1 , T_2 и ρ .

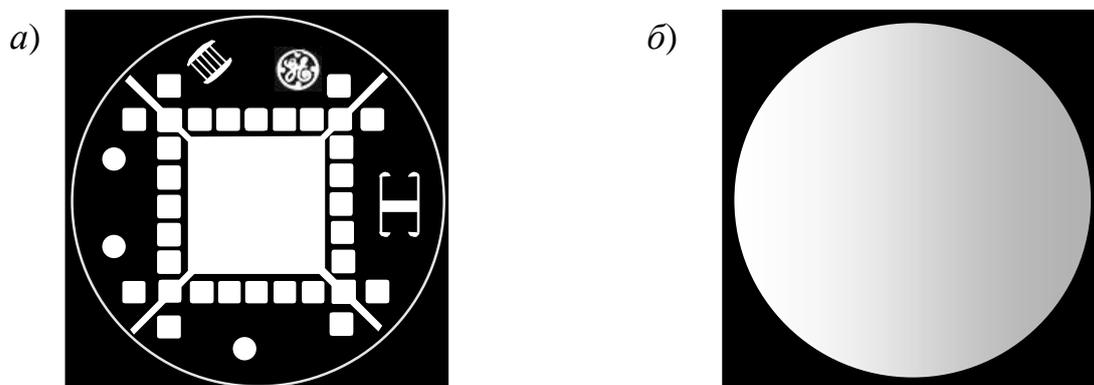


Рис. 1. а) Разрешающий фантом фирмы *General Electric*. б) Фантом для тестирования однородности

Однородностные фантомы используются для тестирования пространственной однородности РЧ полей. Для минимизации времени накопления в однородностных фантомах вещество, дающее опорный сигнал, должно иметь относительно короткое время T_1 . При этом в используемой импульсной последовательности параметр TR выбирается примерно равным $5T_1$. Чаще всего для тестирования однородности поля каждой из отображающих катушек существует свой фантом. В идеале для большинства катушек поле должно быть пространственно однородно при одинаковой чувствительности по всему отображаемому объекту. Его неоднородность может быть вызвана неоднородностью основного или РЧ поля, нелинейностью градиентных полей или вихревыми токами. На изображениях она проявляется в виде затемнения в соответствующей области (рис. 1б).

Предлагаемая модель

Для тестирования ряда инструментальных характеристик можно предложить использовать фантом, состоящий из ряда секций, каждая из которых позволяет исследовать определенный параметр изображения. Толщина каждой из секций такого фантома может быть около 10 мм. Изображения фантома получают, используя стандартные протоколы отображения МРТ систем.

Для тестирования пространственной линейности и геометрических искажений в центре фантома используется секция в виде сетки, примерно 10×10 квадратов. Для обнаружения геометрических искажений часто достаточно визуального осмотра, при котором заметна деформация или растяжение такой сетки (рис. 2). Наличие геометрических искажений вызывается неоднородностью магнитного поля, магнитной восприимчивостью или нелинейностью градиентов. В данном тесте оператор должен получить T_1 – взвешенное изображение и использовать функцию вычисления расстояния, чтобы проверить точность измерения внутреннего диаметра поперек, по вертикали и по каждой диагонали фантома (на рис. 2 эти направления показаны серыми стрелками):

$$D_{geom} = \frac{D_o - D_{изм}}{D_o} \cdot 100\%;$$

где D_{geom} – геометрическое искажение, измеренное в процентах; D_0 – действительное значение диаметра; $D_{изм}$ – измеренное значение диаметра.

Угол между сторонами ячеек сетки должен быть 90° . Эти же расстояния можно измерить непосредственно на пленке в случае необходимости обнаружения искажений, возникающих в матричной или лазерной камере.

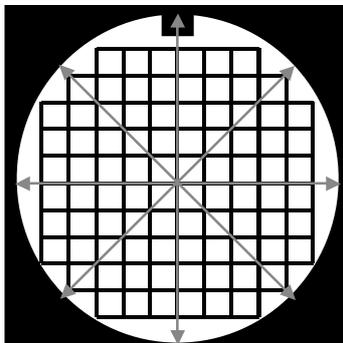


Рис. 2. Изображение секции для тестирования геометрических искажений

Для тестирования пространственного разрешения, зависящего от величины градиентов и алгоритма реконструкции, используется секция, которая состоит из ряда отверстий различного диаметра, например от 0,5 до 2 мм. Отверстия могут быть как квадратной, так и круглой формы и располагаются в двух ортогональных направлениях, что позволяет обеспечить одновременную оценку разрешения в направлениях фазового и частотного кодирования. Этот тест должен проводиться без применения каких-либо фильтров формирования данных.

Можно оценить РЧ однородность U , используя секцию, полностью заполненную парамагнитным раствором. В центре изображения определяют отношение сигнал/шум. Затем, изменяя уровень контрастности и яркости изображения, определяют самый яркий и самый темный участки в пределах области исследования, для которых также записывают отношение сигнал/шум (S_{max} и S_{min} соответственно) и рассчитывают однородность:

$$U = \left[1 - \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \right] \cdot 100\% .$$

Обнаружение низкой контрастности производится с помощью секции, содержащей элементы цилиндрической формы, которые заполнены растворами, имеющими различные значения параметров T_1 и T_2 . Сигналы от таких элементов будут отличаться интенсивностями (рис. 3), что, в свою очередь, позволит визуально оценить способность сканера различать низко контрастные объекты на изображениях.

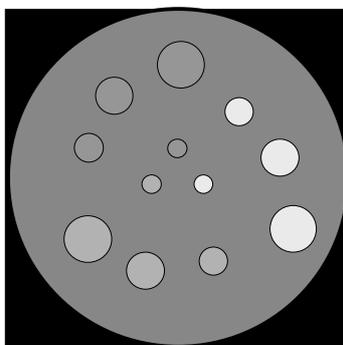


Рис. 3. Секция для исследования контрастности

Определение отношения сигнал/шум I производится по T_2 -взвешенному изображению секции, приведенной на рис. 4. Для этого определяют среднее значение сигнала от раствора в центре области исследования \bar{S}_p . Затем регистрируют среднее значения сигнала фона вне изображения фантома \bar{S}_ϕ в областях, обозначенных на рис. 4 эллипсами. Далее вычисляют стандартное отклонение этого значения, поскольку оно отражает шум, свойственный системе.

$$I = \frac{\bar{S}_p - \bar{S}_\phi}{\bar{S}_\phi}.$$

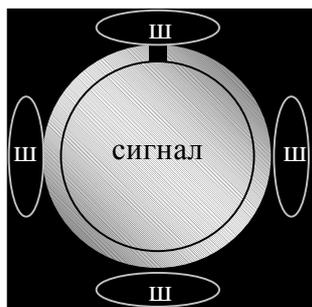


Рис. 4. Измерение отношения сигнал/шум для изображенного среза

Важным параметром в МР-томографии является толщина среза, зависящая от однородности полей, величины и линейности градиентов и используемой импульсной последовательности [6]. Для измерения толщины среза используется два метода. Первый метод заключается в использовании в одной из секций фантома клиновидного выреза в пластике, оптимальное соотношение длин боковых граней которого примерно 1:10. На изображении сигнал будет в том месте, где пластик удален, а ширина клиновидного выреза будет увеличиваться по мере увеличения толщины среза (рис. 1а). Второй метод состоит в измерении профиля среза путем непосредственного использования срезоселективных и частотных градиентов.

Заключение

Использование предложенного фантома, состоящего из ряда секций, позволяет уменьшить время тестирования отображающей системы МР томографа в несколько раз (пропорционально числу секций) и упростить анализ полученных изображений. При использовании нескольких фантомов время тестирования составляет около 1,5 часов, тогда как применение комбинированного фантома (6 секций) сокращает его до 15 минут.

Литература

1. Марусина М.Я. Показатели качества изображения в ЯМР-интроскопии. / В кн. Оптические методы исследования дефектов и дефектообразования элементной базы микроэлектроники и микросенсорной техники. Под ред. д.т.н., проф. Ю.А. Гатчина и д.т.н., проф. В.Л. Ткалич - СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002, 112-116.
2. Иванов В.А., Марусина М.Я., Сизиков В.С. Обработка измерительной информации в условиях неопределенностей. // Контроль. Диагностика. 2001. №4(34), с.40-43.
3. Price R., Axel L., et. al. Quality assurance methods and phantoms for magnetic resonance imaging. //Medical Physics. - 1990. - Vol. 17. - P. 287-295.
4. Och J.G., Clarke G.D., et. al. Acceptance testing of magnetic resonance imaging systems. //Medical Physics. 1992.Vol. 19. P. 217-227.
5. Hornak J.P. The basics of MRI. 2000 -www.cis.rit.edu/htbooks/mri
6. Clarke G.D. Overview of the ACR MRI accreditation phantom - www.aapm.org/meetings/99AM/pdf/2728-58500.pdf

СРАВНЕНИЕ И РАЗВИТИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Д.С. Щекотин

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.С. Сизиков

Рассмотрено два типа задач реконструкции изображений в рентгеновской томографии: задачи с полными и неполными данными. Проанализированы аналитические методы (обращения Радона и Кормака) и численные методы (преобразования Фурье, свертки и обратной проекции, итераций и регуляризации) решения задачи реконструкции. К методу свертки и обратной проекции применен метод регуляризации Тихонова, а вместо итерационного метода Качмажа использован метод итераций Фридмана. Приведены результаты компьютерного моделирования.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу восстановления рентгеновского изображения на примере рентгеновского томографа с параллельной схемой сканирования (см. рис. 1) [1–6].

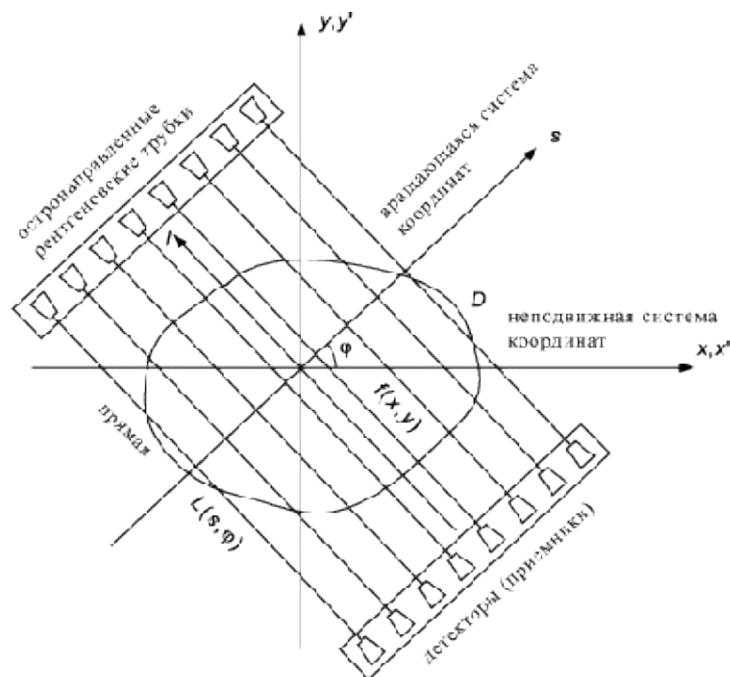


Рис. 1. Параллельная схема сканирования.

На рис. 1 показано сечение D исследуемого объекта, характеризуемое плотностью вещества, точнее, коэффициентом поглощения рентгеновских лучей $f(x, y)$, где x, y – неподвижная относительно объекта система декартовых координат (с ней совмещена система координат x', y' , необходимая далее). Расположенные на раме рентгеновские трубки излучают узконаправленные рентгеновские лучи интенсивности I_0 , которые, пройдя через вещество и испытав частичное поглощение, регистрируются соответствующими детекторами (приемниками). Такой эксперимент проводится для ряда значений угла поворота рамы $\varphi \in [0, \pi)$.

Введем вращающуюся (неподвижную относительно рамы) систему декартовых координат s, l . Тогда можно обозначить через $I(s, \varphi)$ значения интенсивности излучения, измеренные детекторами. Обозначим далее

$$q(s, \varphi) = -\ln \frac{I(s, \varphi)}{I_0}. \quad (1)$$

Отношение $\frac{I(s, \varphi)}{I_0}$ принято называть прозрачностью, а функцию $q(s, \varphi)$ – поглощением [6, с. 19] или тенью. Искомая функция $f(x, y)$ связана с полученными по результатам измерений значениями $q(s, \varphi)$ интегральным уравнением Радона [1–4, 6], или теньвым уравнением:

$$R f \equiv \int_{L(s, \varphi)} f(x, y) dl = q(s, \varphi), \quad (2)$$

где R – оператор преобразования Радона (оператор теневого преобразования), а интегрирование ведется по лучу в виде прямой $L(s, \varphi)$, уравнение которой

$$x \cos \varphi + y \sin \varphi = s. \quad (3)$$

Связь между x, y и s, l имеет вид

$$x = s \cos \varphi - l \sin \varphi, \quad y = s \sin \varphi + l \cos \varphi.$$

Поэтому (2) можно записать как [3]

$$R f \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \varphi - l \sin \varphi, s \sin \varphi + l \cos \varphi) dl = q(s, \varphi).$$

Математический интеграл $\int_{L(s, \varphi)} f(x, y) dl$ называется радоновским образом или

проекцией, а физический – массой вещества на луче зрения [6, с. 19]. $q(s, \varphi)$ в данном случае является набором исходных интегральных проекций (тенью изображения).

Тень изображения при фиксированном угле φ обозначим через $q_\varphi(s)$ и будем называть линейной интегральной проекцией изображения q под углом φ .

Заметим, что существует еще схема веерного сканирования (более распространенная схема), для которой также справедливо уравнение типа (2) [4].

Виды задач реконструкции

Задача реконструкции рентгеновского изображения сводится к решению интегрального уравнения типа (2) относительно $f(x, y)$ по известным значениям $q(s, \varphi)$. При этом существует два типа задач реконструкции: задача с полными данными и задача с неполными данными [4].

В задаче с полными данными предполагается, что исходные интегральные проекции $q(s, \varphi)$ известны вдоль всех лучей, проходящих через исследуемое сечение D , т.е. при всех необходимых значениях s и φ .

Задачи с неполными данными могут быть следующих типов:

1. задача с ограниченным диапазоном углов,
2. внешняя задача, когда функция $q(s, \varphi)$ задана лишь для $|s| \geq a$, где $a > 0$,
3. внутренняя задача, когда $q(s, \varphi)$ задана лишь для $|s| \leq a$, где $a > 0$,
4. задача с ограниченным числом источников и приемников излучения.

Что касается аналитических и численных методов решения уравнения (2), то известны следующие аналитические методы: согласно формуле обращения Радона [2, 4] и согласно формуле обращения Кормака [4]. Также существуют следующие численные методы: метод преобразования Фурье, метод свертки и обратной проекции, метод итераций и методы регуляризации.

Многие из этих методов исследованы достаточно подробно [1–6], однако остался ряд нерешенных вопросов. Например, в методе свертки и обратной проекции [4, 5] имеет место явная расходимость решения $f(x, y)$ и, чтобы ее устранить, используется

предельная (максимальная) частота Фурье, хотя, как известно [7, с. 259–261], более эффективно устраняют расходимость методы сглаживающих окон и, тем более, метод регуляризации Тихонова. Это показано в работе [3, с. 33], однако введенный в ней стабилизирующий множитель можно значительно упростить, что и предлагается в данной работе.

Кроме этого, в качестве метода итераций в [4] использован метод Качмажа. Между тем, более эффективным представляется метод итеративной регуляризации Фрийдмана [7, с. 272].

Наконец, представляются совершенно новые возможности в решении задачи реконструкции рентгеновских изображений в связи с приведением "неудобного" уравнения (2) к стандартному уравнению – двумерному интегральному уравнению Фредгольма I рода типа свертки [8]:

$$\iint_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{f(x', y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} = S(x, y), \quad (4)$$

где $K(x, y) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}$,

$$S(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} q(x \cos \varphi + y \sin \varphi, \varphi) d\varphi. \quad (5)$$

Решение $f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint \hat{f}(\omega_1, \omega_2) e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2$, где $\hat{f}(\omega_1, \omega_2) = \frac{\bar{S}(\omega_1, \omega_2)}{\bar{K}(\omega_1, \omega_2)}$,

$\bar{K}(\omega_1, \omega_2) = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}$ без регуляризации, а с регуляризацией

$\hat{f}_\alpha(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2\pi} \frac{\omega}{1 + \alpha\omega^{2p}} \bar{S}(\omega_1, \omega_2)$, где $\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}$, $p=1,2,3,\dots$ – порядок регуляризации, $\alpha > 0$ – параметр регуляризации.

Уравнение (4) уже исследовалось [2] и применялось на практике [1], однако до настоящего времени не рассмотрен вопрос о его решении в случае задачи с неполными данными.

Метод преобразования Фурье

Этот хорошо известный метод основан на непосредственной численной реализации теоремы Брейсуэлла о центральном или проекционном слое (проекционной теореме) [9]:

$$\hat{q}(\omega, \varphi) = \hat{f}(\omega \cos \varphi, \omega \sin \varphi), \quad (6)$$

где $\omega \cos \varphi = \omega_1$ и $\omega \sin \varphi = \omega_2$, а, следовательно, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\omega_1}$,

$$\omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2},$$

$$\hat{q}(\omega, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} q(s, \varphi) e^{-i\omega s} ds, \quad (7)$$

– преобразования Фурье (ПФ). Искомая функция в форме обратного ПФ равна

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega_1, \omega_2) e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2, \quad (8)$$

где

$$\hat{f}(\omega_1, \omega_2) = \hat{q}\left(\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}, \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\omega_1}\right). \quad (9)$$

Однако при численной (дискретной) реализации Фурье-алгоритм дает значительные искажения (артефакты) [4]. Это связано с тем, что в (8) требуется знание $\hat{f}(\omega_1, \omega_2)$, а из (9) следует, что для этого нужно знать $\hat{q}\left(\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}, \operatorname{arctg} \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)$. Поэтому при дискретизации задачи требуется интерполяция, что ведет к большему числу операций и потере точности [4].

Для устранения недостатков стандартного алгоритма ПФ разработаны усовершенствованные Фурье-алгоритмы [4]. Еще более эффективным является алгоритм свертки и обратной проекции.

Метод свертки и обратной проекции

Данный метод, восходящий к работам [10, 11] и нашедший последующее развитие в работах [3–5] и др., является дальнейшей эволюцией Фурье-алгоритма и позволяет полностью избежать интерполяции за счет перехода от декартовых координат ω_1, ω_2 к полярным координатам ω, φ в пространстве частот. Искомое решение имеет вид [3, с. 32]:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi d\varphi \int_{-\infty}^\infty q(s, \varphi) p(x \cos \varphi + y \sin \varphi - s) ds, \quad (10)$$

где

$$p(t) = \int_{-\infty}^\infty |\omega| e^{i\omega t} d\omega \quad (11)$$

– так называемая импульсная реакция фильтра с частотной характеристикой $|\omega|$.

Однако решение (10)–(11) дает расходимость. Действительно, используя формулу Эйлера и записав (11) в виде:

$$p(t) = 2 \int_0^\infty |\omega| \cos(\omega t) d\omega, \quad (12)$$

видим, что $p(t)$ расходится при любом $t \in (-\infty, \infty)$. Чтобы устранить расходимость, в [4, 5] вводится предельная частота $\omega_{\max} = \frac{\pi}{h}$, где h – шаг дискретизации, в результате [5, с. 156, 171]

$$p(t) = \omega_{\max}^2 \operatorname{sinc}(\omega_{\max} t) - \frac{\omega_{\max}^2}{2} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega_{\max} t}{2}\right). \quad (13)$$

Такой устойчивый алгоритм часто называют решением в пространстве $S_{\pi/h}$ [7, с. 259], но он является самым грубым из устойчивых алгоритмов. Более эффективное подавление высоких гармоник Фурье обеспечивают методы сглаживающих окон [7, с. 259–260]. А наиболее эффективным является метод регуляризации Тихонова [7, с. 260–261].

Метод регуляризации Тихонова

Применение данного метода в работе [3, с. 33] позволило получить устойчивый (регуляризованный) вариант решения (10)–(11) в форме:

$$f_{\alpha}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\pi} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} q(s, \varphi) p_{\alpha}(x \cos \varphi + y \sin \varphi - s) ds, \quad (14)$$

где

$$p_{\alpha}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| W_{\alpha}(|\omega|) e^{i\omega t} d\omega, \quad (15)$$

$\alpha > 0$ – параметр регуляризации,

$$W_{\alpha}(|\omega|) = \frac{H^2(|\omega|)}{H^2(|\omega|) + \alpha \omega^{2p}} \quad (16)$$

– стабилизирующий множитель, причем

$$H(|\omega|) = \frac{1}{\pi \omega}, \quad (17)$$

$p = 1, 2, 3, \dots$ – порядок регуляризации. Обычно $p = 1$, а α выбирают способом невязки или способом подбора [6, с. 194], [7, с. 242–249].

Однако выражение (16) является довольно громоздким. Более простым, но столь же эффективным, как следует из работы [12] (см. также [6, с. 170]), является определение стабилизирующего множителя в виде

$$W_{\alpha}(|\omega|) = \frac{1}{1 + \alpha \omega^{2p}}. \quad (18)$$

Метод итераций Фридмана

Основное достоинство методов итераций заключается в том, что они пригодны для восстановления томографических изображений в случае задачи с неполными данными. В качестве примера рассмотрим метод итераций Фридмана [7, с. 272].

Метод заключается в том, что вначале выполняется инициализация, а затем выполняются итерации при $i = 1, 2, \dots$:

$$\tilde{f}_{i+1} = \tilde{f}_i + \beta d_i,$$

где $d_i = R^*[\tilde{q} - R \tilde{f}_i]$, причем $\tilde{f}_0 \in \Omega$, $0 < \beta < \frac{2}{\|R\|^2}$. Здесь \tilde{f}_0 – начальное приближение,

которое может включать в себя априорно известную информацию, Ω – пространство изображений, R – оператор Радона, а R^* – сопряженный ему оператор.

Недостатком алгоритма последовательных приближений является то, что сходимость гарантируется только при условии $0 < \beta < 2/\|R\|^2$, а это требует знания нормы оператора R . Эту норму обычно трудно или невозможно вычислить аналитически для оператора в форме (2). Поэтому на практике подбирают достаточно малое значение β . Кроме того, определенную сложность представляет определение числа итераций (процесс итераций сходится лишь в случае точных значений $q(s, \varphi)$, а при наличии шумов он расходится из-за некорректности задачи). Обычно число итераций выбирают по невязке [7, с. 273–274] или по поправке [7, с. 274–275]. В данной работе число итераций n выбиралось способом подбора – путем выбора такого числа итераций, при котором изображение восстанавливается наилучшим образом с точки зрения зрительного восприятия. Такой способ, конечно, содержит элемент субъективности, однако он основывается на априорной информации о решении и, как показывает практика, является весьма эффективным.

Моделирование

На основе метода свертки и обратной проекции и метода регуляризации Тихонова было разработано программное обеспечение на языке С# для проведения модельных экспериментов. Были получены 4 алгоритма:

1. алгоритм обратной проекции без фильтрации,
2. алгоритм свертки и обратной проекции с предварительным применением к проекциям преобразования Фурье,
3. алгоритм свертки и обратной проекции с предельной частотой (решение в пространстве $S_{\pi/h}$),
4. алгоритм свертки и обратной проекции с регуляризацией Тихонова.

На рисунке 2 показано исходное изображение размером 100×100 пикселей. Пиксель соответствует ячейке, на которые разбивается непрерывное изображение и в пределах которой коэффициент поглощения считается постоянным.

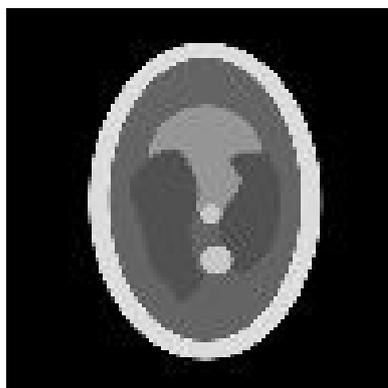


Рис. 2. Исходное изображение.

Полученная после решения прямой задачи томографии тень изображения представлена на рисунке 3. При моделировании использовались следующие параметры: количество лучей 100, количество проекций 100 на угол поворота $\varphi \in [0, \pi)$. Строки изображения соответствуют проекциям под различными углами поворота.



Рис. 3. Тень изображения.

Алгоритм обратной проекции без фильтрации дает изображение, представленное на рис. 4. Данный алгоритм дает сильно зашумленное изображение и не позволяет различать области, имеющие небольшие различия в коэффициентах поглощения.

Алгоритм свертки и обратной проекции с предварительным применением к проекциям преобразования Фурье дает более четкое изображение (рис. 5). Данный алгоритм имеет небольшую временную сложность и хорошо поддается оптимизации, одна-

ко восстанавливает изображение в круге, поскольку при обратном распространении каждой отдельной проекции лучи проходят не через все ячейки изображения.

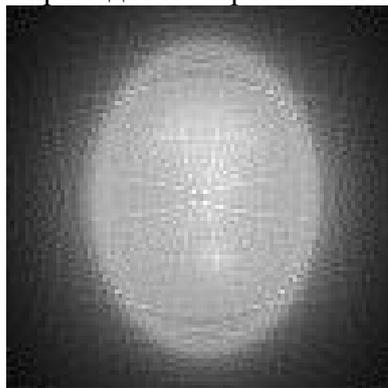


Рис. 4. Изображение, восстановленное алгоритмом обратной проекции без фильтрации



Рис. 5. Изображение, восстановленное алгоритмом свертки и обратной проекции с предварительной фильтрацией

Еще более эффективным является алгоритм свертки и обратной проекции с предельной частотой (рисунок 6). Данный алгоритм имеет большую временную сложность и хуже поддается оптимизации, однако дает более четкое изображение и не имеет ограничений алгоритма свертки и обратной проекции с предварительной фильтрацией.



Рис. 6. Изображение, восстановленное алгоритмом свертки и обратной проекции с предварительной фильтрацией.

Алгоритм свертки и обратной проекции с регуляризацией Тихонова (рис. 7) также восстанавливает удовлетворительное изображение. Для восстановления данного изображения были использованы следующие параметры: порядок регуляризации $p = 2$ и параметр регуляризации $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-4}$. Вычислительные затраты эквивалентны затратам

на восстановление при использовании алгоритма свертки и обратной проекции с предельной частотой.



Рис. 7. Изображение, восстановленное алгоритмом свертки и обратной проекции с регуляризацией Тихонова

Заключение

Моделирование показало неэффективность алгоритма обратного распространения без фильтрации для восстановления рентгеновских изображений. Полученное с помощью такого алгоритма изображение оказывается сильно зашумленным и неконтрастным. Алгоритм свертки и обратной проекции с предварительной фильтрацией является вычислительно эффективным, однако восстанавливает изображение хуже, чем алгоритмы свертки и обратной проекции с предельной частотой и алгоритм свертки и обратной проекции с регуляризацией Тихонова. Последние два алгоритма обладают одинаковой временной сложностью и одинаковым качеством восстановления в идеальных условиях, однако не был рассмотрен вопрос о восстановлении изображений при наличии шума в исходных данных.

Литература

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Рубашов И. Б., Тимонов А. А. Первый советский компьютерный томограф // *Природа*. 1984. № 4. С. 11–21.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Тимонов А. А. Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука, 1987.
3. Троицкий И. Н. Статистическая теория томографии. М.: Радио и связь, 1989.
4. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
5. Суинделл Б., Уэбб С. Рентгеновская трансмиссионная компьютерная томография // *Физика визуализации изображений в медицине*. Под ред. С. Уэбба. М.: Мир, 1991. Т.1. С.138–173.
6. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001.
7. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Рубашов И. Б., Тимонов А. А. О постановке основных задач вычислительной томографии. М.: Препринт ИПМ АН СССР, 1982. № 141.
9. Bracewell R. N., Riddle A. C. Strip integration in radio astronomy // *Austral. J. Phys.*, 1956. Vol. 9. P. 198–217.
10. Bracewell R. N., Riddle A. C. Inversion of fan-beam scans in radio astronomy // *Astrophys. J.* 1967. Vol. 150. P. 427–434.
11. Ramachandran G. N., Lakshminarayanan A. V. Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of convolutions instead of Fourier transforms // *Proc. Nat. Acad. Sci. US*. 1971. Vol. 68. P. 2236–2240.
12. Сизиков В. С. Использование регуляризации для устойчивого вычисления преобразования Фурье // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* 1998. Т. 38, № 3. С. 376–386.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ КОЖИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЛЕЧЕНИИ УГРЕВОЙ БОЛЕЗНИ

А.Е. Пушкарева

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. М.З. Смирнов

Изучена температурная динамика кожи человека при лечении угревой болезни излучением диодного лазера с длиной волны 1450 нм. Проведено математическое и компьютерное моделирование различных схем воздействия. Прослежена динамика изменения температуры и поражения тканей во время, и после обработки.

Введение

Угорь (акне, в быту – прыщ) – воспаление сальной железы, находящейся в коже. Угревая болезнь – хроническое воспаление сальных желез, которое проявляется в постоянном появлении угревой сыпи.

Кожа является полноценным органом, выполняющим более десятка полезных функций. В обеспечении всех функций кожи огромную роль играет кожное сало. Сальные железы, являющиеся источником этого продукта, располагаются в коже, на глубине 200-400 мкм, а их выводные протоки открываются либо прямо на поверхность кожного покрова, либо в волосяные луковицы, откуда растут волосы.

Угри возникают в результате нарушения работы сальных желез. С одной стороны, это нарушение работы может быть связано с повышенной продукцией кожного сала, с другой стороны – закупоркой выводных протоков сальных желез косметическими средствами, пылью или другими веществами.

В той или иной степени угревая болезнь поражает около 80% населения Земли. Поэтому существует множество способов борьбы с ней – это и мази, и очищающие лосьоны, и различные медикаменты, в том числе антибиотики, и др. С недавнего времени угревую болезнь также лечат при помощи воздействия лазерного излучения или излучения импульсной лампы.

На данный момент существует два способа лечения угревой болезни с помощью оптического излучения. Один из них является, по-видимому, чисто термическим и заключается в нагревании протока сальной железы на глубине 200–300 мкм лазерным излучением ближнего ИК-диапазона длин волн. В основном для этой цели в последних исследованиях используется диодный лазер с длиной волны 1450 нм.

Другой способ заключается в воздействии на бактерии *Propionibacterium acnes* (*P. acnes*), которые индуцируют воспаление. Эти бактерии в процессе метаболизма производят порфирины, которые обладают интенсивной полосой поглощения около 410 нм. Воздействие излучения с длиной волны, попадающей в эту полосу, вызывает синглет-триплетные переходы с выделением атомарного кислорода, что приводит к гибели бактерий и окислению окружающих тканей.

В данном исследовании было проведено математическое и компьютерное моделирование термического поражения сальных желез лазерным излучением с длиной волны 1450 нм. Моделирование проводилось на основе теории переноса излучения (в диффузионном приближении) и теории теплопроводности. Были рассмотрены различные схемы воздействия, начиная от единичного импульса без охлаждения и заканчивая последовательностью из четырех импульсов, чередующихся охлаждением, а также прослежена динамика изменения температуры и поражения тканей не только во время, но и после воздействия в течение 0,6 с. Аналогом данного исследования может служить работа [1], где проведен расчет и экспериментальное исследование воздействия на кожу четырьмя импульсами, перемежающимися спреями. Однако в [1] не рассматриваются какие-либо другие возможные схемы обработки кожи и динамика температуры после окончания воздействия последним спреем.

1. Математическая модель

Для расчетов использовалась модель кожи, состоящая из трех слоев – эпидермиса, базального слоя и дермы. Каждый слой имеет определенные оптические и теплофизические характеристики.

Расчет распределения температуры в коже проводился на основе уравнения теплопроводности [2]:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(\vec{r}, t)) + Q(\vec{r})$$

где ρ – плотность, c – теплоемкость, t – время, $\kappa = \alpha \cdot \rho \cdot c$ – теплопроводность, α – температуропроводность, $Q(\vec{r}) = \mu_a \cdot \varphi(\vec{r}) \cdot \frac{E_0}{\tau_p}$ – объемная плотность источников тепла

в среде, μ_a – коэффициент поглощения, $\varphi(\vec{r})$ – полная освещенность в точке $\vec{r} = (x, y, z)$, E_0 – плотность энергии излучения.

Для решения данного уравнения необходимо знать распределение освещенности в среде, которое рассчитывалось при помощи уравнения переноса излучения в диффузионном приближении [3]:

$$\nabla^2 \varphi_s(\vec{r}) - 3\mu_a \mu_{tr} \varphi_s(\vec{r}) + 3\mu_s \mu_{tr} E(\vec{r}, \xi_0) - 3\mu_s g \nabla \cdot (E(\vec{r}, \xi_0) \xi_0) = 0,$$

где $\varphi_s(\vec{r})$ – диффузная составляющая освещенности в точке $\vec{r} = (x, y, z)$, μ_a – коэффициент поглощения, μ_s – коэффициент рассеяния, $\mu_{tr} = \mu_a + (1 - g)\mu_s$ – транспортный коэффициент затухания, $E(\vec{r}, \xi_0)$ – коллимированная освещенность в точке \vec{r} , ξ_0 – направление распространения первичного луча, g – средний косинус угла рассеяния (фактор анизотропии рассеяния).

Для оценки термического повреждения был также проведен расчет интеграла Арениуса [1]:

$$\Omega(t) = \int_0^t \{A \exp(-E_a / RT(\tau))\} d\tau,$$

где $A = 3.1 \cdot 10^{98} \text{ c}^{-1}$ – константа скорости химической реакции денатурации белка, $E_a = 6.28 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$ – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная, $T(\tau)$ – абсолютная температура в каждый момент времени.

Моделирование проводилось с использованием системы математического программирования Matlab и ее приложения для решения дифференциальных уравнений в частных производных Femlab. Была разработана компьютерная программа для расчета температурной динамики кожи при нагреве последовательностью импульсов монохроматического излучения и охлаждении последовательностью спреев.

2. Результаты численного моделирования

Изменение температуры рассматривалось как в пространстве (зависимость от глубины), так и во времени. Как показали исследования, в большинстве случаев максимальная температура достигается на глубине около 200 мкм, поэтому зависимости от времени рассчитывались именно на этой глубине, а также на поверхности кожи.

В результате моделирования было получено, что воздействие единичным импульсом, даже при охлаждении кожи (температура спрея -44°C) до и после облучения, не является селективным, и в большинстве случаев нагрев поверхности кожи превышает температуру на глубине 200 мкм, что нежелательно, либо, в крайнем случае, эти температуры практически равны (рис.1 а).

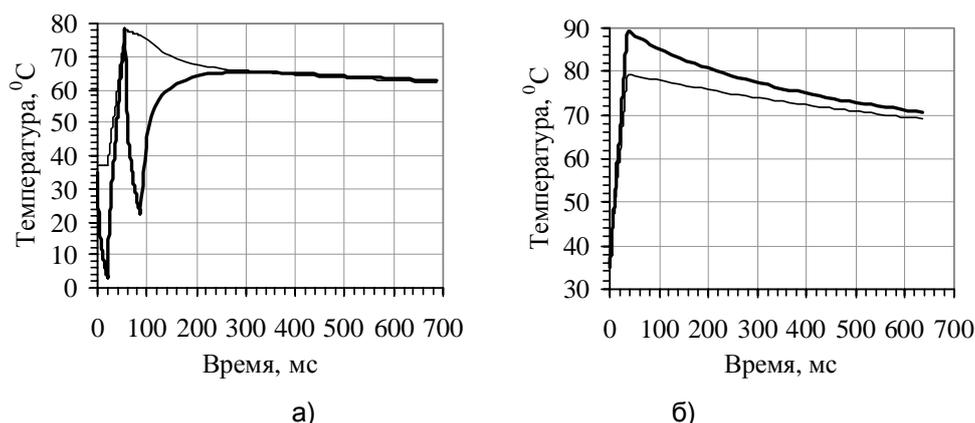


Рис. 1. Зависимость температуры от времени на поверхности кожи (—) и на глубине 200 мкм (---) для одиночного импульса, $\lambda=1450$ нм, $\tau_{и}=36$ мс, $E_{и}=10$ Дж/см²; а) – охлаждение до импульса 20 мс, после – 30 мс, б) – без охлаждения

При сравнении зависимостей, приведенных на рис.1, а и б, можно сделать вывод, что охлаждение кожи до ее облучения позволяет понизить максимальную температуру, достигаемую на поверхности после импульса, однако практически не влияет на температуру более глубоких слоев кожи. Другими словами, предохлаждение помогает повысить селективность обработки и уменьшить ее травматичность. Воздействие спреем после облучения позволяет ускорить процесс охлаждения кожи как на поверхности, так и в глубине за счет высокого градиента температур. Однако термическое повреждение на глубине во время охлаждения все же продолжает возрастать и стабилизируется только после полного окончания обработки (рис. 2).

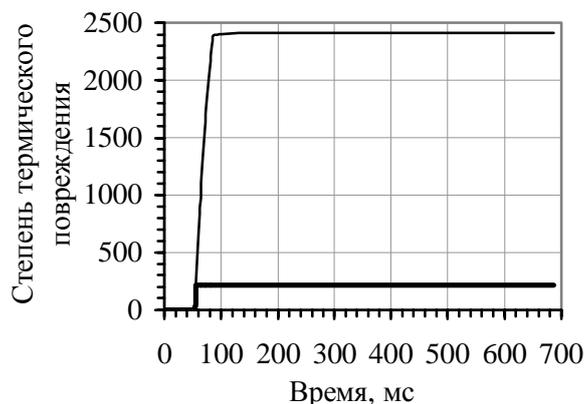


Рис. 2 Зависимость степени термического повреждения от времени на поверхности кожи (—) и на глубине 200 мкм (---) для одиночного импульса, $\lambda=1450$ нм, $\tau_{и}=36$ мс, $E_{и}=10$ Дж/см², охлаждение до импульса 20 мс, после – 30 мс.

В отличие от обработки одним импульсом, воздействие на кожу последовательно из двух импульсов может быть достаточно селективным при подборе определенных параметров – длительности охлаждения и облучения. Один из возможных вариантов приведен на рис. 3.

Видно, что разделение импульса на два и охлаждение между ними позволяет повысить безопасность обработки, поскольку температура поверхности кожи остается всегда меньше, чем на глубине 200 мкм. Увеличение длительности последнего спрея позволяет еще больше ускорить охлаждение кожи после процедуры, тем самым, снижая травматичность воздействия.

Также можно проследить динамику температуры при обработке тремя и четырьмя импульсами, чередующимися спреями (рис. 4, а и б, соответственно).

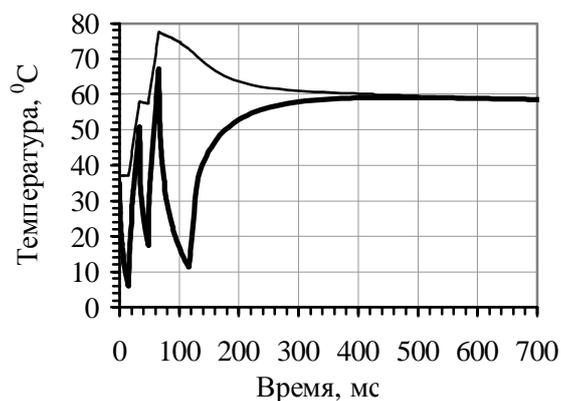


Рис. 3. Зависимость температуры от времени на поверхности кожи (—) и на глубине 200 мкм (---) для следующего способа обработки: два импульса, длительностью каждый 18 мс, $E_{и}=5$ Дж/см², охлаждение до и между ними 15 мс, после - 50 мс, $\lambda=1450$ нм.

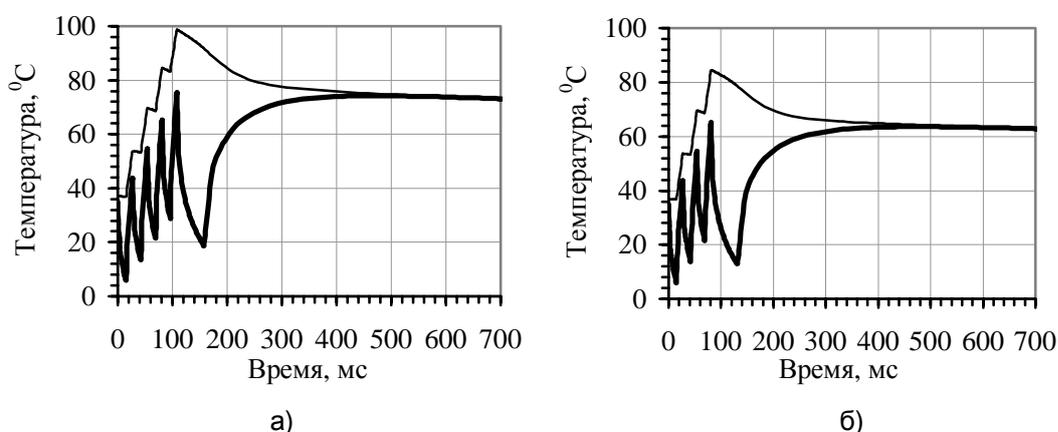


Рис. 4. Зависимость температуры от времени на поверхности кожи (—) и на глубине 200 мкм (---) для следующего способа обработки: охлаждение до и между импульсами 15 мс, после - 50 мс, длительность каждого импульса 12 мс, $E_{и}=4$ Дж/см², $\lambda=1450$ нм; а) – три импульса, б) – четыре импульса.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что увеличение количества импульсов повышает безопасность воздействия при подборе определенных параметров импульса и охлаждения. От числа импульсов зависит также максимально достигаемая температура.

Заключение

В работе было проведено математическое и компьютерное моделирование термического поражения сальных желез лазерным излучением с длиной волны 1450 нм. Рассмотрены различные схемы воздействия, а также прослежена температурная динамика кожи во время обработки и после нее в течение 0,6 с. Основываясь на полученных зависимостях, можно сделать вывод, что для обеспечения селективности воздействия необходимо как минимум два импульса. На практике параметры обработки следует выбирать в зависимости от возможностей прибора, используемого для данной процедуры.

Литература

1. Paithankar D.Y., Ross V.E., Saleh B.A., Blair M.A., Graham B.S. Acne treatment with a 1450 nm wavelength laser and cryogen spray cooling // *Lasers in surgery and medicine*. 2002. Vol. 31. p. 106-114
2. Niems M.H. *Laser – tissue interactions: fundamentals and applications*. Berlin: Springer, 1996.
3. Star W.M. *Optical-thermal response of laser-irradiated tissue*, edited by A.J. Welch and M.J.C. van Gemert, Plenum Press, New York, 1995.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ

Е.С. Такмакова

Научный руководитель – к.т.н., доц. В.А. Трофимов

В статье приводится обзор методов измерения внутриглазного давления. Рассмотрены схемы построения тонометров, их достоинства и недостатки.

Введение

Развитие техники медико-биологических исследований предъявляет к используемым при этом приборам особые требования. Наряду с основными параметрами, например, такими, как точность, быстродействие, информативность, предъявляются повышенные требования к объективности и удобству проведения измерений, наглядности отображения информации, компактности и снижению себестоимости измерительной техники, неразрушающему воздействию и т.п. Показательным примером могут служить требования к измерительной технике, применяемой в офтальмологии. Одной из актуальнейших задач в этой области медицины является борьба с широко распространенным и коварным заболеванием – глаукомой. Установлено, что именно эта болезнь является основной причиной утраты зрения человечеством. Коварство же этого заболевания заключается в том, что успех лечения существенно зависит от ранней диагностики заболевания. Но на ранней стадии, как правило, единственным симптомом, характеризующим заболевание, является внутриглазное давление (ВГД). Эта причина определяет необходимость массового измерения ВГД всем людям, превысившим сорокалетний возраст. Для успешного проведения такого рода работы необходима техника, обладающая указанными качествами, обеспечивающая высокую производительность и низкую себестоимость измерений.

Приведенные выше требования к параметрам приборов могут быть реализованы при использовании оптических методов измерений. Эти методы позволяют успешно сочетать в одном приборе такие качества, как бесконтактность и информативность, высокую точность и производительность измерений.

Целью настоящей статьи является обзор существующих методов измерения ВГД.

1. Контактные методы

Контактные методы измерения ВГД являются наиболее распространенными как в нашей стране, так и за рубежом. Их можно разделить на две группы – импрессионные и аппланационные.

Импрессионный метод измерения ВГД (рис. 1) заключается в том, что на глаз пациента 1 устанавливают полый цилиндр 2, кривизна основания которого соответствует форме роговицы [1]. Внутри цилиндра находится поршень 3, который может свободно перемещаться вдоль его оси. Величина ВГД обратно пропорциональна глубине вдавливания поршня в глаз.

Аппланационный метод измерения ВГД (рис. 2) заключается в измерении площади уплощения (аппланации) роговицы глаза 1 под весом специального плоского грузика 2, устанавливаемого на роговицу [1]. Величина ВГД обратно пропорциональна площади уплощения роговицы.

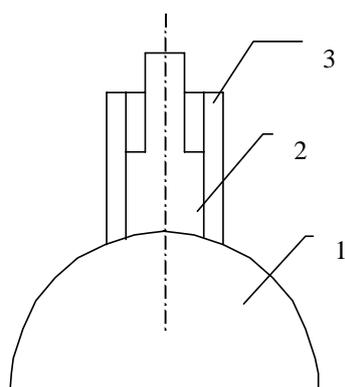


Рис. 1. Схема импрессионного тонометра

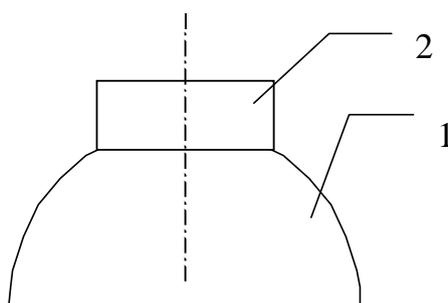


Рис. 2. Схема аппланационного тонометра

Существует большое количество тонометров и их различных модификаций [2], но принцип контактного измерения ВГД у всех приборов остается неизменным.

Всем контактным методам измерения ВГД присущи следующие недостатки:

- в процессе проведения измерения ВГД сам тонометр повышает ВГД на величину, зависящую от веса тонометра;
- необходимость анестезии глаза, вероятность травмирования эпителии роговицы;
- точность измерений ВГД зависит от опыта и квалификации оператора.

2. Бесконтактные методы

В начале 70-х годов за рубежом появился аппланационный тонометр, позволяющий измерять ВГД без физического контакта прибора с поверхностью роговицы глаза [3,4].

В этом бесконтактном аппланационном тонометре уплощение роговицы производится с помощью управляемого воздушного импульса с линейно возрастающим давлением. Момент уплощения определяется специальной следящей системой, воспринимающей свет, отраженный от поверхности роговицы. Промежуток времени от начала действия пневматического импульса до аппланации роговицы пропорционален ВГД.

Тонометр состоит из трех систем: пневматической системы, следящей системы и оптико-электронной системы настройки.

Пневматическая система предназначена для создания пневматического импульса с линейно-возрастающим во времени давлением. При действии импульса на роговицу радиус ее кривизны постепенно увеличивается, затем происходит уплощение, и далее поверхность роговицы становится слегка вогнутой. После прекращения действия импульса роговица восстанавливает свою естественную форму. Следящая система осуществляет непрерывный контроль кривизны поверхности роговицы при пневматическом воздействии на нее. Оптико-электронная система настройки предназначена для полу-

чения нужного положения поверхности роговицы относительно пневматической и следящих систем.

Процедура измерения ВГД заключается в следующем.

Пациента просят зафиксировать взгляд на мишени с красной точкой. Оператор производит ручную настройку прибора до появления красной точки мишени в центре прицельного круга. Затем оператор отжимает кнопку, и инфракрасный светодиод генерирует световой импульс. Если на фотоприемнике появится сигнал, то будет инфицирован воздушный импульс с линейно возрастающим во времени давлением. В противном случае импульс не появится, а оператор должен будет изменить настройку прибора.

Под действием воздушного импульса кривизна роговицы постепенно уменьшается. Момент уплощения соответствует максимальному сигналу в следящей системе. Измеряемым параметром является время от начала действия воздушного импульса до появления максимального сигнала на фотоприемнике. Это время прямо пропорционально величине ВГД.

Бесконтактные аппланационные тонометры испытывались в различных глазных клиниках [5–9] и показали удовлетворительное совпадение измеренных значений ВГД с результатами измеренных известными контактными тонометрами.

Отмечают следующие достоинства бесконтактных тонометров:

- измерения ВГД производятся бесконтактно и безболезненно;
- не требуется анестезия глаза и отсутствует риск занести инфекцию на роговицу;
- процедура измерения ВГД несложна, легко выполнима оператором средней квалификации.

Вместе с тем отмечаются также и недостатки:

- бесконтактные тонометры могут применяться только для глаза с чистой и гладкой роговицей, который способен видеть и зафиксировать мишень, измерения ВГД у глаз с помутненной роговицей, рубцами и другими дефектами затруднено, а иногда невозможно;
- затруднено измерение ВГД со значительной близорукостью и дальнозоркостью, так как невозможно четко увидеть мишень даже при использовании корректирующих линз.

Когерентное детектирование света (фотосмещение, оптическое гетеродирование, фотоэлектрическая регистрация и т.п.) основано на когерентном сложении двух световых пучков, один из которых условно называется опорным, а второй – информационным [10]. В процессе измерения параметры опорного пучка остаются неизменными, а у информационного хотя бы один из них изменяется в соответствии с измеряемой величиной.

Анализ научных публикаций, содержащих опыт использования когерентного детектирования для целей бесконтактного измерения ВГД, позволяет выделить две из них.

В первой [11] сообщается о возможном использовании для этих целей двухлучевой интерферометрии. В качестве примера рассмотрена схема, аналогом которой является интерферометр Майкельсона (рис. 3). Излучение когерентного источника 1 после взаимодействия со светоделителем 2 расщепляется на два луча I и II равной интенсивности. Один из лучей I при нормальном падении на плоское зеркало 3 отражается и вновь проходит светоделитель 2. Вторым луч II после светоделителя 2 падает нормально на поверхность роговицы глаза пациента 4. Отражаясь от поверхности глаза 4 и светоделителя 2, луч II складывается с лучом I и интерферирует. При этом в поле зрения оптической системы 5, в зависимости от условий юстировки, наблюдается система интерференционных полос либо колец. Фотоприемник 7 с установленной перед ним диафрагмой 6 преобразует пространственное распределение интенсивности в интерферен-

ционной картине во временную зависимость фототока. Для осуществления преобразования в интерферометре, одним из элементов которого является глаз пациента, оптическая разность хода изменяется по линейному закону. Это изменение возникает в результате деформации роговицы глаза пневматическим импульсом от генерирующего устройства. При неизменных условиях для различных пациентов величина деформации поверхности глаза будет зависеть от внутриглазного давления, а, следовательно, величина изменения разности хода в интерферометре будет пропорциональна измеряемой величине ВГД. Предполагается за счет сокращения времени измерения минимизировать влияние факторов, снижающих точностные характеристики метода. Это, в сочетании с объективностью результатов измерений и отсутствием недостатков, свойственных контактными методами, позволяет прогнозировать широкое использование устройств.

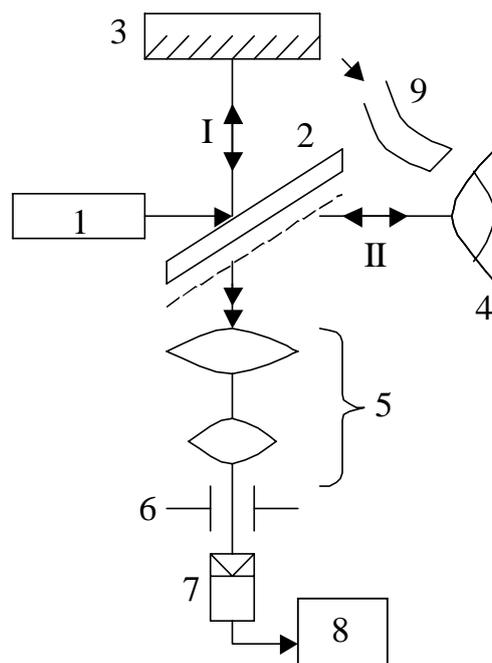


Рис. 3. Схема тонетра на основе интерферометра Майкельсона

Во второй публикации сообщается о бесконтактном методе измерения ВГД, где, как и в первом случае, предлагается использовать двухлучевой интерферометр. Здесь одной из отражающих поверхностей интерферометра также служит глаз пациента. Различие состоит в используемой схеме интерферометра, аналогичной случаю наблюдения колец Ньютона. Свет от когерентного источника излучения 1, пройдя полупрозрачные зеркала 2 и 3, отражается роговицей глаза 5. Оптическая система 6 позволяет наблюдать интерференцию двух световых волн, одна из которых отражается от зеркала 3, а другая от глаза пациента. Калиброванная аппланация роговицы осуществляется пневматическим импульсом, генерируемым устройством 4. Аналогично рассмотренному выше, диафрагма 7, фотоприемник 8 и электронное устройство 9 позволяют осуществить преобразование информации в форму, удобную для восприятия.

Таким образом, можно прийти к заключению, что когерентные свойства лазерного излучения могут быть использованы в бесконтактных методах измерения ВГД. Отсутствие действующих конструкций приборов, построенных на основе когерентного детектирования, связано с недостаточностью информации о свойствах лазерного излучения, отраженного биологическими тканями, и отсутствием детально разработанной методики его регистрации.

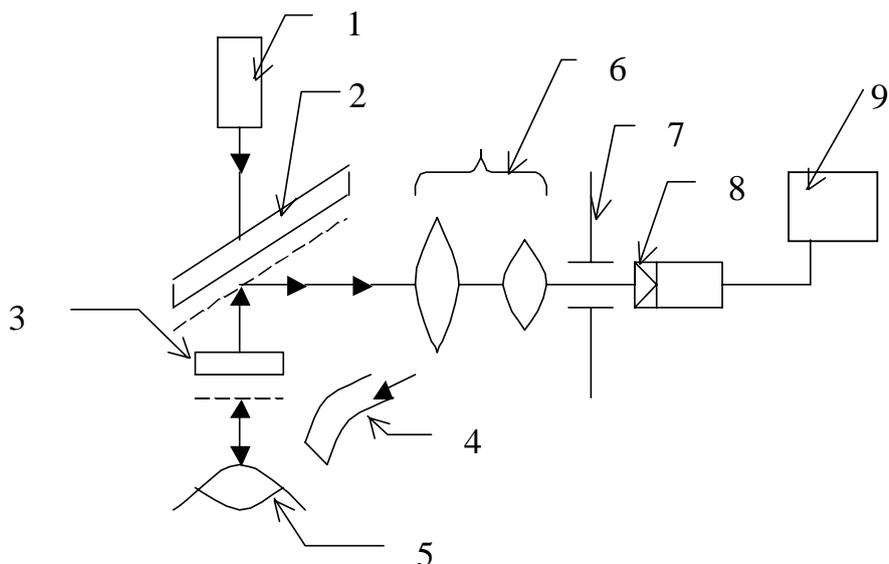


Рис. 4. Схема тонометра на основе метода наблюдения колец Ньютона

3. Пневмооптические методы измерения ВГД

В основе пневмооптических методов измерения ВГД лежат оптические измерения деформаций роговицы глаза под действием пневматического (либо акустического) импульса [12].

При однолучевом методе роговицу глаза в простейшем приближении можно представить как тонкую пленку, закрепленную на круглом отверстии с жесткими краями и находящуюся под действием сил давления и натяжения. Проводя измерения радиуса кривизны такой пленки R , коэффициента натяжения пленки γ , давления между вогнутой P и выпуклой P_a поверхностями пленки, находят величину внутриглазного давления.

При двухлучевом методе по результатам измерений углов падения и отражения лучей света, а также их изменении под действием внешнего давления на пленку ("роговицу") рассчитывается величина приведенного ВГД.

Сущность оптических методов измерения ВГД состоит в использовании разного рода оптических устройств для бесконтактного контроля изменений радиуса кривизны либо величины прогиба роговицы глаза под воздействием пневматического или акустического сигналов. Используемый метод оптической локации движущихся поверхностей рассеивающих свет применяется в данном методе измерения ВГД. К сожалению, наиболее точные интерферометрические методы контроля перемещений затруднительно использовать при работе с природными, диффузно рассеивающими свет, поверхностями (к ним относится и роговица глаза). Среди известных оптических локационных методов контроля смещения поверхности роговицы глаза наиболее удобен в рассматриваемой задаче измерения ВГД метод фазовой светодальнометрии с модуляцией в СВЧ-диапазоне.

Заключение

В работе представлен анализ методов и средств измерения внутриглазного давления. Выявлены положительные качества и недостатки, используемых в настоящее время методик.

Показаны принципы построения и работы датчиков измерения величины внутриглазного давления.

Литература

1. Нестеров АЛ, Бунин А.Я., Кацнельсон А.А. Внутриглазное давление. Патология и физиология. М., Наука, 1974. 230с.
2. E. Weigelin, K. Jessen. Tonometereichung. // Klin.Mbl. Augenheik. 1981. №179. P. 1–12
3. B. Grolman. US Patent 3 585849. Method and apparatus for measuring introocular pressure, June 22, 1971.
4. M. Forbes, G. Piko, B. Grolman. A noncontact applonation tonometer. // Arch.Ophthalmol. 1974. V.91, № 2, p.143-140
5. A.A. Yucel, J.S. Sturmer, B. Gloor. Vergleichende tonometrie mit dem Keeler Lnft-Impyls non kontakttonometer Goldmann // Klin.Mbl. Augenheik. 1990. №197. P. 329–334
6. M. Graf, O.F. Hoffmann. Reproducibility of NCT results comparasion with the Goldmann applanation tonometer. // Klin. Mbl. Augenheik, 1992, N 6, p.678
7. B. Burman. Comparisionbetween the NCJ and Mackay-Marg tonometer. //American J. Of Optometry and Physiological Optics. 1974. № 1. P. 34–38.
8. S. Wettenberg. Effect ofcoresking distence on intraocular plessuse as measused with the NCJ. // American J. Of Optometry and Physiological Optics. 1974. V. 5. № 5. P. 325–330.
9. J. Draeger, K. Jessen, G.Haselmann. Klinische und experimentelle untersuehungen mit dem Non-Contact Tonometer. // Klin. Mbl. Augenheik. 1975. №167. P.27–34
10. Росс М. Лазерные приемники. -М.: Мир,1969
11. Крылов К.И., Майоров С.А., Сомов Е.Е., Трофимов В.А. Способ измерения внутриглазного давления. АС СССР 254001. 1968.
12. Дмитриев А.Л., Нагибин Ю.Т., Прокопенко В.Т., Сальников В.В. Бесконтактный способ измерения внутриглазного давления и бесконтактный тонометр. Приоритет от20.07.94. Положительное решение о выдаче патента на изобретение РФ от 21.06.95. Заявка №94- 027540/14.

ОРИГИНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ ВНУТРИ ПОЛОСТИ НОСА

А.А. Рассадина

Научные руководители – д.т.н., проф. Г.Н. Лукьянов, д.м.н., проф. В.И. Усачев

Представлена пластиковая модель, предназначенная для исследования движения воздушных потоков в полостях носа. Публикуются данные по распределению скоростей воздушных потоков в различных частях модели.

Введение

По мнению оториноларингологов [1], в основе большинства болезней уха, горла или носа лежат заболевания носа. Болезни носа сопровождаются нарушением носового дыхания или его отсутствием. Возможность своевременного определения нарушения дыхательной функции носа (ДФН) позволяет выявить инфекционные болезни, предотвратить развитие патологических состояний носа. Развитие методов ранней диагностики ДФН невозможно без понимания динамики движения воздушных потоков внутри полости носа. В настоящее время не существует единой теории относительно пути распространения воздушных потоков внутри носа [2–4]. Различные мнения ученых относительно пути распространения воздуха в носу вызваны его сложным анатомическим строением и несовершенством применяемых для исследования методов и приборов.

При исследовании дыхания особое внимание уделяется созданию искусственных моделей носа. Они наглядны и позволяют проникнуть в любую внутреннюю область носа, что невозможно при таких исследованиях у людей и животных. При создании таких моделей [2,7] до сих пор не учитывалось симметричное строение носа, часто игнорировались многие особенности внутренней архитектоники носа (носовые пазухи, раковины, наличие перегородки и др.). В качестве исследуемой среды использовались жидкости, красители, табачный дым, но не чистый воздух, тогда как среда, используемая при моделировании носового дыхания, играет исключительно важную роль при воссоздании действительного характера движения воздушных масс в носу.

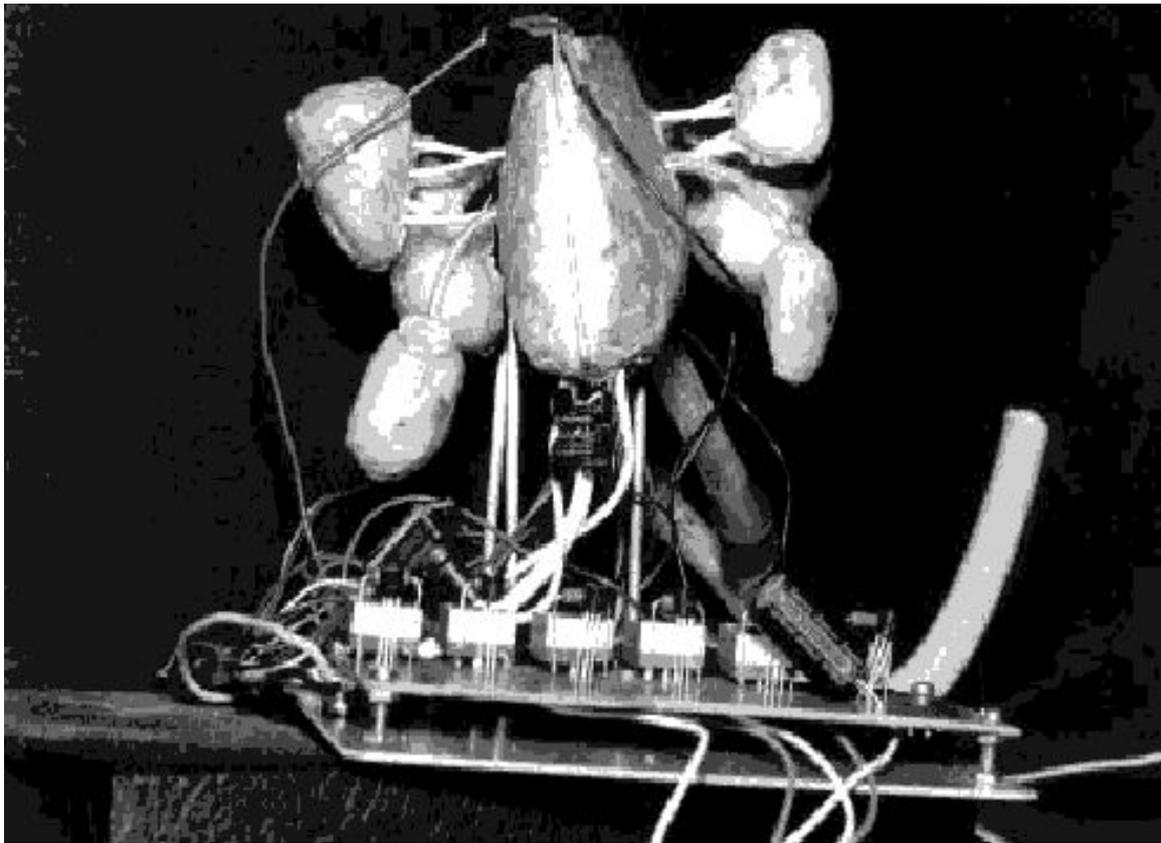
Эти решения были вызваны желанием авторов моделей визуализировать процесс дыхания для его дальнейшего детального описания.

Для представленной в этой статье модели такая визуализация не требуется. Вместо глаза и видеокамеры используются миниатюрные датчики СТ1-18, работающие в режиме термоанемометров. Датчики расположены в разных областях модели и регистрируют локальные изменения скорости воздушного потока от времени в этих областях. По величине скорости воздушного потока при дыхании и характеру ее изменения во времени можно судить о процессах массообмена в носу.

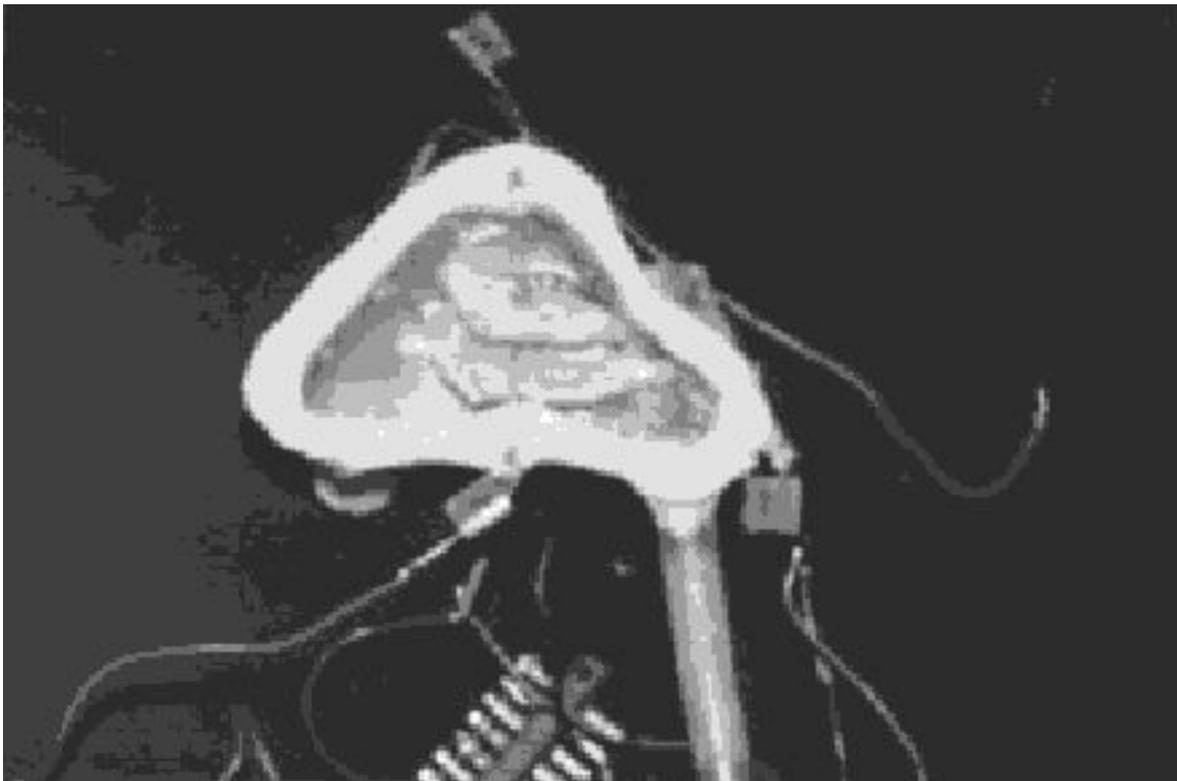
Миниатюрные размеры датчиков не препятствуют движению воздушных масс внутри модели. Поэтому отличительной особенностью нашей модели являются полное анатомическое соответствие внутреннему носу, соблюдение симметричности его строения (т.е. наличие левой и правой половин носа и перегородки).

Оригинальная модель носа

Для воссоздания картины движения воздушных масс в полости носа нами была разработана оригинальная натурная модель внутреннего носа и прилегающих к нему пазух, полностью повторяющая анатомическое строение, и выполненная в масштабном соответствии носу (рис.1).



а



б

Рис. 1. Общий вид натурной модели носа человека (а) и ее внутренняя правая половина (б)

Модель состоит из двух основных форм, выполненных из пластика и имитирующих левую и правую половины носа. Соединенные формы разделены внутренней перегородкой. На латеральной поверхности форм, в соответствии с анатомией носа, воссозданы раковины, разделяющие полость носа на четыре носовых хода: общий –

между перегородкой носа и носовыми раковинами, верхний – между верхней и средней носовыми раковинами, средний – между средней и нижней носовыми раковинами, и нижний – нижней носовой раковиной и нижней стенкой полости носа. Восемь дополнительных пластиковых форм, соединенных посредством трубок с формами половинок носа, представляют парные гайморовы, лобные, клиновидные и решетчатые пазухи. Для создания миниатюрных ячеек решетчатого лабиринта (решетчатых пазух) использовалась гибкая пластиковая лента. Большие формы полости носа через тройник соединены с гофрированной трубкой, заменяющей трахею. Поток вдыхаемого и выдыхаемого воздуха формируется легкими человека, дышащего через гофрированную трубку ("трахею").

Парность форм, соответствие их натуральным размерам, наличие раковин и носовых пазух выгодно отличают модель от других [2, 7]. При необходимости модель можно легко разобрать и восстановить.

Другая отличительная особенность экспериментальной установки заключается в наличии сверхминиатюрных датчиков (СТ1-18), позволяющих определять скорость воздушного потока в различных частях модели, не препятствуя движению воздушных струй. Датчики снабжены выводами, соединенными с аналоговой схемой, которая, в свою очередь, подключена к АЦП (плата L154) и компьютеру. Программа, написанная на языке С, позволяет синхронно отображать показания датчиков на экране монитора в режиме реального времени. Одновременно производится запись результатов в файл.

Основное назначение модели – исследование процессов массообмена в полости носа.

Исследование ДФН на модели

При проведении экспериментального исследования использовалось восемь миниатюрных датчиков СТ1-18, расположенных в каждой из полостей следующим образом (рис. 2.):

- на входе в носовые полости, со стороны ноздрей (1);
- в среднем носовом ходу (2);
- в общем носовом ходу (3);
- на выходе в хоаны (4).

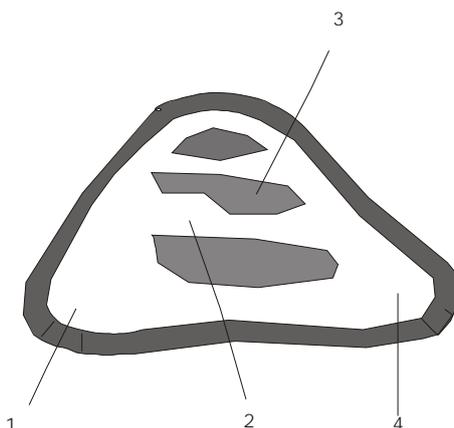


Рис. 2. Расположение термоанемометров внутри полости носа:
1 – на входе в носовые полости со стороны ноздрей, 2 – в среднем носовом ходу, 3 – в общем носовом ходу, 4 – на выходе в хоаны

Опыты по воссозданию носового дыхания проводились на модели в режиме дыхания через обе ноздри.

На рис. 3 представлены показания датчиков в процессе экспериментальных исследований.

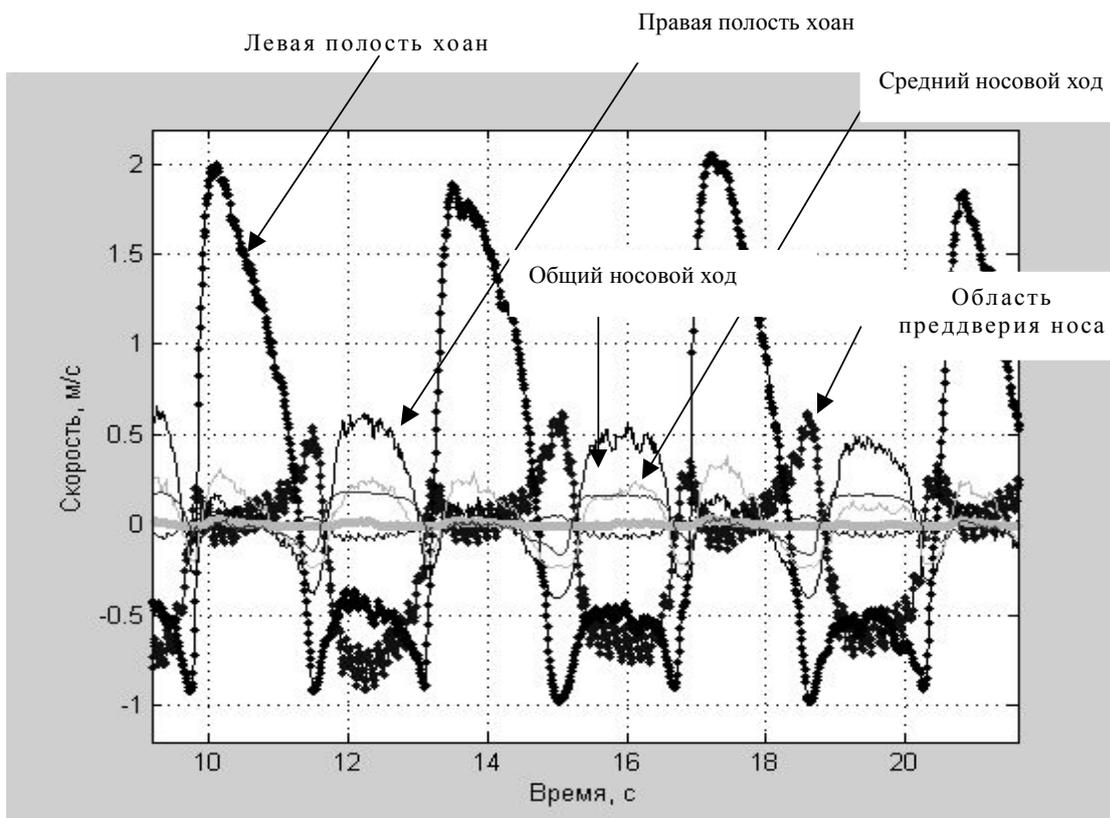
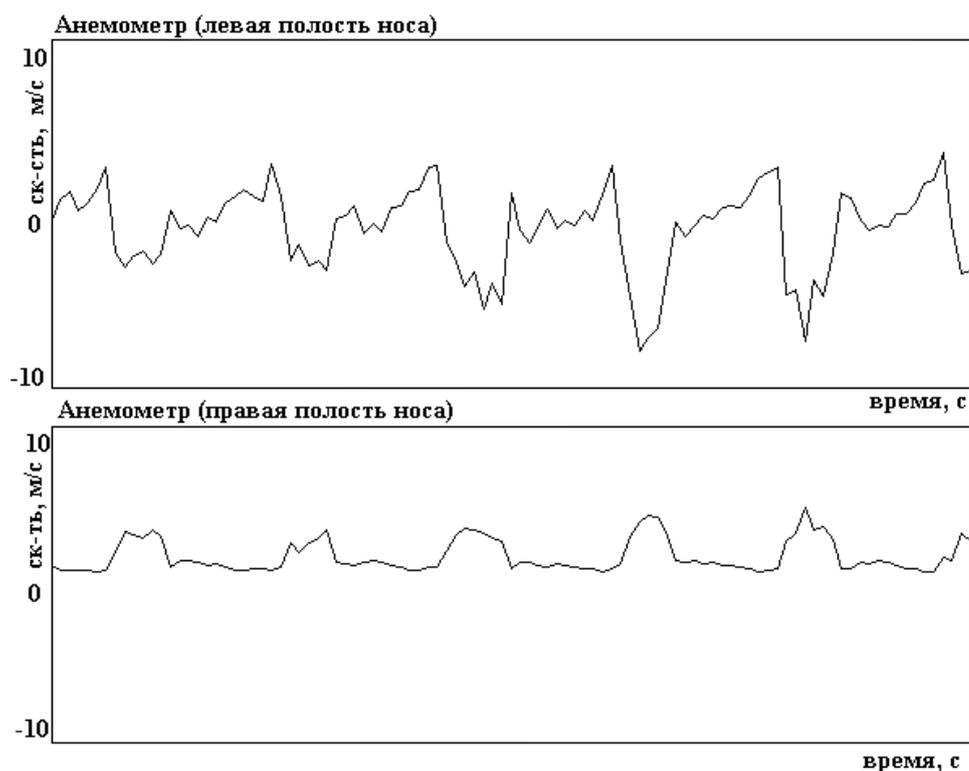


Рис. 3. Динамическая зависимость изменения скорости воздушного потока в различных частях полости модели

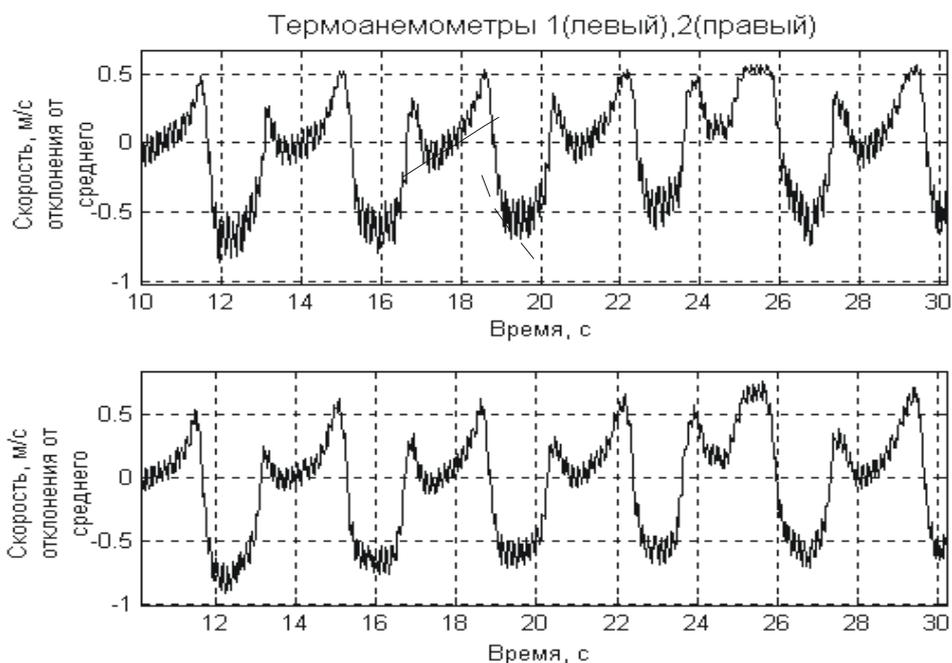
Нами было осуществлено частичное сравнение этих данных с теми результатами, которые были получены при диагностике пациентов оригинальным ринопневмометром, разработанным на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Этот прибор позволяет определять скорость воздушного потока, давление и температуру непосредственно в полости носа, в области его преддверия, без нарушения естественного дыхания человека. Сохранение естественного дыхания при диагностировании достигается благодаря использованию в качестве датчиков скорости вышеупомянутых миниатюрных датчиков СТ1-18. Два датчика СТ1-18 расположены на клипсе, которая крепится на перегородку носа. Скорость воздушного потока определяется непосредственно в полости носа. Сверхминиатюрные размеры датчиков (диаметр – не более 0.5 мм) не препятствуют движению воздуха при дыхании.

Если сравнить график на рис.4б с показаниями, полученными при использовании ринопневмометра во время диагностики пациентов (рис.4а), то видно, что графики изменения скорости воздушного потока от времени у диагностируемого пациента и у модели практически соответствуют. На обоих графиках при вдохе скорость положительна, а при выдохе отрицательна. Скорость постепенно возрастает как при вдохе (сплошная линия 1), так и при выдохе (пунктирная линия 2). Также установлено соответствие в амплитуде и значениях измеренных величин.

Вместе с тем при сравнении графиков для модели виден некоторый "рафинированный" характер, что можно объяснить наличием у модели лишь внутреннего анатомического соответствия и отсутствием некоторых физиологических особенностей (например, слизистой оболочки). Несмотря на указанный недостаток, общее соответствие показаний на модели и в полости носа, парность исследуемой структуры позволяют нам использовать модель для дальнейших экспериментальных исследований.



а



б

Рис. 4. Значения зависимости скорости воздушного потока от времени, полученные при ринологическом исследовании (а), и на модели (б): а) показания ринопневмометра, б) показания датчиков скорости на модели

Обобщим полученные на модели экспериментальные зависимости.

На рис.3 показана динамическая зависимость движения воздушного потока в различных частях левой и правой полостей модели, а именно – в областях преддверия носа, хоан, среднего и общего носовых ходов. Здесь положительное значение скорости соответствует вдоху, отрицательное – выдоху. Согласно рис.3, при вдохе значения скорости вдыхаемого воздуха в общем и среднем носовых ходах примерно одинаково.

Однако при выдохе большая часть воздуха идет через средний носовой ход, там происходит увеличение скорости выдыхаемого воздуха. В области общего носового хода скорость несколько меньше, чем при вдохе. Скорость воздушного потока в области хоан при вдохе гораздо больше, чем в области преддверия носа, или в любой другой области. При выдохе ее значение практически совпадает со скоростью в области преддверия носа.

Исследования показали, что при вдохе воздух равномерно распределяется между средним и общим носовыми ходами. При выдохе большая часть воздуха идет через средний носовой ход. Средний носовой ход играет исключительно важную роль в регуляции носового дыхания. От степени его открытости зависит общее состояние ДФН. Данные проведенного исследования на модели совпали с [4].

Заключение

В работе представлена оригинальная модель внутреннего носа, предназначенная для исследования процесса дыхания. В качестве рабочей среды используется воздух. ДФН на модели определяется по графическим зависимостям скорости воздушного потока от времени в различных областях модели. Исследования дыхания на модели показали исключительно важную роль среднего носового хода для регуляции процессов дыхания.

Литература

1. Гофман В.Р., Киселев А.С., Герасимов К.В. Диагностика носового дыхания. СПб: Контур-М, 1994 С.93
2. Сагалович Б.М. Физиология и патфизиология дыхательных путей. М.: Медицина, 1964 С.327
3. Пискунов Г.З. Пискунов С.З. Клиническая ринология. - М.: Миклош, 2002 - 390 С.
4. Оторинология. Учебник. Киселев А.С. и др. Под ред. Солдатова И.Б., Гофмана В.Р. Воен.-Мед. Акад. СПб, 2000
5. Кротов А.Ю. Современные методологические подходы при оценке функции носового дыхания// Вестн. оториноларингологии. 1998 - 4. - С.51-52
6. Физиология человека. В 3-х томах. Т.2. Пер. с англ./ Под ред. Шмидта Р. и Тевса Г. - М.: Мир, 1996. 313с., С.567-603
7. G. Mlynski, S.Grutzermacher, S.Plontke, Barbara Mlinski, C.Lang. Correlation of nasal morphology and respiratory function/Rhinology, 39, 197-201, 2001

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЖИРОВОЙ ТКАНИ

О.А. Смолянская

Научный руководитель – к.ф.-м.н, доц. А.В. Беликов

В настоящей работе исследовались флуоресцентные свойства образца жировой ткани человека и их изменения в диапазоне температур от 4 до 60°C. Было обнаружено, что спектр флуоресценции жировой ткани лежит в видимом диапазоне. Максимумы флуоресценции соответствуют длинам волн: 460, 510, 540 и 590 нм, из них самый сильный максимум – на длине волны 510 нм. Интенсивность флуоресценции жировой ткани уменьшается со временем хранения. Также было показано, что при охлаждении образца от 36 до 4°C интенсивность флуоресценции повышается. При циклическом охлаждении и нагревании образца жировой ткани наблюдается эффект гистерезиса интенсивности флуоресценции на длине волны 510 нм.

Введение

Жировая ткань в среднем составляет до 16 % веса тела взрослого человека [1]. Ее положительная функция заключается, во-первых, в том, что она используется организмом как энергетическое депо (при голодании количество жира в клетках уменьшается, при усиленном питании увеличивается), а во-вторых, жировая ткань играет роль защиты от механических повреждений и выполняет функцию теплоизоляции. При сохранении нормального гормонального баланса поддерживается соответствие между процессами мобилизации и отложения жира; при нарушении этого баланса возникают патологические изменения – ожирение или похудание. При ожирении прослойки жировой ткани могут появляться не только между органами, но и внутри них, замещая собой собственную ткань [1–2].

В экономически развитых странах, в среднем, каждый третий житель имеет массу тела, превосходящую максимально допустимую [2–3]. Никакой другой болезнью люди не болеют так часто, как ожирением. Удручает еще и то, что в большинстве стран частота заболевания ожирением неуклонно растет. Ученые заключают, что развитые страны имеют дело с эпидемией ожирения. В этих странах ожирение стало серьезной общественной проблемой здоровья, которая приводит к развитию многих хронических заболеваний. Абсолютно точно доказана связь между избытком веса и такими заболеваниями, как ишемическая болезнь сердца, гипертоническая болезнь, сахарный диабет, злокачественные опухоли, желчно-каменная болезнь [3]. У половины больных ожирением наблюдается повышение артериального давления.

К сожалению, в настоящее время в литературе содержится крайне мало информации о физике взаимодействия излучения с жировой тканью человека. Отсутствие подобной информации сдерживает разработку и создание новых медицинских технологий, направленных на предотвращение или лечение ожирения. С этой точки зрения исследование оптических свойств жировой ткани и их изменения под действием температуры и излучения представляет значительный интерес.

Материал и методы

В настоящей работе исследовалась подкожная жировая ткань. Сначала делался срез жировой ткани диаметром 1 см у людей в возрасте 40–50 лет. Жировая ткань транспортировалась к экспериментальной установке в специальной пластмассовой закрытой кювете с физиологическим раствором. Она препятствовала теплообмену с окружающей средой. Кювета помещалась в термос с водой. Температура в термосе поддерживалась на уровне 36 °C. Время от изъятия до эксперимента составляло 30 мин, из которых 20 мин уходило на транспортировку и 5–10 мин – на подготовку образца. Жировая ткань во время эксперимента хранилась в физиологическом растворе в термосе

при температуре 3 °С. От жировой ткани скальпелем отделялся фрагмент толщиной 1 мм и диаметром 5 мм: первый раз через 30 мин от момента изъятия из организма, затем через 2 часа, потом через 5 часов и последний раз – через 24 часа от момента изъятия. В зависимости от этого параметра жировая ткань обозначалась соответственно: тип *I*, тип *II*, тип *III* и тип *IV*. Фрагмент жировой ткани помещался в стеклянную кювету, которая устанавливалась перед 10^x объективом люминесцентного микроскопа (ЛЮМAM P8, ЛОМО, см. рис. 1). Источником света служила ртутная лампа (ДРШ 250-3). Светофильтром УФС-6 выделялась линия ртутной лампы 365 нм. Отраженный и рассеянный свет отделялись запирающим светофильтром – склейкой из стекол ЖС3 и БС8. Флуоресценция измерялась в диапазоне длин волн 400–700 нм с разрешением 10 нм. Образцы сначала охлаждали с постоянной скоростью (1-2 °С/мин) от 36 до 4 °С, затем нагревали от 4 до 60 °С. Температура жировой ткани во время эксперимента измерялась посредством терморпары, помещенной непосредственно внутрь образца. Исследовалась динамика интенсивности флуоресценции жировой ткани от температуры и от времени с момента извлечения из организма. Полученные данные нормировались на максимальное значение, в результате чего получилась зависимость интенсивности флуоресценции от температуры в относительных единицах.

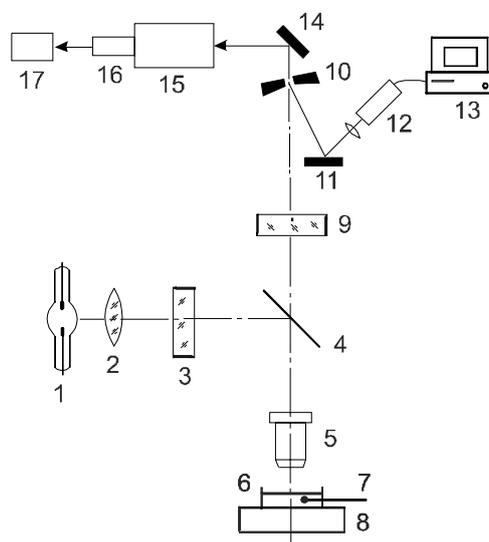


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса: 1 - ртутная лампа; 2 - линза; 3 - светофильтр возбуждения; 4 - светоделительная пластинка; 5 - объектив микроскопа; 6 - кювета с биообъектом; 7 - терморпара; 8 - система нагревания/охлаждения; 9 - «запирающий» светофильтр; 10 - сферическое зеркало зондовой системы; 11, 14 - плоские зеркала; 12 - видеокамера; 13 - РС/АТ; 15 - система интерференционных светофильтров; 16 - фотоприемник; 17 - вольтметр

Результаты и их обсуждение

Экспериментально обнаружено, что жировая ткань обладает способностью флуоресцировать. Полученный в настоящей работе спектр флуоресценции жировой ткани представлен на рис. 2. Липиды из подкожной клетчатки человека *in vitro* флуоресцируют в видимой области спектра. Максимумы флуоресценции соответствуют длинам волн: 460, 510, 540 и 590 нм. Из них самый сильный максимум – на длине волны 510 нм. По всей видимости, флуоресценция жировой тканей в видимой области спектра вызвана наличием в клетках окисленной формы флавопротеинов НАДФН с максимумом в области 530 нм и восстановленной формы пиридиннуклеотидов НАДН с максимумом в области 455 нм [4].

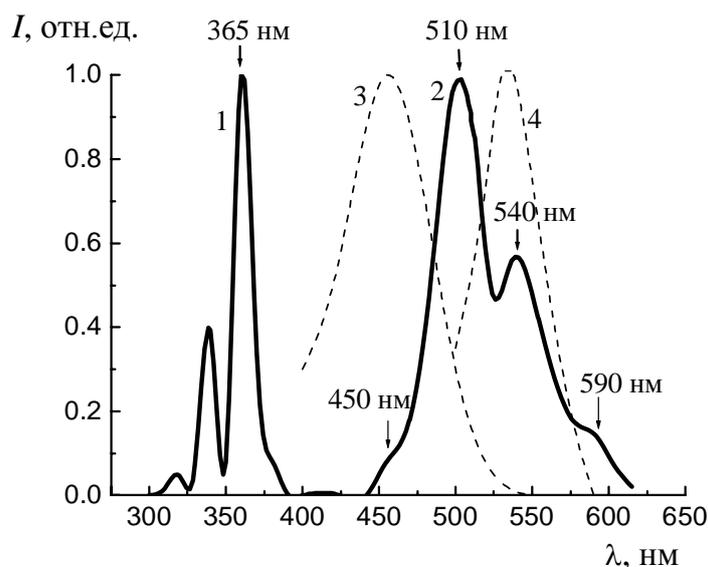


Рис. 2. Спектр флуоресценции жировой ткани при температуре 4 °С: 1 – спектр возбуждения, 2 – спектр флуоресценции жировой ткани, 3 – спектр флуоресценции восстановленной формы пиридиннуклеотидов [4], 4 – спектр флуоресценции окисленной формы флавопротеинов НАДФН [4]

На рис. 3 показана зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани человека *in vitro* от времени с момента извлечения из организма. Было обнаружено, что способность флуоресцировать уменьшается со временем хранения образца. При температуре жировой ткани 4°С интенсивность флуоресценции за 2 часа от момента изъятия снижается на 25% относительно первоначального уровня, за 5 часов – на 60%, за 24 часа – на 80 % . Это, возможно, связано либо с изменением вязкости, либо с тем, что в течение времени хранения жировой ткани в ней замедляются метаболические процессы [5].

Также в ходе экспериментов было обнаружено, что способность жировой ткани флуоресцировать связана с температурой (рис. 4). Для всех типов образцов жировой ткани при охлаждении образца от 36 до 4 °С интенсивность флуоресценции повышалась. Это может быть связано с тем, что с уменьшением температуры доля энергии возбуждения, расходуемая на процесс диссоциации молекул или их переход в другую модификацию, растрачиваемая безызлучательным путем, уменьшается. Это вызывает увеличение доли энергии флуоресценции [5].

В экспериментах также было показано, что на этапе охлаждения от 36 до 4°С для ткани типа I интенсивность флуоресценции растет со скоростью 0,01 (1/°С). Если после охлаждения до 4°С нагреть этот же образец до 60°С, то скорость изменения интенсивности флуоресценции будет соответствовать -0,02 (1/°С). Знак "-" соответствует уменьшению интенсивности с ростом температуры. В литературе, посвященной изучению жировой ткани, этот эффект до сих пор не обсуждался, кроме того, известно, что и в белках температурный гистерезис не был обнаружен [6].

Температурный гистерезис в липидах может быть связан с фазовыми переходами жировой ткани. При фазовых переходах жировая ткань обладает способностью кристаллизоваться. При охлаждении образуются кристаллы, которые располагаются так, что создают параллельно расположенные ряды пар их молекул. Такие ряды расположены как в плоскостях, так и по вертикали при уменьшении температуры. Они удлиняются и принимают форму кристаллических пластинок или игл. Вследствие этого может произойти разрыв мембраны жировой клетки. Количество люминесцирующих жировых

клеток уменьшается. С этим связано снижение интенсивности флуоресценции при нагревании жировой ткани после охлаждения.

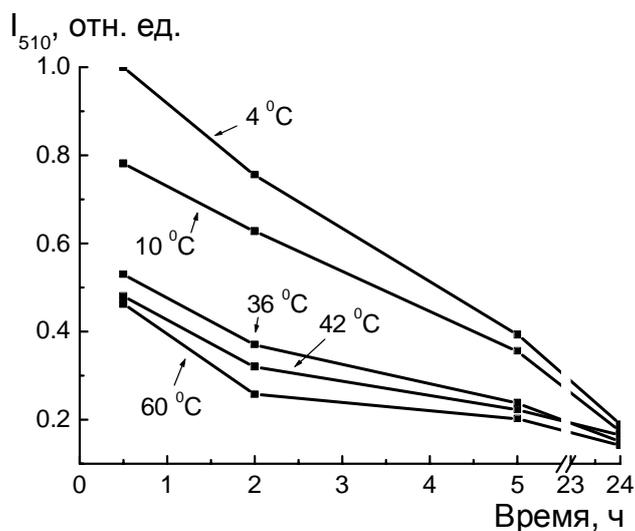


Рис. 3. Зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани от времени с момента извлечения из организма

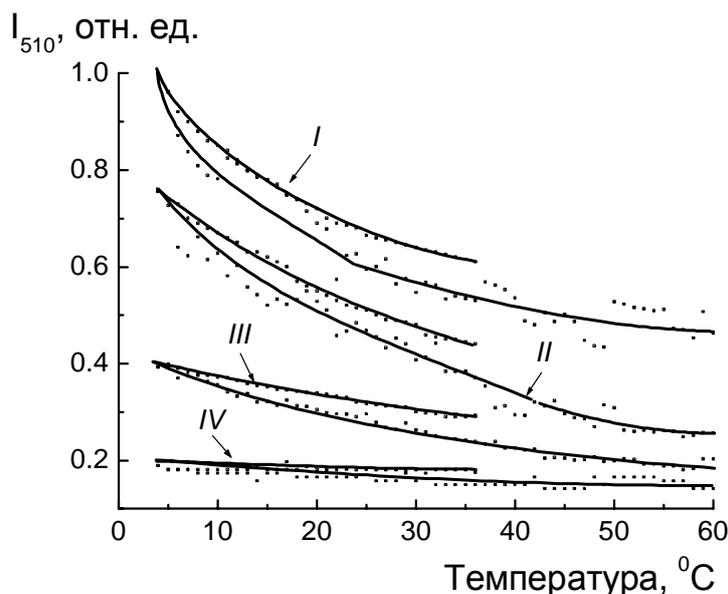


Рис. 4 Зависимость интенсивности флуоресценции жировой ткани человека in vitro от температуры: тип I - через 30 мин от момента изъятия, тип II - через 2 часа, тип III - через 5 часов и тип IV - через 24 часа.

Заключение

В ходе экспериментов было показано, что интенсивность флуоресценции жировой ткани меняется в зависимости от температуры и времени с момента извлечения из организма. В спектре флуоресценции жировой ткани in vitro наблюдаются максимумы на длинах волн 460, 510, 540 и 590 нм. Способность флуоресцировать уменьшается со временем хранения жировой ткани. При охлаждении образца от 36 до 4 °C интенсивность флуоресценции повышается. При циклическом охлаждении и нагревании образца

жировой ткани наблюдается эффект гистерезиса интенсивности флуоресценции на длине волны 510 нм.

Литература

1. Држевецкая О.Е. Основы физиологии обмена веществ. М: Высшая школа», 1994;
2. Климов А.Н., Никульчева Н.Г. Обмен липидов и липопротеидов и его нарушения. СПб: Питер-Ком, 1999. 512 с.;
3. Гинзбург М.М., Козупица Г.С., Котельников Г.П. Ожирение как болезнь образа жизни. / Современные аспекты профилактики и лечения. Изд-во Самарского Государственного медицинского университета, Самара, 1997.
4. Карнаухов В.Н Люминесцентный спектральный анализ клетки. М, 1978.
5. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. М, 1989.
6. Баренбойм Г.М., Доманский А.Н. Люминесценция биополимеров и клеток. М: Наука, 1966.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ТЕРМОГЕМОЛИЗА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭРИТРОЦИТОВ

А.Ю. Москалева

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.А. Тарлыков

Рассмотрена модель фотоиндуцированного термогемолиза эритроцитов, вызванного поглощением излучения оптического диапазона красными клетками крови, и показана возможность использования данной модели для измерения жесткости эритроцитарных мембран.

Введение

Эритроциты являются удобным объектом исследования и оценки физиологического состояния организма вследствие своей многочисленности и высокой чувствительности к любым изменениям, происходящим в организме, в том числе и при патологических процессах.

Многие заболевания и патологические состояния сопровождаются нарушением реологических свойств крови, что в свою очередь вызывает ряд осложнений основного патологического процесса (изменения в системе микроциркуляции, гипервискозный синдром, нарушение суспензионной стабильности крови). Вследствие этого для диагностики целого ряда заболеваний и оценки эффективности применяемого курса лечения необходим контроль реологических показателей крови, к числу которых относятся вязкость крови, деформируемость и агрегация эритроцитов.

Деформируемость эритроцитов, характеризующая способность красных клеток крови изменять свою форму под действием внешних сил, является одним из основных параметров, определяющих реологические свойства крови. Высокая деформируемость эритроцитов играет важную роль в процессах переноса кровью кислорода и углекислого газа. Способность эритроцитов к деформации определяется вязкоэластичными свойствами мембраны, внутренней вязкостью и отношением объема клетки к ее площади. Физико-химические факторы крови (рН, осмолярность, газовый состав, температура), различные химические агенты также влияют на деформируемость эритроцитов. Существенные нарушения деформируемости эритроцитов наблюдаются при различных заболеваниях системы крови (анемиях, множественной миеломе, истинной полицитемии и др.), при гипертонии, ишемической болезни сердца и других патологиях. Ухудшение деформируемости вызывает различные осложнения, усугубляющие течение заболевания.

Методы исследования деформируемости

Существуют различные методы измерения деформируемости эритроцитов. К прямым методам относятся измерения деформации мембраны при закреплении эритроцита в поле зрения микроскопа при различных способах его нагружения (при втягивании мембраны эритроцита в кончик микропипетки, при закреплении на дне прозрачной камеры, других механических воздействиях) [1, 2]. В случае косвенных методов измерения о степени деформируемости эритроцитов судят по изменению различных параметров, отражающих способность эритроцитов к деформации. Это различные фильтрационные методы (пропускание эритроцитарной суспензии через микропористые фильтры, искусственные капилляры малого диаметра), гравиметрические методы (оценка деформируемости по "пробе на упаковку" при центрифугировании) [1–4,10]. Недостатками этих методов являются невысокая точность, нефизиологическая концентрация эритроцитов, погрешность из-за фильтрации через боковые стороны фильтра и др.

Еще одним методом оценки деформируемости служит резистентность эритроцитов к различным воздействиям (химическим, осмотическим и др.), приводящим к гемолизу эритроцитов при превышении порога устойчивости [1,5,6]. Так, исследование резистентности эритроцитов к воздействию силы осмотического давления, возникающей при помещении эритроцитов в гипосмотическую среду, позволило рассчитать жесткость эритроцитарных мембран и оценить деформируемость эритроцитов [6].

Оптические методы регистрации, основанные на принципах распространения света (поглощение, рассеяние, поляризация, интерференция, дифракция электромагнитного излучения), характеризуются высокой точностью, чувствительностью, быстродействием, минимальным воздействием на объект исследования, возможностью одновременной регистрации большого количества малых частиц. Самым распространенным оптическим методом регистрации деформируемости эритроцитов является микроскопический метод, позволяющий наблюдать реакцию эритроцитов на различные внешние воздействия на них. Среди когерентно-оптических методов исследования, широко используемых в биологии и медицине, большой интерес представляет применение дифракционного метода. Лазерная дифрактометрия биологических микрообъектов в [6] применяется для контроля изменения среднего радиуса совокупности эритроцитов при изменении осмолярности раствора. Данный метод основан на явлении дифракции лазерного излучения на одиночных и множественных биологических микрообъектах. Параметры дифракционной картины однозначно связаны с параметрами микрообъектов, что дает возможность определять их размеры, форму, внутреннюю структуру и другие характеристики.

В данной работе рассматривается возможность определения деформируемости эритроцитов в условиях гипосмотического набухания, вызванного фотоиндуцированным нагревом эритроцитов вследствие поглощения ими оптического излучения.

Влияние гипертермии на деформируемость

Гипертермия (воздействие повышенных температур) широко используется в различных областях биологии и медицины [7–14]. Существуют различные объяснения механизмов влияния гипертермии на биологические объекты. Рассмотрим основные механизмы термогемолиза эритроцитов (рис. 1).

Термическому воздействию подвергается мембрана клетки (изменяется ее проницаемость, происходят термические денатурационные переходы липидов и белков клеточной мембраны, например, спектрина) [2, 9-11], наблюдается денатурация гемоглобина – первая стадия термогемолиза эритроцитов [12] и другие явления. Эти процессы вызывают изменение деформируемости.

Система осмотического гомеостаза также является одной из критических систем термического повреждения клеток и тканей [13]. Существующее в условиях температурного оптимума осмотическое равновесие в системе клетка – среда при гипертермии нарушается вследствие различия констант электролитической диссоциации электролитов содержимого клетки и окружающей ее среды. Осмотическое давление содержимого клеток при повышении температуры будет увеличиваться более интенсивно, чем давление суспензионной среды (например, физиологического раствора). Это приводит к гипосмотическому набуханию эритроцитов, степень которого будет определяться скоростью, величиной перепада и абсолютным значением температуры. Таким образом, фотоиндуцированный нагрев эритроцитов, происходящий при облучении образца крови, приводит к увеличению объема клеток вплоть до их гемолиза, что может быть использовано для определения деформируемости эритроцитов.



Рис. 1. Механизмы термогемолиза эритроцитов

Модель процесса фотоиндуцированного нагрева эритроцитов

Рассмотрим подробнее процессы, происходящие при облучении образца крови (эритроциты в изотоническом растворе). Поглощение эритроцитом оптического излучения вызывает повышение его внутренней энергии и приводит к нагреванию клетки.

Пусть образец облучается импульсным источником излучения. Возникновение теплового поля в образце после поглощения клеткой светового импульса длительностью t_0 происходит в течение порядка 1 пс. Это явление называется T-скачком [8].

Для большинства клеток крови время релаксации теплового поля

$$t_T = \frac{R^2}{k} \approx 10^{-4} \text{ с}, \quad (1)$$

где R – радиус клетки; k – температуропроводность клетки.

Если $t_T \gg t_0$, то T-скачок можно выразить как распределение теплового поля в плоскости клетки

$$\Delta T(x, y) = \alpha(x, y, z) \frac{\varepsilon(x, y)}{\rho C_0}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поглощения излучения эритроцитом на длине волны λ ; ρ – плотность вещества; ε – плотность энергии светового импульса; C_0 – удельная теплоемкость клетки. Выражения (1) и (2) позволяют оценить величину и длительность тепловой нагрузки, вызванной световым импульсом.

Источник оптического излучения необходимо выбирать с учетом максимального поглощения эритроцитом на данной длине волны, пренебрегая другими видами воздействия. Основным компонентом эритроцита, ответственным за поглощение, является гемоглобин. На рис. 2 показана зависимость удельных коэффициентов поглощения гемоглобина и оксигемоглобина в гемолизированной крови от длины волны [14]. Наблюдается сильная полоса поглощения с центром в области около 414,5 нм и более слабые пики в области 550 нм. По сравнению с гемоглобином оксигемоглобин меньше поглощает в красной области спектра. При длинах волн 548, 568, 587 и 805 нм величины поглощения гемоглобина и оксигемоглобина равны (изобестические точки). В качестве

одного из возможных источников оптического излучения можно быть использована вторая гармоника YAG:Nd³⁺-лазера ($\lambda=0,53$ мкм).

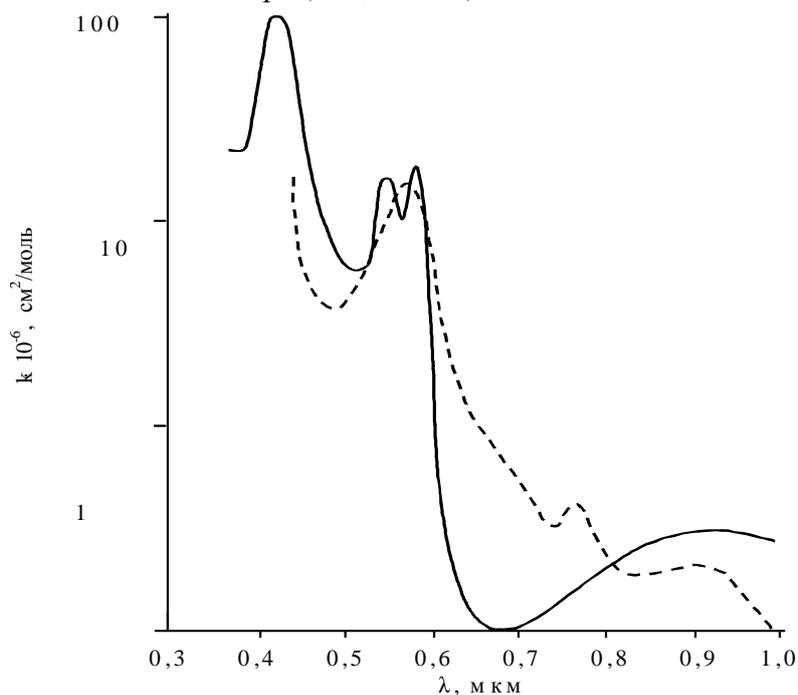


Рис. 2. Спектр оптического поглощения гемоглобина (---) и оксигемоглобина (—): зависимость удельного коэффициента поглощения от длины волны

Вследствие различий в электролитном составе суспензионной жидкости (в данном случае изотонического раствора NaCl) и содержимого клетки при нагревании суспензии эритроцитов происходит нарушение осмотического гомеостаза, подобное процессу, вызываемому изменением соотношения концентраций осмотически активных элементов клеток и среды [13]. Суспензионные среды состоят преимущественно из сильных электролитов (хлорид натрия и др.) с константой электролитической диссоциации, близкой к единице. Такие электролиты полностью диссоциированы на ионы (осмотически активные элементы) независимо от температуры раствора. Осмотическое давление P для сильных электролитов [13]

$$P = nCRT, \quad (3)$$

где n – количество ионов, образованных из каждой молекулы растворенного соединения; C – концентрация вещества; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура. Таким образом, осмотическое давление раствора для сильных электролитов будет возрастать с увеличением температуры из-за повышения подвижности ионов, а не за счет увеличения их концентрации.

В отличие от суспензионных сред клетки кроме сильных электролитов содержат также слабые полиэлектролиты (белки, нуклеиновые и аминокислоты и другие соединения) с относительно низкой константой электролитической диссоциации. В этом случае рост величины осмотического давления при повышении температуры для растворов слабых полиэлектролитов (например, белков) будет определяться не только увеличением подвижности ионов, но и их числа за счет дополнительной внутри- и межмолекулярной диссоциации, вызванной температурным повышением констант электролитической диссоциации. Этот процесс для мономерных фрагментов молекул высокополимерных соединений описывается зависимостью [13]:

$$P = \Pi C \left(1 + \sqrt{\frac{e^{-\frac{Q}{RT}} + B}{C}} \right) RT, \quad (4)$$

где P – осмотическое давление; Π – осмотический коэффициент для неидеальных растворов; C – концентрация вещества; Q – тепловой эффект реакции; B – постоянный коэффициент, не зависящий от температуры; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура раствора.

Осмотическое давление для слабых полиэлектролитов, как видно из зависимости (4), зависит также и от выражения под знаком квадратного корня, значение которого увеличивается с ростом температуры раствора и характеризует меру ионизации молекул электролита.

Следовательно, повышение температуры вызывает более интенсивное увеличение осмотического давления содержимого клеток, чем давления суспензионной среды. Этот процесс приводит к тому, что эритроциты подвергаются гипотоническому воздействию, степень которого будет определяться величиной температуры нагрева, ее перепадом и скоростью нагрева.

При воздействии оптического излучения температура суспензионной среды не изменяется, т.к. коэффициент ее поглощения пренебрежимо мал по сравнению с коэффициентом поглощения гемоглобина эритроцитов, т.е. примем, что при облучении образца крови происходит локальный фотоиндуцированный нагрев внутренней среды эритроцита, и, следовательно, увеличение давления только внутри эритроцита.

Таким образом, поглощение эритроцитами оптического излучения, вызывающее их фотоиндуцированный нагрев, приводит к увеличению осмотического давления содержимого клеток по сравнению с осмотическим давлением среды, что аналогично помещению эритроцитов в гипосмотический раствор. При этом происходит набухание эритроцитов вплоть до момента наступления гемолиза (фотоиндуцированный термогемолиз эритроцитов).

Варьируя длину волны излучения и применяя различные режимы облучения, можно изменять степень теплового, а значит и гипосмотического воздействия, т.е. контролировать процесс набухания эритроцитов и момент наступления гемолиза. Действие оптического излучения с различными характеристиками на эритроциты, находящиеся в изотоническом растворе, будет аналогично помещению эритроцитов в гипосмотические растворы различной концентрации.

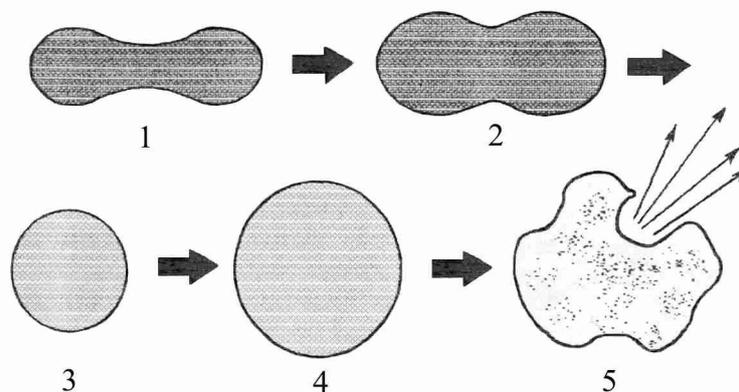


Рис. 3. Трансформация эритроцита при гипосмотическом набухании: 1 – дискоцит; 2 – набухание дискоцита; 3 – превращение дискоцита в сфероцит; 4 – набухание сфероцита; 5 – гемолиз

Как известно [5,6], процесс набухания эритроцитов в гипоосмотических растворах за счет поступления внутрь них воды состоит из двух стадий (рис. 3). На первом этапе происходит увеличение объема эритроцита без изменения площади его поверхности (дискоцит трансформируется в сфероцит). На втором сферулированный эритроцит продолжает увеличиваться в объеме за счет растяжения мембраны, испытывая избыточное внутреннее осмотическое давление, вплоть до момента наступления гемолиза

Диаметр эритроцитов здорового человека может варьироваться в пределах от 6,5 до 9 мкм (средние значения $7,5 \div 7,9$ мкм) [1,2]. Будем считать средний диаметр эритроцита равным 7,7 мкм. При моделировании сечения эритроцита овалом Кассини [1] для среднего значения радиуса 3,85 мкм получим первоначальный объем $V_3=71,1$ мкм³ и площадь поверхности $S_3=142,5$ мкм². Примем эти значения за исходные, тогда для момента, когда эритроцит примет сферическую форму

$$R_{сф} = \sqrt{\frac{S_{сф}}{4\pi}}, \quad V_{сф} = \frac{4}{3}\pi R_{сф}^3, \quad (5)$$

где $R_{сф}$, $S_{сф}$, $V_{сф}$ – соответственно радиус, площадь и объем эритроцита, принявшего сферическую форму. Тогда $R_{сф} = 3,37$ мкм, $S_{сф} = 142,5$ мкм², $V_{сф} = 160,1$ мкм³.

Во второй фазе гипоосмотического набухания сферулированный эритроцит увеличивается в объеме за счет растяжения мембраны, которая способна растягиваться вплоть до наступления гемолиза, увеличивая свою площадь по разным данным на $8 \div 14\%$ [2,5]. Будем считать, что в среднем к моменту наступления гемолиза площадь сферулированного эритроцита увеличивается на 10%. Тогда, считая за исходную площадь поверхности сферулированного эритроцита $S_{сф} = 142,5$ мкм², получаем площадь поверхности сфероцита в момент гемолиза $S_r = 156,75$ мкм², радиус $R_r = 3,53$ мкм, объем $V_r = 184,16$ мкм³.

Установим аналитическую связь между избыточным давлением внутри эритроцита и изотропным поверхностным напряжением в мембране. Будем рассматривать эритроцит как тонкостенную сферу (для эритроцита $R \approx a \approx b$, где a и b – соответственно внутренний и внешний радиусы сферы), к которой приложены внешнее давление P_p и внутреннее P_3 . Тогда тангенциальное растягивающее напряжение, действующее в оболочке сферы на расстоянии R от центра сферы, определяется следующим образом [5]:

$$\sigma_t = \frac{3}{8} R \Delta P / (a - b), \quad (6)$$

где $\Delta P = P_p - P_3$. Числитель в полученном выражении является изотропным поверхностным напряжением \bar{T} , т.е.

$$\bar{T} = \frac{3}{8} R \Delta P. \quad (7)$$

\bar{T} является функцией радиуса эритроцита, изменяющегося в процессе гипоосмотического набухания, и избыточного давления, действующего внутри клетки. Для мембраны эритроцитов справедливо следующее соотношение: $\bar{T} = K \Delta S / S_{сф}$, где K – поверхностная жесткость мембраны, ΔS – абсолютное приращение площади поверхности мембраны эритроцита при набухании [5]. Отсюда получаем, что равновесные состояния эритроцита в результате его гипоосмотического набухания будут описываться соотношением:

$$\frac{3}{8} R_i \Delta P_i = K \Delta S_i / S_{сф}, \quad (8)$$

где R_i – текущее равновесное значение радиуса эритроцита, $\Delta S_i = S_i - S_{сф}$ – абсолютное приращение площади поверхности эритроцитарной мембраны, S_i – соответствующее радиусу R_i значение площади ее поверхности. Значение ΔP_i определяется как разность внутреннего и внешнего давлений, приложенных к мембране эритроцита. Так как при воздействии оптического излучения происходит локальный фотоиндуцированный нагрев внутренней среды эритроцита, и следовательно, увеличение давления только внут-

ри эритроцита, то величину ΔP_i можно определить как разность давлений внутри эритроцита до $P_{э1}$ и после $P_{э2}$ воздействия:

$$\Delta P_i = P_{э2} - P_{э1}, \quad (9)$$

где $P_{э1}$, $P_{э2}$ определяются из выражения (3).

Выразим значения площадей мембран эритроцитов через их радиус, тогда:

$$\frac{3}{8} R_i \Delta P_i = K \left[\left(\frac{R_i}{R_{сф}} \right)^2 - 1 \right]. \quad (10)$$

Откуда получаем выражение для жесткости эритроцитарной мембраны:

$$K = \frac{3}{8} \Delta P_i R_{сф} \frac{R_{отн}^i}{\left(R_{отн}^i \right)^2 - 1}, \quad (11)$$

где $R_{отн}^i = \frac{R_i}{R_{сф}}$ – текущий относительный радиус эритроцита.

Заключение

Теоретическое рассмотрение модели гипоосмотического набухания эритроцитов, вызванного их фотоиндуцированным нагревом вследствие поглощения оптического излучения гемоглобином, показало возможность использования данной модели для измерения жесткости эритроцитарных мембран и оценки деформируемости эритроцитов. За счет применения изотонического раствора уменьшается время проведения исследования по сравнению с методикой измерения жесткости в гипоосмотических растворах различной концентрации.

Литература

1. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрина Н.Х. Реология крови. М.: Медицина, 1982.
2. Черницкий Е.А., Воробей А.В. Структура и функции эритроцитарных мембран. Мн.: Наука и техника, 1984.
3. Методы исследования агрегации, вязкости и деформируемости эритроцитов. Под ред. Федоровой З.Д. Л.: НИИ гематологии и переливания крови, 1989.
4. Козинец Г.И., Сарычева Т.Г. Оценка деформабельности эритроцитов методом фильтрации // Лабораторное дело. 1990. №11. С.15.
5. Петренко Ю.М., Владимиров Ю.А. Изменение размеров эритроцитов при их набухании в гипоосмотических средах // Биофизика. 1987. Т.32. №3. С. 448–453.
6. Бессмельцев С.С., Скворцова Ю.А., Тарлыков В.А. Исследование жесткости мембраны эритроцитов у больных с множественной миеломой на фоне терапии, включающей лечебный плазмаферез // Эфферентная терапия. 2000. Т.6. №1. С. 36–41.
7. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля // Биофизика. 2003. Т.48. №1. С. 122–124.
8. Исследование влияния фотодинамического эффекта на микроорганизмы методом лазерной термооптической цитометрии / Лапотко Д.О., Жаров В.П., Романовская Т.Р., Кучинский Г.С. // Квантовая электроника. 1999. 29. №3. С. 221–226.
9. Волков Е.И., Полежаев А.А. Плазматическая мембрана как мишень действия гипертермии // Успехи современной биологии. 1983. Т.96. №3(6). С. 353–365.
10. Ямайкина И.В., Мансуров В.А., Ивашкевич Э.В. Температурная денатурация спектрина эритроцитов: реология, деформируемость и детергентоустойчивость // Биофизика. 1997. Т.42. №3. С. 675–679.
11. Александров В.Я. Клетки, макромолекулы и температура. Л.: Наука, 1975.
12. Ямайкина И.В., Черницкий Е.А. Денатурация гемоглобина – первая стадия термогемолита эритроцитов // Биофизика. 1989. Т.34. №4. С. 656–659.
13. Морозов И.И. Термическое повреждение клеток и их осмотический гомеостаз // Медицинская радиология. 1992. Т.37. №11-12. С. 39–42.
14. Джонсон (С.С. Johnson), Гай (А.В. Guy). Воздействие неионизирующего электромагнитного излучения на биологические среды и системы // ТИИЭР. 1972. Т. 60. №6. С. 49–82.

МИКРОПИПЕТКИ: ОСНОВНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

В. З. Зыонг, Н.Н. Марковкина

Научный руководитель – д.т.н., проф. В.П. Вейко

В работе рассматриваются основные области приложений микропипеток, такие как биотехнология, нанолитография и др. Кроме того, представлены новые аналитические методы для химии, фармацевтики и т.п. Сформулированы основные требования к микропипеткам. Представлена принципиально новая технология формирования микропипеток с использованием лазерного источника излучения.

Введение

Микропипетка представляет собой трубочку, утонченную на конце, с отверстием микронных размеров (рис.1,2). Различные модификации микропипеток активно используются в разнообразных областях современной биомедицины и техники в качестве

- биосенсоров;
- микроигл;
- насадок растров микропипеточных головок;
- ближнепольных зондов;
- микрооптических инструментов.

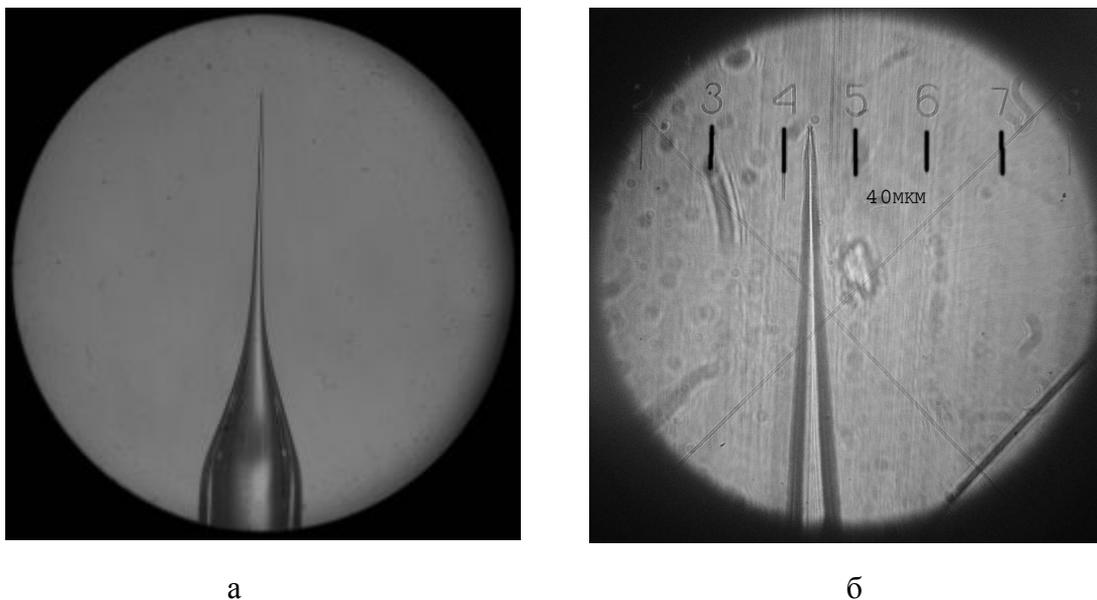


Рис. 1. а – микропипетка; б - нанометровый наконечник

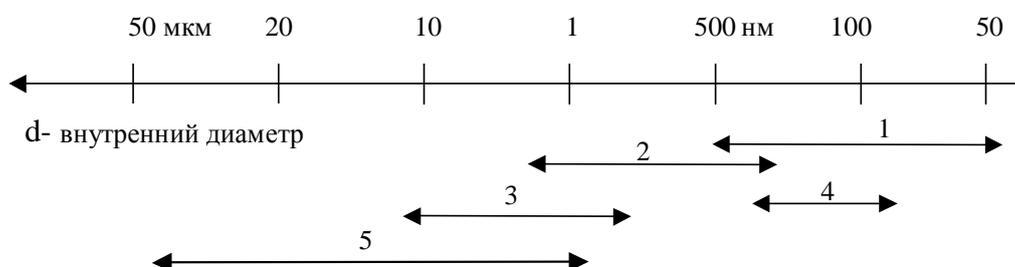


Рис. 2. Области применения микропипеток. 1 - нанолитография, сканирующая ионная микроскопия, ближнепольная оптика; 2 - геновая инженерия (клонирование, ДНК – анализ); 3 - клеточная физиология; 4 - тонкослойная планарная хроматография; 5 - фармацевтика

Изготовление микропипеток изначально осуществлялось при помощи резистивных или газоразрядных источников тепла. В последнее время наиболее предпочтительны методы изготовления микропипеток с использованием лазера в качестве теплового источника. В основном, используются промышленные CO₂-лазеры ($\lambda=10.6$ мкм)

1. Основные области приложений применения микропипеток

1.1 Биотехнология

В настоящее время *микропипетки* стали важным инструментом биомедицинских исследований.

Клеточная физиология. Регистрация электрической активности клетки осуществляется с помощью микропипетки [1], выполняющей роль электрода. Стеклопипетка, наконечник которой имеет внешний диаметр меньше 1–3 мкм, прижимается к плазматической мембране до плотного контакта, обеспечивающего электрическую и химическую изоляцию электролита внутри пипетки от окружающего раствора (рис. 3). Кусочек мембраны, который находится на кончике пипетки, деликатно разрушается, в результате чего возникает электрический и химический доступ внутрь клетки. Усилитель тока, включенный между электродами, позволяет поддерживать определенный мембранный потенциал и измерять электрический ток. Этот электрод предназначен для регистрации потенциала на внутренней поверхности плазмалеммы и для введения в цитоплазму клетки различных веществ. Второй электрод предназначен для регистрации потенциала на наружной стороне плазмалеммы. Как правило, он представляет собой серебряную пластинку и размещается во внеклеточной среде.

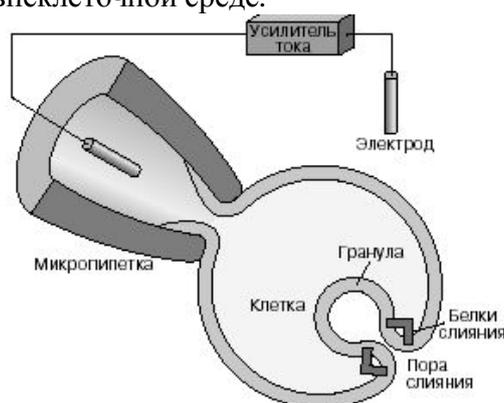


Рис. 3. Запись электрической активности клетки.

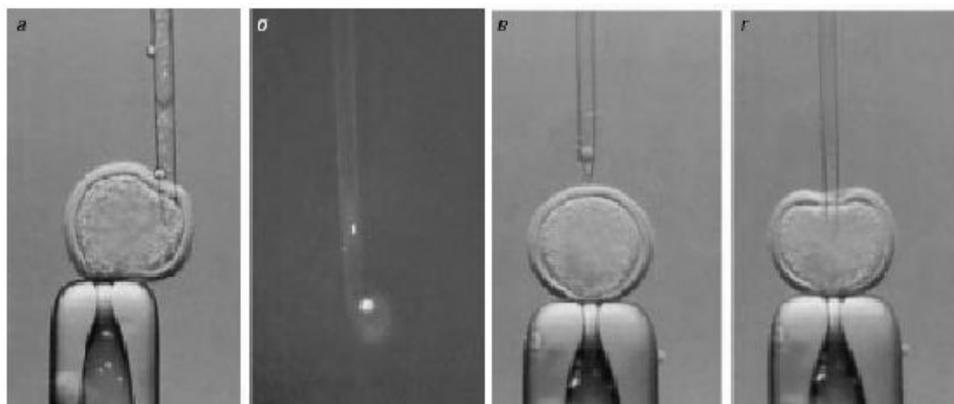


Рис. 4. Этапы переноса ядра клетки.

а – удаление ядра из яйцеклетки с помощью тонкой стеклянной микропипетки; б – контроль успеха энуклеации; в – стеклянная микропипетка с соматической клеткой подводится к яйцеклетке; г – перенос соматической клетки с ее ядром в яйцеклетку.

Генная инженерия. В основе метода клонирования лежит пересадка ядер из клеток-доноров в яйцеклетку. Технологически метод в большинстве случаев сводится к использованию *микропипетки* [2], которая позволяет осуществлять энуклеацию (извлечение) ядра и трансплантацию его в обезьядренную яйцеклетку (рис. 4). Использование такой тонкой стеклянной *микропипетки* позволяет отказаться от этапа электрической стимуляции слияния донорской клетки с яйцеклеткой, а также повышает вероятность получения у копий идентичного набора генов.

Сканирующая ионная микроскопия - микроскопический метод исследования живых клеток [3]. Он основан на сканировании наполненной электролитом *микропипетки* над поверхностью образца (рис.5). При определенной настройке, когда расстояние до поверхности образца больше, чем диаметр пипетки, можно получать топографию поверхности живых клеток. *Микропипетка* используется в качестве источника света в ближнем поле для сканирующей ближнепольной микроскопии.

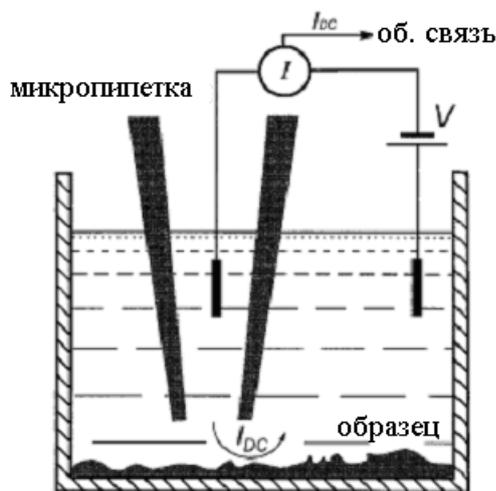


Рис. 5. Схема метода сканирующей ионной микроскопии

1.2. Нанолитография

Фотолитография, используемая в производстве интегральных схем, уже достигла предельной разрешающей способности. Поэтому нанолитография с использованием сканирующего зонда может оказаться вполне конкурентоспособной по сравнению с традиционным фотографическим методом.

Сканирующий нанолитографический метод позволяет доставлять жидкий фоторезист на подложку через нанометровую апертуру наконечника микропипетки (или нанопипетки). Ширину линии при этом определяет главным образом диаметр апертуры микропипетки, который может достигать нескольких десятков нанометров (рис 6).

Для того чтобы удерживать расстояние между кончиком микропипетки и подложкой порядка нескольких десятков нанометров, использован метод управления на основе контроля поперечной силы между ними. В эксперименте используются оптические волноводы: один одномодовый волновод для фокусировки излучения He-Ne лазера и два многомодовых волновода для дифференциального детектирования дифракционного света с помощью фотодиода.

Отметим еще одну разновидность способа применения микропипеток в нанолитографии. В этом случае микропипетка с отверстием (апертурой) на конце размерами порядка 100 нм покрывается снаружи тонким слоем Al. Далее она используется как ближнепольный оптический зонд, через который засвечивается фоторезист [5].

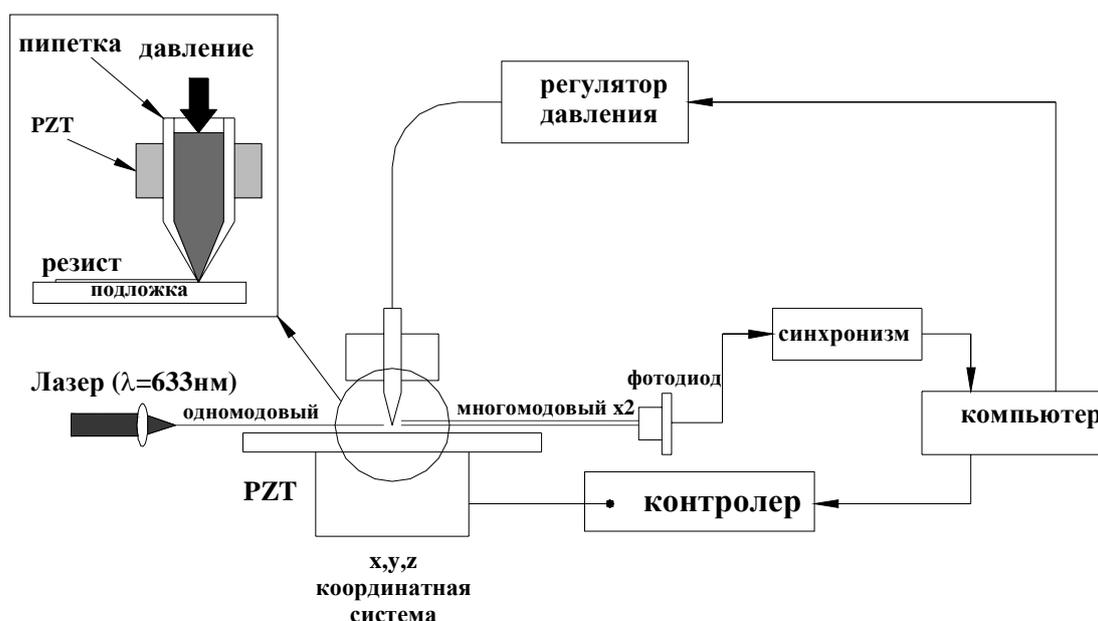


Рис. 6. Схема экспериментальной установки нанолитографического метода.

1.3. Новые аналитические методы

Применения микропипеток позволило разработать ряд новых аналитических методов, которые нашли широкое применение в различных сферах человеческой деятельности.

Метод планарной хроматографии [6] – один из современных аналитических методов. Планарная хроматография является единственным хроматографическим методом, который позволяет проводить полный анализ неизвестного анализируемого вещества в малых количествах. Процессы разделения происходят в тонких слоях (100–300 мкм) сорбента (силикагель, оксид алюминия, целлюлоза), нанесенного на инертную твердую подложку (стеклянную, металлическую или пластмассовую пластину) или в пленках пористого полимерного материала, погруженных в растворитель, где под действием капиллярных сил происходит расщепление веществ.

Капельным анализом называется качественный анализ, в котором либо индикатор, либо анализируемая проба имеет малый размер (размер капли). Самые распространенные способы проведения капельного анализа: в стеклянной пробирке, на фильтровальной бумаге, на часовом стекле, на поверхности образца, методом отпечатка. По этой причине использование точной мерной посуды является актуальной проблемой. Мерная микропипетка позволяет осуществлять точное дозирование пробы. Чувствительность анализа зависит не только от химических свойств реагирующих компонентов, но и от условий, связанных с методологическим оформлением эксперимента.

Микропипетки, кроме указанных областей приложения, являются точным инструментом научно-учебных, диагностических лабораторий. Приведем несколько характерных примеров.

1.4. Диагностика

Деформируемость эритроцитов (ДЭ) является одной из наиболее лабильных характеристик крови, которая заметно реагирует на изменения практически любого метаболического процесса в эритроцитах, и в целом всего организма. Ухудшение деформируемости эритроцитов при различных видах кислородной недостаточности ограничивает оптимальное функционирование системы транспорта кислорода на различных её уровнях: сердце, сосудистое русло, кислородтранспортная функция крови. Оценка ДЭ осуществляется микропипеточным методом, суть которого заключается в аспирации

эритроцита в *микропипетку* диаметром порядка 1–4 мкм. ДЭ оценивают по модулю эластичности мембраны, определяемого по величине отрицательного давления и размерам аспирируемой части клетки. Микропипеточный метод – "идеальный" метод для изучения влияния нарушений вязкостно-эластичных свойств мембраны на ДЭ.

Отметим также перспективность применения протеиновых растров (набора характерных проб организма, доставляемых с помощью растра микропипеток для экспресс-диагностики человека). Универсальная микропипеточная система предназначена для транспортировки и быстрой параллельной идентификации большого количества (20×20) жидких проб ДНК в микропипетках малых объемов (от пкл до мкл).

2. Основные требования к микропипеткам

Анализ изложенных приложений позволяет сделать вывод, что наиболее важными требованиями к микропипеткам являются следующие:

- химическая пассивность и чистота;
- механическая прочность;
- электрическая инертность;
- термостойкость (обеспечивающая возможность их стерилизации);
- возможность использования в широком диапазоне длин волн оптического излучения при работе в качестве оптического инструмента;
- необходимый диапазон размеров (50 nm–50 μm);
- коммерческая доступность.

3. Лазерная технология формирования микропипеток

Традиционные методы изготовления микропипеток – это вытяжка стеклянных капилляров при локальном нагревании резистивными или газоразрядными источниками тепла. Лазерная технология формирования микропипеток является принципиально новой в связи с использованием лазерного теплового источника. Наиболее популярны установки с СО₂-лазером.

Перспективность применения лазерной технологии обусловлена его следующими причинами

- хорошая поглощательная способность стекла (на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм);
- химическая и физическая чистота технологии;
- возможность концентрации большой энергии в исключительно малой области пространства, порядка длины волны лазерного излучения;
- возможность достижения высоких температур за относительно короткие промежутки времени;
- возможность создания зоны нагрева большого диапазона размеров.

Принципиальная схема лазерной установки для процесса вытяжки микропипеток представлена на рис. 7.

Излучение СО₂-лазера с длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм и мощностью $P \sim 10$ Вт (1), проходя через линзу (2), фокусируется на стеклянном капилляре (3), который установлен в крепежно-вытяжном механизме (4, 5). Лазерное излучение падает на зеркало (6), которое возвращает прошедшее за капилляр излучение на вторую половину нагреваемого участка. Под действием излучения облучаемый участок капилляра нагревается до температуры размягчения, и далее начинается процесс вытяжки под действием растягивающей силы F до обрыва с образованием наконечников. Весь процесс вытяжки микропипеток занимает время $t \leq 10$ сек.

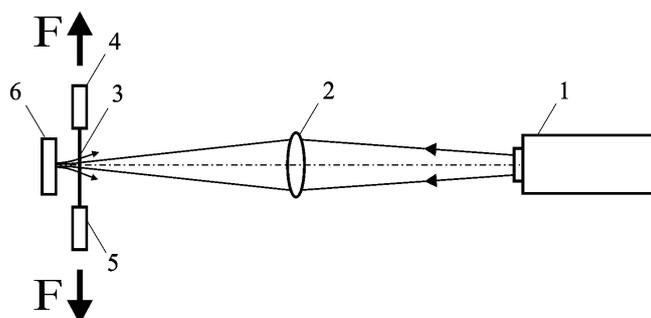


Рис. 7. Принципиальная схема установки для вытяжки микропипеток с использованием CO_2 -лазера

В результате исследовательской работы процесса лазерной вытяжки микропипеток была разработана математическая модель [7].

Заключение

В настоящее время микропипетка становится важным инструментом во многих областях техники и технологии. В связи с этим представляет большой интерес совершенствование процесса их изготовления.

В работе рассмотрены области приложений микропипеток и основные требования к ним. Представлена принципиальная схема для вытяжки микропипеток с использованием CO_2 -лазера, имеющая ряд преимуществ по сравнению с более ранними методами изготовления микропипеток. На основе предлагаемой технологии возможно изготовление химически чистых стеклянных микропипеток с требуемым размером апертуры (от десятков микрон до десятков нанометров).

Работа выполнена при поддержке Президентской программы поддержки ведущих научных школ (НШ-1370.2003.8).

Литература

1. Чизмаджев Ю.А. Как сливаются биологические мембраны // Соревский Образовательный Журнал. 2001. Т.7.№ 5.С.4-9.
2. Корочкин Л.И. Клонирование животных // Соревский Образовательный Журнал. 1999.№ 4.С.10-16.
3. Andrew I. Shevchuk et al. Simultaneous Measurement of Ca^{2+} and Cellular Dynamics: combined Scanning Ion Conductance and Optical Microscopy to Study Contracting Cardiac Myocytes // Biophysical Journal. Vol. 81. P.1759-1764.
4. Brown K.T., Flaming D.G. Advanced micropipette techniques for cell Physiology // Department of Physiology University of California. 1995.
5. Mun-Neon Hong, Ki Hyun Kim, Joonho Bae, and Wonho Jhe. Scanning nanolithography using a material-filled nanopipette // Applied Physics Letters. 2000. Vol. 77. № 16. Pp. 2604-2606.
6. Евгеньева И.И. Планарная хроматография и анализ органических веществ// Соревский Образовательный Журнал. 1999. N11. С.50-55.
7. Зынг Зунг Ван, Н.Н. Марковкина, Е.Б. Яковлев. Математическое моделирование процесса лазерной вытяжки микропипеток//Изв.вузов. Приборостроение. 2003.Т.46.№ 6.С.42-45.
8. V.P. Veiko, N.B. Voznesensky, Y.M. Voronin, N.N. Voznesenskya, N.N. Markovkina, V.A. Chuiko. Laser-based micropipettes: design, technology and applications // Pros. of the SPIE. 2000. Vol.4157. P.174 –182.
9. Комиссаренко Н. Ф., Чернобай В. Т., Комиссаренко А. Н. Карденолиды и флавоноиды *Gomphocarpus fruticosus* // Растительные ресурсы.1997. Т. 33. № 1. С. 29–41.

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРНЫХ СХЕМ С ИМПУЛЬСНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕМ

Д.С. Макаров

Научный руководитель – к.т.н., ст.н.с. В.А. Кораблев

Рассматривается устройство термостатирования активного и нелинейного элементов неодимового (NdYAG) лазерного излучателя. Приведены основные требования к прибору, общее описание принципа действия и его основные характеристики.

Введение

Генерационные характеристики лазеров существенно зависят от теплового режима активных и нелинейных элементов, электрооптических затворов и зеркал. Контроль температуры этих объектов необходим для термостатирования элементов лазерных схем, отвода выделяющейся в них теплоты и изучения оптических характеристик активных и нелинейных сред. Эти измерения затруднены из-за мощных световых потоков, воздействующих на датчики температуры, высокоинтенсивного конвективного теплообмена на их поверхностях и нестационарного теплового режима элементов. Конструкция излучателей лазеров затрудняет, а в ряде случаев не позволяет применять неконтактные методы измерения температуры.

Термостабилизация нелинейных элементов и электрооптических затворов осложняется импульсным характером тепловыделений в них и колебаниями температуры окружающей среды в широком диапазоне.

Постановка задачи

Для решения задачи термостабилизации активного и нелинейного элементов необходимо было сконструировать электронную систему, осуществляющую контроль и управление температурами. При проектировании системы были сформулированы следующие требования к электронному блоку:

- возможность плавной регулировки уровня температуры термостатирования нелинейного элемента в диапазоне от 60°C до 90°C;
- поддержание температуры нелинейного элемента на произвольном заданном уровне с точностью до 0.2 К;
- поддержание температуры активного элемента в диапазоне от 18°C до 22°C при помощи термоэлектрического охлаждения;
- время выхода на режим не должно превышать 6 минут при максимально возможной температуре термостатирования;
- возможность измерения температуры нелинейного элемента при помощи вольтметра (например, сигнал в 4500 мВ соответствует температуре 45°C);
- светодиодная индикация работы нагревателя;
- индикация выхода элемента на режим (достижение элементом уровня в 95 % от требуемой температуры);
- наличие релейной блокировки запуска лазера при некорректном тепловом режиме;
- наличие на плате преобразователей напряжения на 5 В и 12 В из 24 В.

Описание

В устройстве реализованы 2 различных термостата, предназначенные для стабилизации температуры различных элементов лазера. Для термостабилизации активного элемента применяется термоэлектрическое охлаждение с двухпозиционным регулированием. В качестве датчика температуры используется платиновый полупроводнико-

вый термометр сопротивления номиналом 1 кОм. Элемент Пельтье охлаждает активный элемент при перегреве последнего свыше 20°C. Данная схема имеет зону нечувствительности, равную 2 К.

Второй термостат применяется для стабилизации температуры нелинейного элемента. Так как требования к точности поддержания температуры гораздо выше, здесь применен подогревной термостат с пропорциональным законом регулирования.

Подогревной термостат применим в случаях, когда температура стабилизации превышает температуру окружающей среды. Принцип его работы основан на компенсации тепловых потерь в окружающую среду при помощи нагревателя переменной мощности. Термостат непрерывно измеряет абсолютные значения температур термостатируемого элемента и окружающей среды, а также их разницу и изменяет мощность, выделяемую на нагревателе, пропорционально разности измеренных температур. Так как электрический сигнал является одним из наиболее управляемых, в качестве нагревателя удобно использовать электрический нагреватель. Для изменения мощности нагревателя можно изменять силу тока либо длительность токовых импульсов, пропускаемых через нагреватель.

В разработанном термостате регулирование температуры основано на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), т.е. длительность импульсов подаваемых на нагреватель прямо пропорциональна разнице температур между реальной температурой термостатируемого элемента и заданным температурным уровнем.

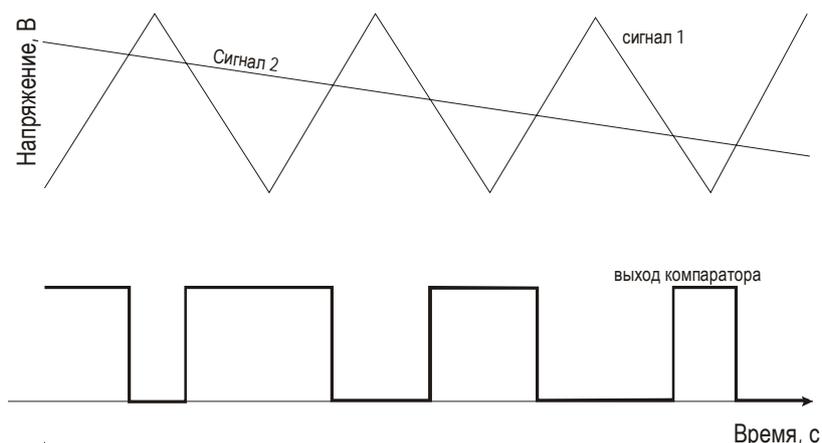


Рис. 1. Реализация ШИМ напряжения на нагревателе

На рис. 1 электрический сигнал 2 пропорционален разнице температур, и его уровень уменьшается со временем. Сигнал 1 вырабатывается генератором сигналов специальной формы и представляет собой опорное пилообразное напряжение постоянной частоты и амплитуды (в настоящей системе простейший генератор был собран на микросхеме 555 серии). Эти два сигнала подаются на специальное устройство – компаратор, который осуществляет сравнение этих сигналов. Выход компаратора изображен на нижней эпюре. Как видно из графика, длительность импульсов, подаваемых на нагреватель, будет тем больше, чем больше разница температур. При снижении этой разницы импульсы начнут уменьшаться (вплоть до полного исчезновения при условии идеальной тепловой изоляции корпуса термостата).

Приняв допущение, что температура окружающей среды остается практически неизменной, ее измерением можно пренебречь. Рис. 2 демонстрирует измеренные временные диаграммы изменения температуры при различных ее требуемых уровнях.

К элементам термостата относятся нагреватель, измеритель (датчика температуры), силовой элемент (полевой транзистор типа IRF540) и система управления нагревателем. Нагреватель состоит из 2-х последовательно соединенных сопротивлений

номиналом 25 Ом каждое, и рассчитан на ток 0.5 А. Как известно, электрическая мощность рассчитывается по формуле

$$W = I^2 R = 12.5 \text{ Вт},$$

следовательно, данный нагреватель способен компенсировать не более 12.5 Вт теплопотерь в окружающую среду. В качестве датчика используется платиновый термометр сопротивления Pt100, характеристика которого в указанной области близка к линейной. Номинальное сопротивление датчика при 0°C равно 100 Ом, чувствительность датчика приблизительно равна +0.4 Ом/К. Температурный датчик включается по четырехпроводной схеме для компенсации статической погрешности. Система управления выполнена на 2-х операционных усилителях LM324N.

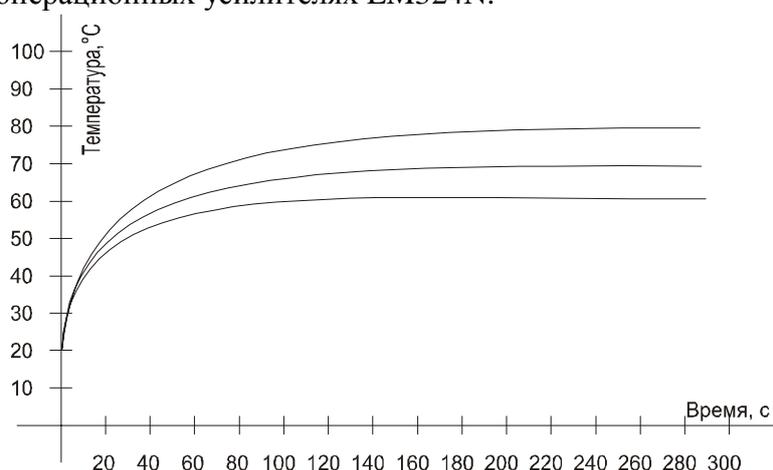


Рис. 2. Зависимость температуры нелинейного элемента от времени для различных значений температуры термостатирования

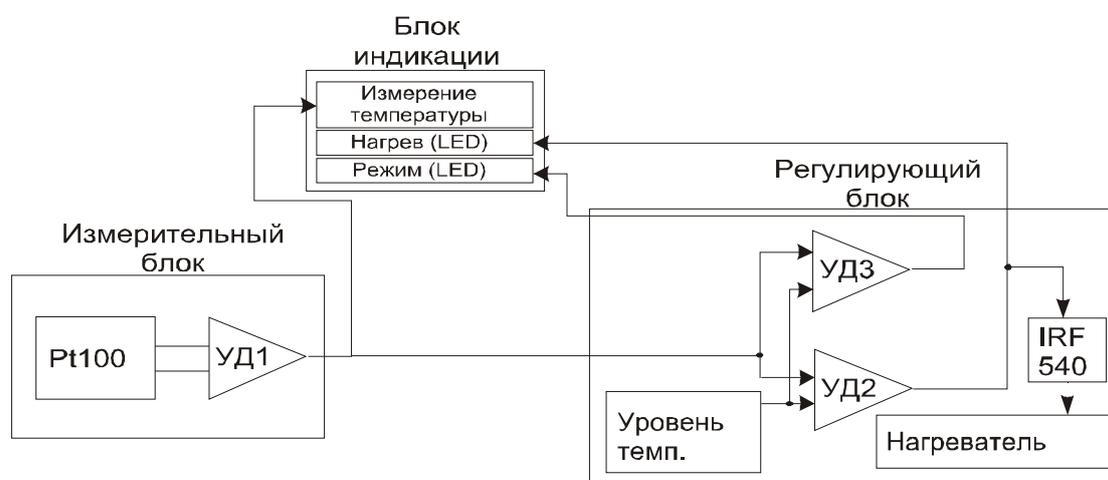


Рис. 3. Термостат: принципиальная схема

Разработанный термостат состоит из 3 основных блоков (рис. 3) – измерительного блока, регулирующего блока и блока индикации.

Измерительный блок производит опрос датчика и формирует электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна температуре и удобна для считывания. Температура в градусах получается путем деления измеренного напряжения в вольтах на 10, т.е. каждые 10°C соответствуют 1 В. Затем сигнал с измерительного блока попадает в регулирующий блок, где анализируются величины текущей и требуемой температур, а также температура окружающей среды, и это рассогласование преобразуется в импульсные сигналы определенной мощности, поступающие на нагреватель. Для дополнительного визуального контроля работоспособности нагревателя в блоке индика-

ции расположен светодиодный индикатор "Нагрев". В случае выхода нагревателя из строя светодиод укажет на неисправность.

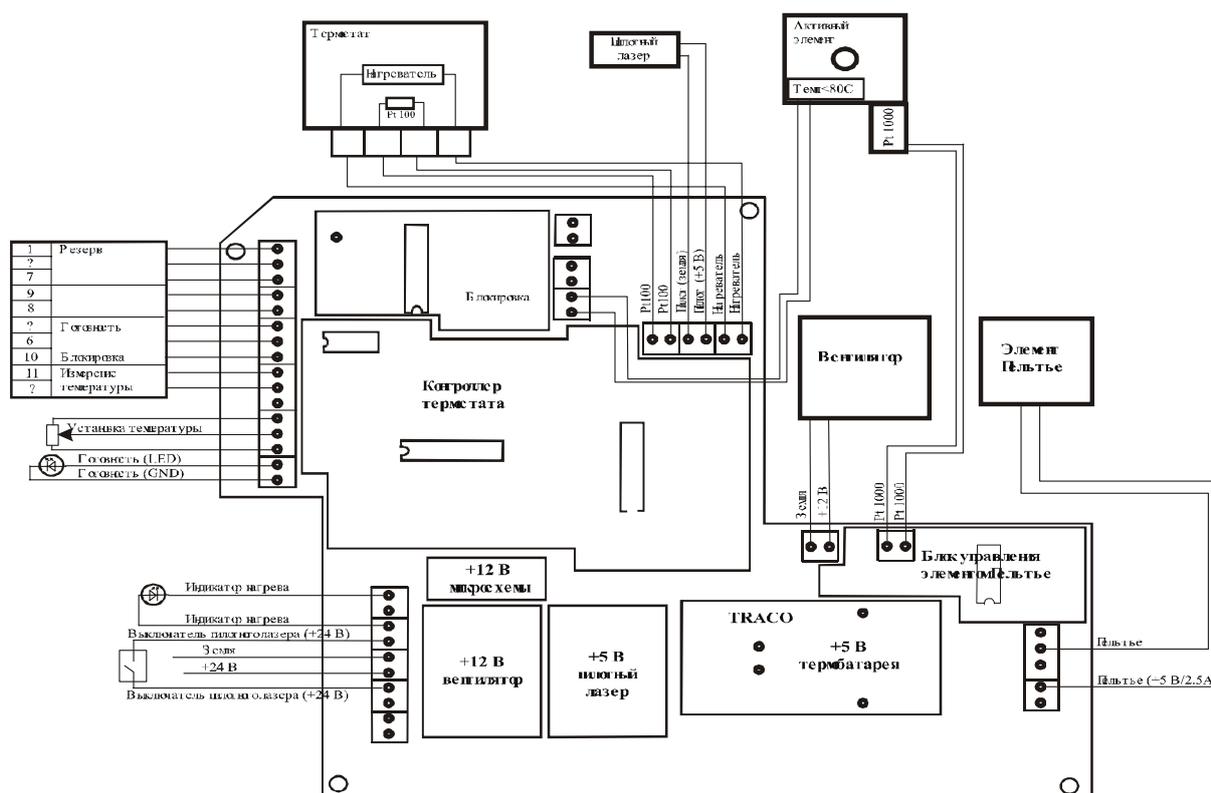


Рис. 4. Внешний вид платы управления: расположение элементов и назначение разъемов

По достижении нелинейным элементом порога в 95 % от заданного уровня температуры блокировка лазера отключится и загорится индикатор "Готовность". Пока остался нереализованным контроль перегрева нелинейного элемента. Дополнительный отвод тепла в термостате не предусмотрен.

При проектировании печатной платы следует уделять особое внимание расположению элементов и рисунку токопроводящих дорожек. Силовые транзисторы, работающие в ключевом режиме, являются источником помех и способны в значительной степени искажать сигналы измеряющих датчиков, что недопустимо в системах подобного класса точности. В плате силовая и измеряющая части физически разнесены в различные части печатной платы и используют независимые источники питания с фильтрацией входных сигналов. Таким образом, практически исключаются наводки различных частей платы друг на друга, и обеспечивается требуемая точность измерения и поддержания температур элементов лазера.

Заключение

В настоящее время система проходит испытания в составе лазерного излучателя с диодной накачкой для выполнения прецизионных технологических операций.

Литература

1. Р. Тейстер. Радиолюбительские схемы на ИС типа 555. М.: Мир, 1988. 263 с.
2. Температурные измерения. Справочник / Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А. и др. Киев: Наукова думка, 1989. 704 с.
3. Алексенко А.Г. и др. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.
4. Walter Koehler. Solid-State Laser Engineering. Springer Verlag Berlin, 1999.

СУЩНОСТЬ И РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПОВЫШЕНИИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ХОЗЯЙСТВУЮЩИХ СУБЪЕКТОВ

О.А. Цуканова

Научный руководитель – д.э.н., проф. Э.Н. Кроливецкий

Рассмотрена проблема стратегического управления предприятием, определены основные черты и этапы процесса управления, дан ряд определений термину "стратегическое управление" с точки зрения различных ученых-экономистов.

В начале XXI века предприятия для того, чтобы эффективно функционировать и получать позитивные результаты деятельности в долгосрочном периоде, должны разрабатывать определенные стратегии развития, так как в современных условиях традиционные принципы и опыт управления хозяйствующими субъектами уже мало эффективны. Таким образом, стратегия призвана обеспечить предприятию устойчивое положение на рынке даже в условиях жесткой конкуренции и динамично меняющейся внешней среды.

Понятие "стратегия" вошло в число управленческих терминов в 50-е годы XX столетия, когда проблема реакции на неожиданные изменения во внешней среде приобрела большое значение. Этот термин был взят из военного лексикона, где он означал планирование и проведение в жизнь политики страны с использованием всех доступных средств. В настоящее время хозяйствующий субъект для того, чтобы выжить в динамично меняющейся среде в условиях жестокой конкуренции, должен сделать все возможное, чтобы достичь необходимых экономических результатов. Так, организационно-правовой структуре необходимо вырабатывать такую стратегию своего развития, которая обеспечивала бы долгосрочное развитие и экономический рост, позволяла бы учитывать изменения, происходящие во внешней среде.

Так что же включает в себя термин "стратегическое управление"?

Ряд авторов, разрабатывавших идеи стратегического управления, дают различные определения этому термину. Одни авторы считают, что стратегическое управление – это такое управление, которое обеспечивает сложной организации сбалансированность и общее направление роста. По мнению других ученых-экономистов, стратегическое управление – это процесс управления с целью осуществления миссии организации посредством управления взаимодействия организации с ее окружением. Существуют и такие точки зрения на стратегическое управление как на набор решений и действий по формулированию и выполнению стратегий, разработанных для того, чтобы достичь цели организации.

В 90-е года XX века авторы давали термину "стратегическое управление" уже более расширенные определения. Например, экономисты промышленно развитых стран считают, что стратегическое управление – это такое управление, которое, используя комбинацию методов конкуренции и организации бизнеса, направлено на удовлетворение клиентов, успешную конкуренцию и достижение глобальных целей организации.

Некоторые российские экономисты приходят к выводу о том, что стратегическое управление – это такое управление организацией, которое ориентирует производственную деятельность на запросы потребителей, гибко реагирует и проводит своевременные изменения в организации, отвечающие вызову со стороны окружения и позво-

ляющие добиваться конкурентных преимуществ, что в совокупности дает возможность организации выживать в долгосрочной перспективе, достигая при этом своих целей; стратегическое управление – это управление организацией для достижения ее стратегических целей, определенных на основе исследования стратегических потребностей, товаров и рынков.

Таким образом, в более поздних определениях термина "стратегическое управление" делается акцент на том, что стратегия развития организационно-правовой структуры должна быть, в первую очередь, нацелена на потребности рынка, предприятие должно производить изделие, которое стабильно будет находить покупателей.

Исходя из определений понятия стратегическое управление, можно сделать следующие выводы:

- стратегическое управление призвано обеспечить хозяйствующему субъекту устойчивое социально-экономическое развитие в долгосрочной перспективе; главное при выработке стратегии – добиться такого положения на рынке и создать такую организацию, которые обеспечивают высокую производительность даже в непредвиденных обстоятельствах, в условиях жестокой конкуренции, вынужденных простоях и непредвиденных издержек;
- стратегия организации должна ориентироваться на рынок и потребителя;
- стратегия должна адаптироваться к изменениям в отрасли и конкурентной среде, в покупательских предпочтениях и потребностях, к появлению новых возможностей и угроз, к развитию технологий и другим событиям;
- стратегическое управление опирается на интуицию и искусство менеджеров вести предприятие к стратегическим целям;
- стратегическое управление включает в себе совокупность качественных пожеланий к тому, в каком состоянии должна находиться организация в будущем, а не детальное описание ее внутреннего состояния и положения во внешней среде;
- стратегическое управление подразумевает активное включение всех сотрудников в реализацию задач предприятия, в поиск наилучших путей достижения ее целей.

Любая стратегия, направленная на повышение результативности деятельности хозяйствующего субъекта, должна основываться на конкурентном преимуществе.

Опираясь на существующую миссию, хозяйствующий субъект формирует свои виды деятельности, будущих целевых потребителей и направления развития. Миссия задает общие ориентиры функционирования хозяйствующего субъекта, а конкретное конечное состояние, к которому в данный момент стремится предприятие, фиксируется в виде ее целей. На этапе постановки целей миссия организации трансформируется в конкретные результаты и итоги, к которым стремится хозяйствующий субъект. Цели являются исходным пунктом планирования деятельности хозяйствующего субъекта, точкой отсчета в процессе контроля и оценки результатов деятельности как отдельных работников, так и организации в целом.

План по достижению поставленных целей и реализации миссии предприятия находит свое отражение в стратегии хозяйствующего субъекта. Стратегия определяет, что, как и в какие сроки необходимо сделать, чтобы достигнуть долгосрочных целей и обеспечить выживаемость хозяйствующему субъекту.

Проведение стратегического контроля необходимо для того, чтобы выявить открывающиеся возможности и возникающие проблемы, выдать рекомендации относительно плана перспективных и текущих действий по комплексному совершенствованию стратегии. Стратегический контроль сфокусирован на выяснении того, возможно ли в дальнейшем реализовывать принятую стратегию и приведет ли ее реализация к достижению поставленных целей.

Таким образом, непрерывная корректировка и обновление компетенций и возможностей хозяйствующего субъекта для соответствия новым стратегическим требова-

ниям, рыночным условиям и ожиданиям потребителей – основа успешной реализации стратегии и залог прочного конкурентного преимущества.

Стратегическое управление необходимо, чтобы хозяйствующий субъект мог достичь позитивных результатов деятельности в долгосрочной перспективе, при этом стратегия должна быть способна адаптироваться к изменениям в отрасли и конкурентной среде, в покупательских предпочтениях и потребностях, к появлению новых возможностей и угроз, к развитию технологий и другим событиям.

Литература

1. Ансофф И. Стратегическое управление М.: Экономика, 1989
2. Виханский О.С. Стратегическое управление. М.: Гардарики, 2002. 296 с.
3. Забелин П.В., Моисеева Н.К. Основы стратегического управления. / Уч. пос. М.: ВИНТИ, 1997
4. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент / Пер. с англ. - СПб: Питер, 1999
5. Ламбен Ж-Ж. Стратегический маркетинг. Европейская перспектива / Пер. с франц. СПб.: Наука, 1996
6. Мельничук Д.Б. Семь граней стратегического управления предприятием, Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 5.
7. Портер М.Э. Конкуренция. М.: Изд. дом Вильямс, 2000. 495 с.
8. Томпсон А.А., Стрикленд Дж. Стратегический менеджмент. Концепции и ситуации. М.: Инфра-М, 2000
9. Фатхутдинов Р.А. Стратегический менеджмент. М.: ЗАО Бизнес-школа "Интел-Синтез", 1999

РЕИНЖИНИРИНГ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОЙ РОССИЙСКОЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ

М.Д. Пуляевский

Научный руководитель – д.э.н., проф. С.Б. Смирнов

Работа заключалась в изучении одного из возможных экономических методов преодоления убыточности крупных российских компаний, а именно метода реинжиниринга. Исследуя данную проблему, мы обратились к причинам и истории возникновения данного метода, дали ему определение, привели ряд основных реинжиниринговых мер, применяемых зарубежными компаниями, и попытались выявить целесообразность использования этих мер для российских предприятий.

Введение

В условиях развивающейся экономики России предприятиям достаточно трудно выживать и быть конкурентоспособными. Экономисты-теоретики разрабатывают различные подходы и методы для преодоления кризисных состояний предприятий. Некоторые из них успешно применяются на практике. В данной работе мы обратились к одному из самых действенных и эффективных, на наш взгляд, методов, к методу реинжиниринга. В наши задачи входило:

1. выявление предпосылок появления реинжиниринга;
2. анализ ряда теоретических вопросов, связанных с этим понятием;
3. изучение опыта проведения реинжиниринга в некоторых зарубежных компаниях, таких как "Texas Instruments" и "IBM Credit";
4. анализ применимости и полезности предложенных ими путей для российских компаний.

Актуальность темы обусловлена тем, что большое количество промышленных предприятий России, которые могли бы быть очень перспективными, не являются конкурентоспособными, поскольку их бизнес-процессы организованы нерационально и нуждаются в радикальном преобразовании их деятельности.

Возможно, применение методик реинжиниринга позволит достичь роста основных актуальных показателей деятельности компании.

Метод реинжиниринга, история и причины его возникновения

Обратимся к причинам возникновения данного экономического метода. На заре постиндустриального общества, определяемого такими признаками, как информатизация бизнеса и сегментация мирового рынка, насыщение общества материальными благами в процветающих странах, происходит переход от экономики серийного и массового производства к экономике индивидуальных услуг, ориентированной на клиента. Традиционная цель предприятия – произвести как можно больше продукции – ныне заменяется более сложной – обеспечить удовлетворение желаний заказчика за счет своевременного изготовления или поставки требуемых товаров.

Обычные представления о хорошем предприятии (фирме) как о монолитной, устойчивой и централизованно управляемой организации уступают место идеям самоорганизации. Последняя понимается как форма адаптации к быстро меняющимся требованиям рынка, разворачивающейся на основе реинжиниринга деловых процессов (business process reengineering – BPR) и тотального управления качеством (total quality management).

Реинжиниринг как экономическое явление зародился в США в начале 90-х годов, когда американские компании находились на грани кризиса из-за появления на внутреннем рынке японских компаний, которые по конкурентным свойствам превосходили американские. В то время нужен был быстрый и эффективный способ выхода из кризи-

са. Именно тогда профессор Майкл Хаммер ввел термин "реинжиниринг бизнес- процессов" .

Реинжиниринг (по определению Хаммера) – фундаментальный пересмотр и перепроектирование деловых процессов в компании для достижения резкого, скачкообразного улучшения основных актуальных показателей деятельности компании, таких как качество, стоимость, скорость обслуживания и т.д. Скачко-образность и радикальность данной методики отличает его от других методов. Сопоставление нижеприведенных схем наглядно отражает это (рис. 1).



Рис. 1. Модель непрерывного совершенствования процесса

BRP по своей философии отличается от постоянного совершенствования процессов. В своей радикальной форме он вообще не берет в расчет существующие процессы: раз они не работают, значит, испорчены – забудь о них и начни сначала. Такой подход "с чистого листа" позволяет отстраниться от настоящего и сосредоточиться на будущем, задать себе вопросы: как должен выглядеть процесс? Каким хотели бы его видеть мои клиенты? Каким хотели бы его видеть другие сотрудники? Как это делают первоклассные компании? Чего мы могли бы достичь с помощью новой технологии?



Рис. 2. Модель реинжиниринга "скачком"

Сегодня экономисты рассматривают BPR как революцию в бизнесе, которая знаменует отход от базовых принципов построения предприятий и превращает конструирование бизнеса в инженерную деятельность. Возможность такой революции обусловлена, в первую очередь, новейшими достижениями в области информационных технологий, специалисты которой начинают играть ведущую роль в конструировании бизнеса.

BPR является направлением, возникшим на стыке двух различных сфер деятельности – управления (менеджмента) и информатизации. Именно поэтому реинжиниринг требует новых специфических средств представления и обработки проблемной информации, понятных как менеджерам, так и разработчикам информационных систем. Подобные средства требуют интеграции ключевых достижений информационных технологий и создания соответствующих инструментальных средств поддержки реинжиниринга.

Опыт западных компаний в проведении реинжиниринга и возможности его использования в условиях российских предприятий

В настоящее время в западном мире, который является источником большинства передовых технологий, реинжиниринг приобретает все большую популярность. Чтобы проиллюстрировать эту тенденцию, приведем несколько цифр.

По данным компании Emst & Young, за последние полтора года правительство США инициировало более 250 проектов по реинжинирингу, а сегодняшний рынок инструментальных средств поддержки BPR оценивается более чем в 100 млн. долларов и растет со скоростью около 60% в год.

Упомянем лишь о некоторых компаниях, которые достигли значительных успехов благодаря применению методики реинжиниринга. Компания "IBM Credit" благодаря правильно проведенной самореорганизации смогла достигнуть 90-процентного сокращения времени прохождения сделок и роста производительности в 100 раз. А компания "Texas Instruments", выработав правильную стратегию развития, добилась повышения производительности и двукратного увеличения прибыли.

При проведении реинжиниринга руководства этих компаний предпринимали следующие шаги:

- несколько рабочих процедур объединили в одну, т.е. осуществили горизонтальное сжатие бизнес-процессов (горизонтальное сжатие в несколько раз ускоряет выполнение процесса);
- исполнители стали принимать самостоятельные решения, т.е. произошло не только горизонтальное, но и вертикальное сжатие процессов (наделение сотрудников большими полномочиями и увеличение роли каждого из них приводит к значительному повышению их отдаче);
- работа стала выполняться в том месте (подразделении, отделе), где это целесообразно (устраняется излишняя интеграция, что приводит к повышению эффективности процесса в целом);
- уменьшили количество проверок и управляющих воздействий;
- минимизировали количество согласований путем сокращения внешних точек контакта;
- единая точка контакта стала обеспечиваться уполномоченным менеджером (в тех случаях, когда шаги процесса либо сложны, либо распределены таким образом, что их не удается объединить силами небольшой команды).

Проведя сходную экономическую политику, огромное количество зарубежных компаний добилось больших успехов. Реализация принципов реинжиниринга дала им возможность наиболее рационально организовать производство и обеспечить соответствие продукции запросам потребителей, что позволило выжить в условиях современного рынка и стать конкурентоспособными.

Большинство российских предприятий, созданных еще в дорыночный период, не могут составить конкуренцию таким зарубежным компаниям, они нуждаются в коренной перестройке своей работы. Эти предприятия уподобляются механизму, эффективность которого задается в терминах производительности, а работники рассматриваются как винтики или шестеренки механизма. Руководство предприятия пытается организовать управление в интересах максимальной производительности, а не качества товара. Оно движется путем разделения производственного процесса на простейшие, элементарные части и осуществляет "предварительное программирование" задачи каждого сотрудника. Излишняя сегментация вызывает нецелесообразное увеличение штата и создание излишне громоздкой системы управления, что тормозит производственный процесс, а строгая регламентация задач мешает проявлению инициативы. Таким образом, наиболее характерными чертами таких предприятий являются жесткая функциональная иерархия и излишняя вертикальная и горизонтальная специализации, что в силу потребностей современного рынка делает эти предприятия убыточными и неконкурентоспособными.

Осознание причин несоответствия требованиям нового времени приводит эти компании к пониманию необходимости проведения реформирования. В связи с этим сегодня начинается продвижение консалтинговых услуг и инструментария реинжини-

ринга и на российский рынок. Пока, к сожалению, незначительная отечественная практика применения реинжиниринга показала, что этот метод необходим, особенно в условиях глобальных изменений в экономической сфере и активного внедрения России в мировую экономическую систему.

Заключение

Подводя итог, нам хотелось бы еще раз подчеркнуть важность данной темы в условиях современной российской экономики. Актуальность данной проблемы видится в том, что накопленный опыт и методы американских компаний в проведении реинжиниринга сегодня не только представляют большой интерес для России, но и требуют скорейшего внедрения, при условии адаптации к российским реалиям. Ведь масса промышленных предприятий, имеющих, по сути, большой потенциал, в силу нерациональной организации трудового процесса не могут его реализовать и составить конкуренцию зарубежным компаниям. Таким образом, им требуется реорганизация своей работы.

Нам кажется, что использование методик реинжиниринга, позволит нарастить финансовый потенциал и завоевать прочные позиции на международном рынке не только для отдельных компаний, но и для страны в целом. Реинжиниринг – это один из путей вывода России из кризиса и завоевания прочных позиций на международном рынке как для отдельных компаний, так и для страны в целом.

Литература

1. Медынский В.Г., Ильдеменов С.В. Реинжиниринг инновационного предпринимательства. М., 1999.
2. Балабанов И.Т. Инновационный менеджмент. Прогнозирование. Реинжиниринг. Бенчмаркинг. СПб., 2001.
3. Оболенски Н. Практический реинжиниринг бизнеса. М., 2003.
4. Ойхман Е.Г., Попов Э.В. Реинжиниринг бизнеса.. М., 1997.
5. Кутелев П.В., Мишурова И.В. Технология реинжиниринга бизнеса. М., 2003.
6. Davenport T.H. Business Innovation, Reengineering Work through Information Technology. Boston, M.A., 1993.
7. Smith H., Fingar P. Business Process Management (BPM): The Third Wave. NY, 1998.
8. Seacord R.C. Modernizing Legacy Systems: Software Technologies, Engineering Processes, and Business Practices. NY, 1999.

ПРОБЛЕМЫ ЗАНЯТОСТИ И ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЫНКА ТРУДА В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

Ж. С. Базарова

Научный руководитель – д.э.н., проф. С.Б. Смирнов

Проведен анализ рынка труда в Республике Бурятия, а также предложены эффективные направления политики государства на рынке труда республики путем создания единого информационного пространства и учреждения газеты для участников рынка труда.

Введение

Трансформация российского общества и переход экономики к рыночным принципам хозяйствования привели к обострению социальных проблем, среди которых важное место занимают вопросы занятости и безработицы.

Существующие в России территориальные различия в природных условиях и ресурсах, демографической базе и экономическом потенциале определяют специфические особенности функционирования регионального рынка рабочей силы. На региональном рынке труда, в каждой области, районе, городе как самостоятельном хозяйствующем субъекте складываются свои проблемы с занятостью населения. Вследствие этого большое значение имеет исследование региональных аспектов регулирования рынка труда.

Проведение сбалансированной активной политики занятости возможно только при наличии исчерпывающей информации о составе, структуре и социально-психологических характеристиках субъектов рынка труда. Ситуация на рынке труда обусловливается влиянием экономических, социальных, демографических факторов.

1. Состояние рынка труда в Республике Бурятия

Республика Бурятия является субъектом Российской Федерации и входит в состав Сибирского Федерального округа. Республика Бурятия относится к числу территорий, подверженных "глубокой депрессии". Рынок труда в Республике Бурятия формируется под влиянием уровней экономического развития, качества жизни населения, традиций и особенностей менталитета коренной народности, социальным поведением экономически активного населения.

Проведенный анализ рынка труда в Республике Бурятия по данным Федеральной государственной службы занятости Республики Бурятия и Улан-Удэнского городского центра занятости показал, что уровень безработицы от численности экономически активного населения составляет 16,7% на 2002 г. Количественная характеристика безработицы, или уровень безработицы, может быть 4-х видов:

- естественный уровень безработицы – от 1,5 до 4% ЭАН;
- приемлемый уровень безработицы – от 5 до 7% ЭАН;
- критический уровень безработицы – от 8 до 11% ЭАН;
- массовый уровень безработицы – 11% ЭАН и выше.

Численность постоянного населения на 1 января 2002 года составила 1039,2 тыс. чел. Городское население составляет около 60% от всего населения, сельское – 40% , в столице республики, г. Улан-Удэ, проживает около трети населения республики [11].

Численность экономически активного населения республики составила 448 тысячи человек (в 1995 г. – 508 тыс. человек) (табл. 1).

Согласно рекомендациям Международной Организации Труда (МОТ)¹, к экономически активному населению (ЭАН) относятся все лица, которые участвуют в произ-

¹ Международная организация труда была создана как автономная организация в 1919 г. при Лиге наций, занимающаяся вопросами регулирования международного рынка труда.

водстве товаров и услуг, включая производство товаров для рынка по бартерным каналам и для личного пользования. По количеству отработанного времени ЭАН подразделяется на занятых, безработных и частично занятых.

К экономически неактивному населению международная статистика относит всех, кто, независимо от возраста, не входит в категории ЭАН, о чем говорилось выше. В составе экономически неактивного населения можно выделить также несколько групп. Самую большую группу составляют учащиеся очных форм обучения, домашние хозяйки, пенсионеры по старости и т.д. [8, с.10].

Показатель	1995	1998	1999	2000	2002
Численность постоянного населения, тыс. чел.	1050,6	1048,0	1045,3	1041,1	1039,2
В том числе:					
Общая численность трудоспособного населения, тыс. чел	598,2	602,5	604,8	609,6	613,9
В том числе:					
Экономически активное население, тыс. чел.	508,2	499,8	494,9	496,2	501,0
Из них:	420,4	386,9	375,4	397,9	417,2
Занятые в экономике	87,5	112,9	119,5	98,3	83,8
Безработные, всего	111,0	105,2	109,9	144,4	165,9
Экономически неактивное население, тыс. чел					
Доля экономически активного населения в общей численности трудовых ресурсов в %	84,9	82,9	81,8	81,3	81,6

Таблица 1. Экономически активное население в общем объеме трудовых ресурсов

Из табл. 1 видно, что с каждым годом уменьшается численность экономически активного населения в общем объеме трудоспособного населения. Наибольший пик безработных граждан приходится на 1998–1999 годы, главной причиной является "августовский" кризис 1998 года. Начиная с 2000 года, ситуация на рынке труда стабилизируется. Так, в 2002 году численность незанятого населения составляет 83,8 тыс. человек (в 1999 – 119,5). Это связано с некоторым "оздоровлением" экономики республики.

Демографические процессы, произошедшие за годы реформ, были в целом для республики неблагоприятными. Начиная с первых лет реформ, идет систематическое сокращение населения. Так, если в 1992 году население республики составило 1050 тыс. человек, то на начало 2002 года – 1039 тыс. человек, т.е. произошло сокращение более чем на 11 тыс. человек [8 с.3]. Основными причинами является отток населения из республики; особенно из зоны БАМа, а также естественная убыль населения, т.е. превышение количества умерших над родившимися.

Показатель	1987	1990	1993	1999	2002
Число родившихся, чел	23,3	18,2	11,4	11,0	11,3
Число умерших, чел	8,0	9,1	11,7	12,6	12,7
Естественный прирост/убыль	15,3	9,1	-0,3	-1,6	-1,4

Таблица 2. Естественное движение населения Республики Бурятия (в расчете на 1000 человек)

Наращение негативных тенденций на рынке труда Республики Бурятия и обострение социальной напряженности определяют необходимость исследования проблем

управления занятостью. Достижение полной, продуктивной и свободно избранной занятости требует достаточной гибкости управления ею, а также маневренности рычагов оперативного решения и регулирования социальных проблем. Это означает неизбежность перехода на новые методы регулирования занятости, основанные на сочетании рыночных принципов и активного участия государства в регламентации правил предпринимательской деятельности, функционирования рынка труда, социальной защиты населения от безработицы.

2. Информационное обеспечение рынка труда в Республике Бурятия

Важнейшей из сфер государственного регулирования процессов на рынке труда Республики Бурятия является создание возможностей беспрепятственного получения информации всеми субъектами рынка. Работодателям необходима информация о количестве и качестве предлагаемой рабочей силы, требованиях, предъявляемых наемными работниками к условиям труда и его оплате, наемным работникам – о наличии вакансий, условиях найма, характере и содержании труда на предполагаемых рабочих местах, транспортной доступности и перспективах развития и, наконец, различным рекрутинговым агентствам и центрам занятости населения нужна информация из внешних источников (из Госкомстата, из высших учебных заведений, от предприятий и организаций и т.д.). Недостаток данных или их неправильная интерпретация могут привести к искажению реального положения и, вследствие этого, к принятию ошибочных управленческих решений. Также в современном обществе важнейшая роль принадлежит коммуникациям. Коммуникация – это обмен информацией, на основе которого индивид получает информацию, необходимую для принятия эффективных решений. Если коммуникации налажены плохо, решения могут оказываться ошибочными, люди могут неверно понимать, что происходит на рынке труда, как вести себя при трудоустройстве. В связи с этим безработным гражданам необходима полная информативная поддержка.

Для служб занятости в Республике Бурятия было бы приемлемым принять решение об организации единого информационного пространства. Особое значение необходимо придать СМИ и INTERNET, так как они являются основным инструментом для связи с общественностью. В частности, можно было бы учредить газету, которая:

- во-первых, стимулировала бы безработного к трудоустройству, тем самым создавался бы благоприятный имидж Государственной службы занятости;
- во-вторых, обеспечивала бы население информацией по определению своих возможностей на рынке труда, оформлению договоров и трудовых книжек, о психологической и профориентационной деятельности службы занятости населения;
- в-третьих, публиковала бы статьи по экономическим, социальным и психологическим проблемам безработного

В результате проведения такой информационной поддержки незанятого населения республики существенно сократился бы дисбаланс между совокупным спросом и совокупным предложением на рынке труда.

Различными аспектами проблемы занятости в Бурятии занимаются многие министерства и ведомства. При этом их действия в различной степени носят разрозненный характер и являются несогласованными, что приводит к снижению их эффективности. В связи с этим возникает необходимость использовать системный подход при решении проблемы безработицы. Так, одной из задач единой информационной базы является объединение информационных массивов различных ведомств, в той или иной степени связанных с проблемой занятости населения.

Это позволит, во-первых, объединить усилия служб занятости налоговой инспекции в поиске фиктивных безработных, во-вторых, координировать деятельность отделов социальной защиты районных администрации и соответствующих центров занятости и на основе этого более точно определять наиболее нуждающиеся семьи с целью

оказания адресной помощи, в-третьих, проводить детальный и оперативный мониторинг занятости в конкретном районе или городе Бурятии.

Создание единой базы данных позволяет службам занятости оперативно получать необходимую информацию обо всех официально зарегистрированных безработных, получающих различные виды доходов, в том числе пособия, заработную плату, денежные вознаграждения по трудовому соглашению. Это позволит, во-первых, выявить нарушителей статуса безработного, так как некоторые из них в действительности имеют неучтенные службой занятости доходы, во-вторых, определить тех безработных, которым действительно необходима первоочередная адресная помощь.

Для создания сводной информационной базы, на наш взгляд, необходимо участие нескольких заинтересованных ведомств Республики Бурятия и государственных учреждений г. Улан-Удэ, обладающих соответствующей информацией, и реализация следующих мероприятий.

- Департамент Федеральной службы занятости по Республике Бурятия и модельный центр по труду и занятости населения г.Улан-Удэ предоставляет данные по безработным
- Налоговая инспекция г. Улан–Удэ обеспечивает информационную базу данными по полученным доходам населения города, в том числе по различным договорам и трудовым соглашениям.
- Регистрационная палата г. Улан-Удэ предоставляет информацию о том, зарегистрирован ли данный безработный в качестве предпринимателя без образования юридического лица.
- Отделы социальной защиты при районных администрациях города получают информацию о получении пособий по безработице и предоставляют в службы занятости данные о получении пособий на детей, а также субсидий на оплату жилищно-коммунальных услуг.

Заключение

Таким образом, создание эффективного информационного пространства на рынке труда является важнейшим средством государственного регулирования, обеспечивающим оперативность управления в условиях его децентрализации.

Литература

1. Батуева Р.Н. Улан-Удэ: рынок труда сегодня. // Бурятия. 1998. 22 нояб. С..4.
2. Боровик В.С., Ермакова Е.Е. Занятость населения: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. 320 с.
3. Годовые отчеты о деятельности Центра занятости с 1994 по 2003 гг.
4. Закон "О занятости населения в Российской Федерации"
5. Маслова И.С. Российский рынок труда. М.: Экономика , 1993.125 с.
6. Никифорова А.А. Рынок труда, занятость и безработица. М.: Международные отношения, 1991. С.4
7. Почепцов Г.Г. Теория коммуникаций. М.: Рефл-Бук, 2001.С.24.
8. Пытин Н.М.Рынок труда, итоги и прогнозы.// Бурятия.2000. 28 янв.С.4
9. Социально-демографическое развитие Республики Бурятия Статистический сборник Госкомстата Республики Бурятия
10. Труд и занятость в России. М.: Экономика. 1998.56 с.
11. Экономическая теория.. СПб.: Изд-во СПб ГУЭФ, 1997..327 с.
12. <http://gov.buraytia.ru>

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ТРАНСЦЕНДЕНТАЛЬНОЙ ЛОГИКИ КАНТА В ТРУДАХ Н.Я. ГРОТА

И.О. Ломова

Научный руководитель – к.ф.н., доц. Т.А. Новолодская

В работе проводится анализ основных положений трансцендентальной логики И. Канта на основе работ русского логика XIX века Николая Яковлевича Грота.

Вопросы по теме, обозначенной в заглавии, затрагиваются в работах таких авторов, как Б.С. Грязнов, А.Г. Павлов, А.А. Ермичев. Тем не менее, разработка данной темы обусловлена необходимостью глубокого анализа наследия И. Канта в традиции русской логики XIX века. Для этого нужно изучить работы логиков и философов того периода, провести сравнительный анализ и оценить их влияние на будущее развитие логики и философии в России.

В XIX веке Кант осуществил грандиозную попытку компромисса между эмпиризмом и рационализмом. Сама человеческая способность, согласно Канту, имеет двойственный характер, получающий свое выражение в таких основных структурных элементах, какими являются созерцание и мышление. Исследуя природу этого "прирожденного интеллекта", он согласен с эмпириками, что все содержание нашего знания извлекается нами из опыта, из ощущений, но формы, в которые укладывается это содержание, природенны, составляют неотъемлемую принадлежность разума по самой природе его, именно формы дают порядок, единство и необходимость всем продуктам умственной деятельности человека. Они организуют приобретаемое из опыта содержание и служат поэтому неизбежными условиями всякого опыта.

Критика чистого разума есть прежде всего измерение и обозрение его (разума) сущности и структуры. Критика не отвергает чистый разум. Она призвана определить этот разум в границах его собственной природы и внутреннего единства. Критический анализ структуры познавательной деятельности Канта дал возможность отказаться от метафизики и не выходить за пределы научного знания. Вполне признавая контраст видимых индивидуальных вещей и их внутренних сущностей, Кант в своей "Критике чистого разума" доказал непознаваемость последних и невозможность метафизики как науки. Отличая разум от чувственного опыта как два различных начала, он старался доказать, что разум не имеет особые объекты познания, а только обладает известными формами. Если Кант полагает, что время есть форма внутреннего опыта, и заявляет, что "опыт возможен только посредством представлений о необходимой связи восприятий", то время оказывается ключевым понятием в этой формулировке, и тем самым он выходит на признание психологических феноменов в организации представлений о времени.

Русские логики испытали на себе влияние этих кантовских установок. Новый взгляд на логику вызвал стремление к переработке и нахождению новых оснований. Появляются многочисленные попытки реформы логики: нетрадиционная логика Н.А. Васильева, "Систематическое изложение логики" В.Н. Карпова, "Логика" М.И. Владиславлева.

Профессор философии Московского университета Николай Яковлевич Грот продолжает эту традицию. Грот считает, что компромисс эмпиризма и рационализма, достигнутый Кантом, был все-таки мнимым, заключавшим в себе с самого начала фальшь. Если истинная природа вещей все-таки не открывается нам посредством чувственного опыта и его интеллектуальной переработки, то к чему же человек станет тратить силы на бесполезное по существу изучение феноменов? Если же признать, что изучение феноменов способно дать правильное представление о мире, то к чему же еще предположение непознаваемости сущностей вещей. Если сущности вещей непознаваемы есте-

ственным путем, то каким образом мы можем знать, что они вообще существуют как нечто самостоятельное от феноменов и им противоположное?

Таким образом, Грот находит в его основоположениях одно несомненное противоречие: если человеческий разум находит в себе а priori всеобщие и необходимые, т.е. безусловные формы и нормы своей деятельности, и теоретической и практической, то как же можно утверждать, что ничто безусловное, объективно необходимое не доступно познанию теоретического разума? По меньшей мере, естественно предположить, что в этих абсолютных априорных формах познания и деятельности человеческого духа раскрывается для теоретического разума абсолютная природа нашего собственного духа и что положение Канта о том, что и наша собственная жизнь открывается нам только в явлениях, неверно.

Одно из двух: или мы в своем самосознании находим только явления, и тогда безусловные формы познавательной деятельности разума – мираж, если эти формы реально даны в самосознании, и тогда дух открывается нам не только в своих явлениях, но и в "абсолютной" своей природе.

Прежде, считает Грот, следовало бы познать сущности вещей, а затем утверждать, что они существуют. По его мнению, ошибка Канта заключалась в том, что признав совершенно правильно внутренне происхождение известных идей, которыми мы пользуемся при истолковании своего внешнего чувственного опыта, он предположил все-таки их прирожденность и признал их готовыми данными в уме каждого человека, как только он появился на свет. Сам Грот отрицает прирожденность упомянутых идей и старается выяснить постепенное происхождение некоторых из них из переработки и осложнения внутренних ощущений, относящихся к деятельности нашего собственного организма. В числе этих идей внутреннего происхождения находятся, например, идеи пространства, времени, причины и действия.

Грот расценивает учение о времени как о форме явления души самой себе как главную ошибку кантовской философии. "Время, – говорит русский логик, – есть только субъективный способ представления, а его "объективный коррелят" находится во внешней среде. А отождествление внешнего с пространственным, как явным образом, и внутреннего с временным, – это просто ошибка Канта. Она подрывает основы логики, этики и эстетики – наук о "сверхвременных" формах духа, посредством которых наше вневременное "Я" приобщается к вечной, божественной жизни".

Это приводит Грота к мысли, что наша внутренняя жизнь протекает за пределами времени и, различая в ней временные моменты, мы только искусственно переносим сюда эту форму внешнего опыта по тому же психологическому закону, по которому мы переносим во внешний мир наши собственные душевные состояния. А "опыт" философского мышления, познания, имеет сверхчувственный характер. В нем душа не "является" себе, а познает себя так, как она есть, вне времени и пространства, сама по себе. Условия чувственного восприятия познаются в трансцендентальной рефлексии, не посредством чувственного восприятия, а сверхчувственного восприятия. Следовательно, время – форма не всякого внутреннего опыта, и познание непреложных законов мысли, воли, чувства осуществляется посредством сверхчувственного внутреннего опыта.

Исследование этой темы выявило широкие возможности дальнейшего применения материала: альтернативный курс лекций, разработка методических пособий на основе научных изысканий.

В работе было проведено исследование восприятия и ассимиляции идей Канта на почве русской логики на примере работ Н.Я. Грота.

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.

П.С. Чернышева

Научный руководитель – к.ф.н., доц. Т.А. Новолодская

Логическая теория решений осуществляет попытку формализовать процесс принятия решений с помощью логических и математических средств. Суть процесса решения сводится к поиску метода, позволяющего за конечное число шагов найти среди возможных действий оптимальное. Использование этих методов дает возможность прогнозировать решения даже в таких сложных системах, как экономика, культура и политика.

Чем больше объем информации, которым приходится оперировать современному человеку, чем шире набор его возможностей и чем богаче спектр его желаний, тем сложнее оказывается человеку принимать решения. Обработка информации, необходимая для принятия решения, зачастую превосходит возможности человеческого интеллекта, а груз ответственности иногда превышает возможности человеческой психики. В такой ситуации исследование способов оптимизации принятия личностных и институциональных решений является на сегодняшний день насущной потребностью во многих сферах деятельности. Поэтому не случайно в конце XX века в различных областях знания создаются так называемые теории принятия решений, призванные облегчить процесс принятия научных, организационных и личностных решений.

Так сложилось, что процесс принятия решений изучался в основном математиками. В философии ему уделялось внимания гораздо меньше. В силу этого представляется, что исследование процесса принятия решений с логико-философских позиций является актуальным.

Основной целью исследования является выявление основных логических и методологических критериев принятия рациональных решений на основе количественного или качественного подходов в различных проблемных ситуациях. Для достижения этой цели предполагается решить следующие задачи.

1. Выявить на историко-философском и историко-математическом материале основные этапы исследований практических рассуждений как процесса обоснования деятельности, на базе которых впоследствии выстроилась логическая теория принятия решений. В этом направлении представляют интерес теория игр Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна, математическая теория исследования операций, теория принятия рациональных решений и логическая теория принятия решений Р.К. Джеффри.

2. Провести сравнительное исследование современных логических и математических концепций, формализующих различные аспекты принятия решений.

3. Выявить источник возникновения проблем, с которыми сталкиваются специалисты при использовании математических методов оптимизации решений в реальных ситуациях.

4. Осуществить с логико-методологических позиций экспликацию основных характеристик практического мышления "целесообразности" и "полезности" и их разнообразных трактовок в философии, психологии и экономике.

Собственно вопрос об изучении процесса принятия решений в качестве научной дисциплины стал осмысленным с середины 20 века, а создание теории принятия решений стало возможным и нужным только в конце 20 столетия, когда человечество вступило в эпоху так называемой информационной революции.

В узком смысле понятие "информационная революция" обозначает технологическое изменение, при котором производство, распределение и потребление информации рассматривается как преобладающая сфера экономической деятельности общества. Информация становится самым эффективным источником и инструментом власти, а стоимость времени и скорость коммуникаций оказываются определяющими па-

раметрами рынка. В более широком понимании термин "информационная революция" отражает революционное воздействие информационных систем на все сферы человеческой жизни. Информационные системы – книгопечатание, телефония, радиосвязь, персональный компьютер – создают технологическую базу для преодоления любых расстояний при передаче информации и тем самым стимулируют интеграцию интеллектуальных способностей и духовных сил человечества. Это приводит к колоссальному увеличению объема информации, которым приходится оперировать человеку в процессе принятия решений. В таких условиях выбор оптимального решения становится все более сложным, а деятельность по принятию решений предполагает еще более высокую степень ответственности. С каждым днем люди вынуждены решать все более трудные задачи, касающиеся экономики, технологии, задачи руководства и управления организациями, межличностных отношений.

Нужно отдельно отметить, что не только организационные решения, но и личные стали сегодня очень трудными. Например, выбор вуза, в котором индивид хотел бы получить образование, выбор работы из ряда альтернатив, каждая из которых обладает своими преимуществами, выбор покупок – от крупной дорогостоящей продукции (автомобиля, например, или квартиры) до товарной мелочи (шампуня или средства для мытья посуды) – все эти решения современный человек вынужден делать в ситуации информационной перегрузки, ему предлагается слишком много, больше, чем он способен обдумать, проанализировать, оценить, в результате чего человек часто не может принять оптимальное решение и оценить для себя значение собственного выбора.

Таким образом, процесс принятия решений оказался объектом пристального внимания различных дисциплин – психологии, педагогики, математики, экономики, кибернетики, социологии и других, каждая из которых, несмотря на существенные результаты, оказывается недостаточной для целостного описания принятия решений. Единственным выходом из сложившейся ситуации является разработка междисциплинарного подхода, способного синтезировать результаты других наук и выработать единое описание, учитывающее все три основных аспекта процесса принятия решений - психологический, логический и организационный.

В этом контексте кажется вполне естественным отнести эту интегрирующую роль логике – в рамках логической теорией принятия решений. Во-первых, в силу того, что логика уже не раз брала на себя функцию связующего звена между математическим и гуманитарным знанием. Достаточно вспомнить связь логики с математикой и кибернетикой, с экономикой через логику, с одной стороны, а с другой стороны, с лингвистикой, филологией и психологией. Во-вторых, логика, как наука о законах мысли, является, по сути, одной из центральных философских дисциплин, а это позволяет поднять исследование процесса принятия решений на уровень философского анализа. Рассмотрение проблемы в философском ракурсе позволяет придерживаться поставленных логических задач, не теряя связи с общим мировоззренческим контекстом. Логический анализ процесса принятия решений рассматривается как исследование рациональных стратегий достижения согласия между мышлением и действием, между осознанием необходимости выбора и самим актом решения, между принятием решения и последствиями этого решения, согласия как внутриличностного (когда решение принимается одним субъектом), так и достижения согласия и в контексте анализа социальных структур (интерсубъективного обоснования социально значимых положений). Логика принятия решений будет определяться как моделирование рациональных схем оптимального выбора среди доступных альтернатив¹.

¹ Ишмуратов А.Т. Практические рассуждения и игровые модели. В кн. "Рациональность, рассуждение, коммуникация". Киев, 1989

В самом общем смысле, принимать решение – значит делать выбор между разными способами достижения поставленных целей на основании сравнения их возможных следствий. Суть процесса принятия решений заключается в следующем

- определить, сколькими способами может быть достигнута принятая цель,
- выявить, который из этих способов лучший,
- оценить возможные последствия поступка в аксиологическом измерении.

Процесс принятия решения в общем виде можно представить как трехступенчатую процедуру:

- идентификация проблемы.
- конструирование альтернативных способов ее решения.
- выбор лучшей альтернативы ²

Содержание этой процедуры имеет общие шаги в принятии решений применительно к любой области познания и деятельности. Используя представленный алгоритм, любой сознательный акт практической направленности можно рассматривать как процесс принятия решений, и тогда теория принятия решений, очевидно, окажется дисциплиной самого высокого уровня общности, как теория познания в философии или теория деятельности в психологии. Чтобы определить ее место в системе знаний, необходимо подчеркнуть билатеральный, двойственный характер логической теории решений. С одной стороны, она опирается на количественные методы и является развитием математической теории принятия решений, с другой стороны, в философском контексте логическая теория решений строится на базе анализа так называемых практических рассуждений и стоит в одном ряду с другими современными модальными логиками. Ее, безусловно, можно рассматривать как синтез различных теорий решений, создававшихся в разных областях знания, и, тем не менее, она отнюдь не исчерпывается этой синтезирующей ролью.

Впервые количественный анализ процесса принятия решений был осуществлен в 1944 г Дж. фон Нейманом и О. Моргенштерном в фундаментальном труде "Теория игр и экономическое поведение", хотя отдельные результаты были опубликованы еще в 20-х годах. Предметом теории игр являются такие ситуации, в которых важную роль играют конфликты и совместные действия. Книга содержала главным образом экономические примеры, поскольку экономическому конфликту легче всего придать численную форму.

Во время Второй мировой войны и сразу после нее теорией игр серьезно заинтересовались военные, которые увидели в ней аппарат для исследования стратегических решений. С этого момента закладываются основы математической теории исследования операций, которая развивалась с все возрастающей скоростью и в настоящее время представляет собой развитую математическую дисциплину. Затем главное внимание снова стало уделяться экономическим проблемам.

Математическая теория игр начиналась с анализа обычных игр: салонных, спортивных, карточных и др. В настоящий момент подобные игры служат материалом для иллюстрации положений и выводов этой теории. В экономической теории "игрой" называют формальную математическую модель рыночного взаимодействия. Сейчас ведется работа, направленная на расширение сферы применения теории игр; в результате стало принятым считать, что различные виды общественного, социально-экономического или политического конфликта близки к проблемам теории игр и могут быть эффективно описаны и исследованы в ее терминах.

Теория игр рассматривает задачи принятия решений в ситуациях с заданным количеством участников. В описании задаются параметры исходной ситуации (задания, требующего решения), множества альтернатив (допустимых решений) и способов мак-

² Светлов В.А. Практическая логика. СПб, 1995

симизации целевой функции субъекта решения. Значение целевой функции для каждого из субъектов зависит и от решений, принимаемых всеми остальными участниками. Различные виды игр классифицируются по конкретным принципам: по числу игроков, по числу стратегий, по свойствам функций выигрыша, по возможности предварительных переговоров и взаимодействия между игроками в ходе игры. В зависимости от числа игроков различают игры с двумя, тремя и более участниками. В соответствии с вероятностным критерием задачи могут быть специфицированы как детерминированные, стохастические или неопределенные. Согласно другому принципу классификации, по количеству стратегий, различают конечные и бесконечные игры. В конечных играх игроки располагают конечным числом возможных стратегий (например, в игре в орлянку игроки имеют по два возможных хода – они могут выбрать "орел" или "решку"). Соответственно, в бесконечных играх игроки имеют бесконечное число возможных стратегий. Так, в ситуации Продавец-Покупатель каждый из игроков может назвать любую устраивающую его цену и количество продаваемого (покупаемого) товара.

Третий способ классификации игр – по свойствам функции выигрыша (платежных функций). Особое внимание в теории игр заслужила ситуация, когда выигрыш одного из игроков равен проигрышу другого, т.е. наличию прямой конфликтности между игроками. Подобные игры называются играми с нулевой суммой, или антагонистическими играми. Игры в орлянку или в очко – типичные примеры антагонистических игр. Прямой противоположностью играм такого типа являются игры с постоянной разностью, в которых игроки и выигрывают, и проигрывают одно-временно, так что им выгодно действовать сообща. Между этими крайними случаями имеется множество игр с ненулевой суммой, где имеются и конфликты, и согласованные действия игроков³.

Также задачи могут классифицироваться как статические, в которых исходная ситуация представляет собою неизменное информационное состояние, а процесс решения сводится к одному акту, и динамические, представляющие собой поэтапный, многошаговый процесс в ситуации изменяющегося информационного состояния. В зависимости от определения типа задачи разрабатываются различные способы оптимизации решений.

После создания теории игр и теории принятия рациональных решений, разработанной преимущественно математиками и экономистами, появилась так называемая поведенческая теория решений, разработанная психологами. Первая ставит вопрос "Как принимать решения рационально?", вторая – "Какие из альтернатив оптимальны?"⁴.

В 60-х гг. англ. логик Р.К. Джеффри закладывает основы логической теории решений, в которой он также широко применяет точные математические методы и инструментарий теории вероятностей и математической теории игр⁵. И среди математиков существует точка зрения, что логическая теория решений является развитием математической теории. Однако предпосылки для возникновения будущей логической теории решений возникли задолго до появления ее математической модели. Учение Аристотеля о практическом силлогизме – тому подтверждение⁶. Применение математических моделей для оптимизации решений ориентировано только на использование количественных методов анализа. Но количественные методы имеют достаточно ограниченную область их применения и их практическая ценность не универсальна. Математическая теория решений в основном имеет дело с задачами, легко поддающимися формализации. Точные количественные методы неприменимы в задачах, содержащих в опи-

³ Льюс Р.Д., Райфа Х. Игры и решения. М., 1961

⁴ Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. М, 1979

⁵ Jeffrey R.C. The logic of Decision. New York, 1965

⁶ Аристотель. Метафизика. Соч. в 4-х тт., М., 1971-1983

сании исходной ситуации и альтернатив нечеткую или не поддающуюся количественной обработке информацию.

Качественное разнообразие задач, требующих решения – от проблемы инвестиций до реформ системы образования, от институциональных до личностных проблем – не предполагает универсального метода решения. Даже для наиболее простых классов задач не всегда удастся представить решение в виде единообразного аналитического выражения от соответствующих параметров. В формулировках основной части практически значимых задач содержится большой объем информации, несводимой к количественному описанию. Поэтому трудность перевода информации в численные выражения можно считать основным препятствием на пути широкого применения математических методов для оптимизации процесса принятия решения.

Следующую трудность можно было бы охарактеризовать как "этическую безразличность": чисто инструментальный характер количественной (математической) оценки, разрабатывающей оптимизацию решения без учета характера самих целей. Математическая теория решений исследует процесс выбора оптимальных средств для достижения целей, она предписывает выбор наилучших методов, не прибегая к рассмотрению самих целей. В этой теории одинаковыми средствами будет решаться вопрос и о выборе оптимального вина к обеду, и о необходимости веры в бога, и в любом случае ею будет предписываться выбор наиболее полезной альтернативы.

В-третьих, она не дает содержательной интерпретации ситуации, ее альтернатив и целей. В математическом описании целевая функция отождествляется с целесообразностью, нет способа ввести в описание когнитивный контекст и определить критерии практической "разумности" действий субъекта, соответствия целесообразности формальной с практической рациональностью. Она опирается на анализ задания, требующего решения, структура которого определяет решение. Именно от точного анализа задачи зависит выбор оптимальной стратегии – будет ли это игра в "орла или решку", выбор научной парадигмы, политическая или экономическая проблема. При этом полностью игнорируются черты того, *кто* принимает решение, что может привести к весьма сомнительным практическим результатам.

Логическая теория решений осуществляет попытку формализовать процесс поиска оптимальных средств для достижения целей, ориентируя на выбор наилучших методов для эффективного разрешения сложных проблем, конфликтов, тупиковых ситуаций. Логическая теория обладает по сравнению с математической более широкой сферой ее применения, так как использует возможности аппарата модальной логики для анализа нестандартных проблем. Она предлагает широкий набор и формальных методов, позволяющих с большой вероятностью предвидеть поведение людей в процессе разрешения проблемных задач. Использование этих методов дает возможность прогнозировать решения даже в таких сложных системах, как экономика, культура и политика.

Объяснительная функция теории состоит в формулировке а) внешних механизмов принятия решений, которые носят вероятностный характер и б) внутренней системы правил, которую использует человек в процессе принятия решений. Опорными пунктами этой системы являются исходная информация, альтернатива, желательность, объективные и субъективные вероятность и полезность, алгоритм и стратегия решения. Методологическая функция теории принятия решений обеспечивает использование формальных методов для усовершенствования процесса принятия личностных и институциональных решений. Важным преимуществом логической теории решения, опирающейся на формально-логические и вероятностные методы, является ее универсальность. Она может служить инструментом, обеспечивающим оптимизацию административных решений, применяться для руководства и управления предприятием, в системе

образования, в выборе научных парадигм, в разрешении политических или экономических проблем.

В логической теории существует возможность привлечения результатов исследований психологии. Логическая теория игр рассматривается как серьезная попытка формализовать "психологический фактор" – элемент случайности, субъективности.

Круг приложений логической теории решений весьма широк. Помимо разнообразных связей внутри логики (существует ряд разделов логики и философии, занимающихся обоснованием деятельности – логика действий, норм, оценок и др.), теория решений предполагает многочисленные связи вне ее. Логическая модель принятия решений может использоваться и для решения технических, технико-экономических, социально-экономических задач, а также задач управления на различных уровнях деятельности. Моделирование человеческого поведения, создание диалоговых экспертных систем "Человек – машина" в рамках логической теории решений позволяет высветить дифференциацию функций человека и машины.

В процессе обучения и работы с информационными потоками разработка оптимальной модели для принятия решений становится не менее актуальной, чем для исследования стратегических решений в военной области и политике.

Универсальность логической теории решений, применимой для оптимизации административных решений, в системе образования или в выборе научных парадигм, делает ее одним из незаменимых методологических инструментов в сложной и динамичной ситуации информационного общества. Она позволяет справиться с основными трудностями, с которыми сталкиваются специалисты при использовании математических методов оптимизации решений в реальных ситуациях:

- недостаточной применимостью математических моделей для решения слабо структурированных проблем, содержащих в описании исходной ситуации и альтернатив нечеткую или не поддающуюся количественной обработке информацию;
- отсутствием способа ввести в описание когнитивный контекст и определить критерии практической "разумности" действий субъекта при содержательной интерпретации ситуации, альтернатив и целей;
- ограниченностью чисто инструментальным характером количественной (математической) оценки, разрабатывающей оптимизацию решения без учета характера самих целей.

Количественный подход применим только для решения закрытых задач – ситуаций, в которых цель очевидна, а необходимая стратегия обнаруживает себя как алгоритм решения. В этом случае вполне оправдано применение чисто математических методов. Для решения открытых задач – ситуаций, когда цель сформулирована в понятиях с очень широким объемом – необходимо основываться на теории принятия решений, которая наряду с критериями инструментальной рациональности содержала бы императивы относительно выбора конструктивных целей. Это предполагает использование качественных, содержательных методов решения.

Разработка критериев аксиологической теории решений, использование качественных методов для решения открытых и слабо структурированных задач и привлечение результатов исследований психологии позволяет существенно увеличить практическую ценность логической теории решений.

ВОПРОСЫ АБСТРАКЦИИ В ЛОГИЧЕСКОМ УЧЕНИИ СТОИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

О.Ю. Стукалова

Научный руководитель – д.ф.н., проф. З.О. Джалиашвили

Развитие науки, трудности процесса познания неизбежно заставляли мыслителей прошлого обращать внимание на проблему абстракции. В связи с этим было интересно обратиться к трудам мыслителей прошлого – Стоической школе. В логике стоиков понятие об абстракции связано с учением о "лектон", на основе которого была построена их пропозициональная логика. Пропозициональная логика как некая абстрактная формальная система возникает для того, чтобы описывать и изучать логос. Язык непосредственно связан с процессом абстракции и является важнейшим средством абстрагирующей деятельности, любые абстракции выражаются в языке, и с этой точки зрения важны исследования Хрисиппом природы и значения языкового знака.

Со времен античной древности проблема абстракции разрабатывалась в различных аспектах и в различной связи философами и логиками. Считается, что впервые в античной философии проблема абстракции была сформулирована Гераклитом. Известное высказывание о том, что невозможно дважды войти в одну и ту же реку, выявляет трудности процесса отождествления предметов между собой по каким-то определенным "жестким" свойствам, так как единичные предметы постоянно изменяются [1, с. 45].

Термин "абстракция" (*abstractio*) впервые был введен Боэцием. Это был перевод с греческого термина "*αφαίρεσις*" и употреблялся Аристотелем для обозначения процесса абстракции и его результатов. До Аристотеля процессы абстракции не были вычленены как особые процессы познания и рассматривались в связи с анализом иных теоретико-познавательных проблем. В отношении к проблеме абстракции можно рассматривать, например, учение Платона об идеях, которые существуют вне времени и пространства, независимо от единичных материальных вещей, и являются творческим началом, формирующим единичные вещи.

Обращаясь к проблеме абстракции в логическом учении стоической школы, имеет смысл рассмотреть некоторые основные постулаты философского наследия стоиков.

Стоики делили философию на три части – логику, физику и этику. Это деление признавалось большинством стоиков, разногласия же касались важности отдельных частей и порядка их изложения. Общей для всех программ, которые разрабатывались почти всеми крупными стоиками, была ориентация на единство "природного закона", логоса, во всех его проявлениях – "ипостасях": познания, мироустройства, целеполагания [6, с.34]. Соответственно, три формы функционирования логоса – логическая, физическая и этическая – являются тремя родовыми добродетелями (*αρεταί γενικωτάται τρεῖς*) [SVF II 35 cf. Diog. L. VII 39 sq./ 6, с.35]. Логика должна трактовать о принципах и границах познания, о критерии истинного и ложного и о способах это выразить. Говоря о разделении философии на три части, стоики часто использовали живописные метафоры, сравнивая философию с живым существом, где логика выступала его скелетом, этика – оболочка скелета (мускулы) и физика – душа [8, с. 139].

Чтобы стать добродетельным, т.е. правильно жить, человек нуждается в правильных представлениях о законах космоса, о сообразной с этими законами цели человеческой жизни. А закон космоса и закон добродетели один: это мировой логос, "природный закон", он же "здравый разум", определяющий все сущее и указывающий, что следует делать, а чего не следует [Diog. L. VII 88; SVF III 337; Cic. De leg. II 8/6, с.32].

Рассматривая учение стоиков в целом, важно отметить следующее. С точки зрения школьной доктрины вся наличная предметность делится на два "класса": бестелесное и телесное. Бестелесны (и существуют в несобственном смысле) пустота, пространство, время и чистые смыслы ("*λεκτά*"—"лекта"), а, следовательно, и все общие понятия.

Все остальное (включая благо, добродетель и т.п.) – телесно, и лишь оно существует в собственном и настоящем смысле. Логика имеет своим предметом сферу бестелесных смыслов.

Итак, стоический космос устроен логически, гармония природы и разума выражается в способности космического разума мыслить свои собственные законы как необходимые и всеобщие. Законы логики являются и законами построения чувственного космоса. Стоики объявляют сам разум вещественным, объединяя разум, космос и природу в одно целое. Именно поэтому логика для стоиков – не просто средство, а первая и наиболее важная часть всего учения, определяющая всю структуру знания и самые общие законы функционирования разума [6, с. 42].

Вместо аристотелевской "аналитики" стоики ввели понятие "логика". Логическая часть философии Стои включает два раздела – риторику и диалектику. В разделе о диалектике они различают учение об обозначаемом (το σημαίνον) и об обозначающем (το σημαίνόμενον). Первое стоики определяют как учение о звуках, фиксированных в словах, к нему они перечисляют поэтику, теорию музыки и грамматики. Второе – логика в собственном смысле, соответствует по существу формальной логике.

Логическая часть в целом рассматривает функционирование логоса в языке и мышлении. Логика в узком смысле изучает формальные признаки истинности (ложности) высказываний, учение о критерии имеет своим предметом материальные критерии (формы и содержание представлений).

Риторика – наименее важная часть логического учения Стои. Секст Эмпирик так упоминает об этих двух разделах учения: "Зенон Китийский, когда его спросили, какая разница между диалектикой и риторикой, сказал, сжавши кулак и опять его разжавши: "Вот какая!", рисуя при помощи сжатия закругленность и краткость диалектики, при помощи же разжатия и расправления пальцев давая образ пространной риторической способности" [4, с. 123]. В отличие от Аристотеля, для которого риторика была искусством убеждать, стоики рассматривали риторику как разновидность научного доказательства. Искусство убеждать само по себе стоиков не интересовало.

Основной вопрос, занимавший основателей стоицизма, – вопрос об источнике знания. Сверхзадача учения требовала полной познаваемости космоса, в нем не должно быть места пугающей неизвестности, и окружающий мир должен быть именно таким, каким он представляется.

Для стоиков путь к познанию космоса (и логически, и эмпирически) начинается с чувственного восприятия – это единственный источник и материал мышления. Душа же лишена каких-либо прирожденных понятий (в собственном смысле стоики считали априорными только формальные законы связи причины и следствия как законы логики и мироздания в целом), она скорее сродни "чистой доске", на которой внешние предметы наносят свои знаки – впечатления или представления (φαντασίαι) [3, с. 97]. Чувства, согласно учению стоиков, не могут обманывать, истинными или ложными могут быть только те высказывания (αξιώματα), которые разум о них выносит. Критерий истины (κρίτηριον της αληθείας), согласно стоикам, – все, что так или иначе может быть использовано для отличия истины от неистины. Таким критерием они называли "постигающее представление, суть которого может быть представлена как "схватывание" некоторого предметного содержания. Именно представление (впечатление) может быть критерием, так как сначала – впечатление, а уже затем – мысль, которая выражает в слове то, что испытывается впечатлением. "Идеи" отождествляются с так называемыми "ενοήματα" – представлениями, не имеющими реального объекта; это то, что "как бы существует", обладая характерным свойством бестелесности (понятия "Химера", "Сцилла" имеют смысл, но не имеют денотатов в реальности). На этой стадии происходит образование ложных образов, или "пустого притяжения" (διάκενος ελκυσμός). В отличие от первичных "общих представлений", прочие "общие представления" образуют-

ся "искусственно" из ряда "постижений"; совокупность определенным образом соединенных "постижений" составляет "науку" (τέχνη), сообразованную с практической жизненной целью. Принципы сочетания "постижений", а также используемые при этом схемы умозаключений являются уже объектом формальной логики.

Согласно учению стоиков, логика (диалектика) есть наука об обозначаемом и обозначающем [Diog. L., VII 62/6, с.69], или о знаках и о том, что ими обозначается. Знаком в самом общем смысле считается нечто очевидное, указывающее, в свою очередь, на нечто неочевидное. В качестве знаков могут выступать любые природные явления (например, дым по отношению к огню и т.п.). Наиболее универсальными знаками являются слова, обозначающие выражаемый ими смысл. Фундаментом стоической диалектики является связь между знаком (το σημαίνον, обозначающее), обозначаемым смыслом (το πράγμα σημαίνόμενον – то, что высказывается) и реальным объектом (реальная чувственная предметность). Объект и слово-знак телесны (поскольку звук есть нечто, производящее воздействие). Высказываемое, или чистый смысл, – "то, чего не понимают варвары, слыша греческие слова", – бестелесно [Diog. L. VII 55-57;/6, с.70].

Различие между смыслом и обозначающим его звуком иллюстрируется различием между "внутренней" речью (λόγος ἐνδιάθετος) и "внешней" (λόγος προφορικός), т.е. выраженной речью. Первая есть совокупность смыслов, то, что мыслится при произнесении или написании соответствующих слов. Она свойственна только разумным существам. У Секста Эмпирика мы читаем: "Человек отличается от бессловесных животных не членораздельной речью (ибо ворона, попугаи и сороки произносят членораздельные звуки), но внутренней [разумной]... Вследствие этого, имея мысли о последовательности, человек тотчас улавливает и понятие о знаке, потому что самый знак состоит в следующем: "Если это, то это"". [Adv. Math. VIII 2, 275-276/ 2, с.100].

Таким образом, и логический вывод, и вообще все логические процессы являются у стоиков не чем иным, как саморазвитием того "лектон", которое по своей природе "нейтрально", но в то же время как бы заряжено теми или иными логическими конструкциями [2, с. 100].

"Лектон" делятся на недостаточные, или неполные (ἐλλιπεῖς), выражаемые либо только субъектом, либо только предикатом, и достаточные, или полные (αυτοτελεῖς), состоящие из субъекта и предиката (грамматического подлежащего и сказуемого), к ним относятся высказывания в собственном смысле (ἀξιώματα), а также повеление, клятва и т.д.. Именно "высказанное" стоики считали возможным подвергать какому-либо логическому исследованию, прилагать характеристики истинного и ложного. Таким образом, логика имеет дело не со знаками (словами и предложениями), а с изоморфными "лектон" – суждениями – высказываниями, ибо произносятся (προφέρονται) звуки, а высказываются "лектон" [6, с.75]. Основу стоической силло-гистики составляет подкласс полных "лектон", именуемых высказываниями и предложениями, смысл которых – заключение к наличию или отсутствию некоторой предметности.

Стоики дали определение высказывания или аксиомы (το ἀξιωμα): "Все то, что бывает истиной или ложью, т.е. самодовлеющий предмет, подлежащий утверждению или отрицанию только сам по себе" [Arnim I. Op.cit. Vol. 2. p.62 Fr.193/ 5, с.15]. Для изменения истинного значения роль играют исключительно конкретные условия выражения высказывания, поэтому одно и то же высказывание не может быть истинно и ложно одновременно, применительно к одной ситуации в один и тот же момент времени.

Высказывания классифицируются на простые и не-простые: простые – сочетание субъекта и предиката, сложные (не-простые) – сочетания разных простых высказываний при помощи логической связки (σύνδεσμος) или же сочетание двух или более одинаковых простых высказываний [6, с.80]. Простые высказывания бывают определенными, неопределенными и средними. Определенные – такие высказывания, субъект которых выражен указательным местоимением ("Этот человек сидит"). Неопределен-

ные – такие, где субъект выражен неопределенным местоимением ("некто сидит"); средние – именем собственным ("Сократ сидит") или нарицательным. Отрицательные высказывания образуются из утвердительных при помощи отрицательных частиц. Например, указание на отсутствие, лишенность (στερητικόν) – "он недобрый", или отрицание (αρνητικόν) – "никто не гуляет" [8, с.46].

Из сложных высказываний наиболее важны следующие [8, с.147-148]:

1. Условное (имплицитное) (συνημμένον) "Если 1, то 2" – связка "если" ("εἰ").
2. Конъюнктивное (συνπλεπλεγμένον) "1 и 2" – связка "и" ("καί")
3. Дизъюнктивное (διεξυγμένον) "1 или 2" – связка "или" ("ἢτοι", "ἢ")

Помимо трех основных типов, стоики различали другие:

4. Субимплицитное (παρασυνημμένον) "1, поскольку 2" – связка "поскольку" ("ἔπει")
5. Причинное (αιτιώδες) "1, потому что 2" – связка "потому что" ("διότι")
6. Высказывание, построенное с помощью связки "скорее чем" ("μαλλον...ἢ") "1 скорее, чем 2".
7. Высказывание, построенное с помощью связки "менее чем" ("ἤττον...ἢ") "1 менее, чем 2".

Отрицательные высказывания соответствующих типов образуются по схеме "не (если 1, то 2)" и т.д., т.е. отрицательная частица относится ко всему высказыванию.

Три основных типа сложных высказываний выступали в трактовке Хрисиппа как главнейшие средства для обнаружения истины, ибо все они способны изменять свою значимость. Согласно Сексту Эмпирику, стоики определяли, что "истинное – это существующее и противостоящее чему-нибудь, а ложное – несуществующее и не противостоящее ничему" [4, с.152]. Среди высказываний стоики отводили особую роль условным (συνημμένον). Они говорили, что подобные высказывания формально корректны тогда, когда консеквент (ληγόν) следует из антецедента (ηγούμενον) и когда высказывание "хотя 1, но не 2" ложно в этом же смысле. Стоики выделяли четыре вида таких суждений, об этом упоминает Секст Эмпирик в трактате "Против риториков": "Связь либо начинается от истинного и кончается истинным, как, например, "Если существует день, то существует свет", либо начинается от ложного и кончается ложным, как, например, "Если земля летает, то она крылата", либо начинается от истинного и кончается ложным, например, "Если есть земля, то она летает", либо начинается от ложного и кончается истинным, например, "Если земля летает, то она есть". Из этого они [стоики] считают ошибочным только тот [случай], когда связь начинается от истинного и кончается ложным" [4, с.280].

Таким образом, условное сужение понимается стоиками как материальная импликация. Два других основных вида сложных высказываний – конъюнктивное и дизъюнктивное. Стоики подчеркивали, что сложное конъюнктивное суждение ложно в том случае, если хотя бы одно суждение, входящее в состав сложного, ложно. Дизъюнкцию стоики определяли как высказывание типа "или 1, или 2". Это высказывание истинно, если и только если один из его членов истинен, другой может быть ложным; здесь требуется их несовместимость, видимо, контрадикторная: они не могут быть вместе истинными или ложными.

Стоики выделяли гипотетические высказывания (υποθετικόν, τροπικόν). С точки зрения Хрисиппа, таковым может считаться любое высказывание, где от наличия или отсутствия одного заключают к наличию или отсутствию другого. Гипотетические высказывания не утверждают, а только предполагают наличие некоторой предметности, их истинность, следовательно, не зависит от реального существования тех предметов, о которых идет речь [SVF II 254/6, с. 87]. Гипотетические высказывания – особая функция сложных высказываний, характеризующая их способность служить инструментом научного познания.

Еще один интересный раздел стоической логики – теория умозаключений или силлогизмов. Силлогизм они называли "инструментом" для получения нового знания и определяли его как рассуждение (λόγος), состоящее из посылок (λήμματα) и вывода (επιφορά). Силлогизмы подразделяются стоиками на формально верные (συνακτικοί, περαντικοί) и неверные, которые всегда ложны (ασυνακτοι, απεραντοι). Формально верные делятся уже по критерию "материальной истинности" (соответствие смысла высказывания описываемой реальности) на истинные (αληθεις) и ложные (ψευδεις). Эти, в свою очередь, подразделяются на канонично построенные и неканонично построенные. Первые – такие высказывания, посылки и вывод которых непосредственно очевидны и не нуждаются в демонстрации (αναλοδεικτοι), остальные посредством демонстрации могут быть сведены к ним. Неканонично построенные высказывания – такие, которые не сводятся ни к одному из пяти элементарных силлогизмов из-за отсутствия канона (ими, вероятно, исчерпывается сфера стоической риторики).

Основным инструментом познания стоики считали гипотетический силлогизм; в качестве элементарных фигур силлогизма Хрисипп избрал пять комбинаций – модусов на основе трех главных видов гипотетического силлогизма, имея ввиду сделать дедукцию основой точного знания. Задача умозаключения – показать, что из наличия /отсутствия X в момент времени T вытекает следствие Y, которое либо нельзя воспринять непосредственно, либо это излишне, так как оно с легкостью может быть дедуцировано.

Стоики различали пять элементарных фигур силлогизма, не нуждающихся в "демонстрации" (доказательстве). Они представлены в виде модусов (τρόποι, σχήματα), где сам модус – только знак и относится к умозаключению примерно также, как и грамматическое предложение к высказыванию. В эти чистые формулы может быть подставлено любое содержание. Пять модусов стоики иллюстрируют на конкретных примерах [3, с.100-101; 6, с.94]:

Импликация:

1) если 1, то 2; 1 – следовательно, 2;

"Если наступает день, то становится светло.

День наступил.

Следовательно, стало светло".

2) если 1, то 2; не - 2, следовательно, не - 1.

"Если наступает день, то становится светло.

Но сейчас темно.

Следовательно, день не наступил".

Отрицательная конъюнкция:

3) не вместе (1 и 2); 1, следовательно, не - 2.

"Одновременно дня и ночи не бывает.

Сейчас день.

Следовательно, сейчас не ночь".

Дизъюнкция:

4) либо 1, либо 2; 1, следовательно, не - 2.

"Бывает либо день, либо ночь.

Сейчас день.

Следовательно, ночь не наступила".

5) либо 1, либо 2; не - 2, следовательно, 1.

"Бывает либо день, либо ночь.

Сейчас ночи нет.

Следовательно, сейчас день".

"Анализом" (ανάλυσις) силлогизмов стоики называли процедуру, позволяющую установить, что данное умозаключение не тождественно ни одной из пяти основных

фигур, но может быть сведено к одной из них. Для этого служат четыре правила (θήματα), описывающие механизм редукции сложных силлогизмов к простым. Точно и более или менее подробно описаны лишь первое и третье правила [6, с.94]:

1 правило: если из двух высказываний следует третье, то из наличия одного из них при наличии противоположного следствию следует противоположное другому высказыванию:

если $P1 - P2 \rightarrow P3$, то $P1 - \text{не} - P3 \rightarrow \text{не} - P2$.

3 правило: если из двух высказываний следует третье и если есть другие высказывания, из которых можно вывести одну из посылок, то другая посылка вместе с этими высказываниями требует вывода (т.е. третьего высказывания):

если $P1 - P2 \rightarrow P3$, а $Px - Pxx \rightarrow P1$, то $P2 - Px, Pxx \rightarrow P3$,

Это правило позволяет учитывать любое число приводящих посылок и, таким образом, обеспечивает описание сложной схемы причинности, важной для теории судьбы, промысла и обоснования нравственной ориентации субъекта.

Помимо идеи аксиоматического построения логических учений, наиболее ценным в логическом наследии стоиков является разработка ими теории несиллогистических умозаключений с отношениями. Например, умозаключения типа $((xRy) \& (yRz)) \rightarrow X Rn Z$, где $\&$ означает союз "и", "x", "y", "z" – обозначения для предметов, R – знак отношения, а "n" – натуральное число, указывающее на степень отношения [3, с.101].

В логике стоиков понятие об абстракции связано с учением о "лектон", на основе которого была построена их пропозициональная логика. Отдельно они выделяли учение о категориях (раздел "физики"). "Категории" – наиболее общие понятия, призванные характеризовать то, что так или иначе существует. Сам термин κατηγορία не употребляется, речь у стоиков идет о "высших родах" (πρωτα γενη):

1. субстрат
2. качество
3. состояние
4. состояние в отношении

Наиболее наглядно четыре "категории" применяются в отношении телесного, то есть того, что обладает способностью действовать и испытывать воздействие (но их можно применять и для анализа бестелесного). Первая "категория" обозначает "субстанцию" как "субстрат", (ουσια). Вторая – качество: родовое и индивидуальное, то есть существенное свойство вещи или класса вещей, то, что делает их ими самими в отличие от других. Третья и особенно четвертая "категории" характеризуют те свойства, которые приобретаются в силу реальных пространственно-временных и причинно-следственных условий (например, правое/левое, отец/сын и т.п.). Есть искушение представить "категории" как универсальную методологическую схему, применяющуюся при анализе разных проблем логики, физики, этики. Согласно этой гипотезе, всякая мыслимая тематизация должна происходить в таком порядке [6, с.101]:

1. существует ли нечто;
2. каково оно (в абстрактной изолированности от условий своего существования);
3. каково оно в своем внутренне обусловленном состоянии;
4. каково оно в своем внешне обусловленном состоянии.

Эти категории применялись для анализа бестелесного (например, попытки описывать бесконечную делимость пустоты, пространства, времени). Первая и вторая "категории" способны выражать только абстрактные конструкции. "Категории" же третья и четвертая характеризуют как раз те реальные наличные предметности (ситуации), которые можно подставлять вместо символов в логические тропы, поскольку высказывание относится прежде всего некоторой данности или ситуации. Они, следовательно, характеризуют предметность в ее реально-наличном бытии. Очевидно, что наиболее

универсальная – третья категория (четвертую можно считать ее разновидностью) подчиняет себе две первых и концентрирует в себе большинство аристотелевских категорий, что было отмечено уже в античные времена.

В заключение подведем некоторые итоги. Развитие науки, трудности процесса познания неизбежно заставляли мыслителей прошлого обращать внимание на проблему абстракции. Выше были представлены некоторые положения, которые позволяют судить о развитии этой проблемы в античности, в частности – в стоической школе.

Мыслители стоической школы ввели термин "логика" вместо аристотелевского "аналитика", и, по-видимому, это изменение было не просто терминологическим. Для учения стоиков основополагающим было понятие "природного закона" – логоса. Этимологическая связь слов "логос" и "логика" свидетельствует о том, что стоики считали логику универсальным средством для выражения и постижения логоса как главного космологического принципа. Таким образом, пропозициональная логика как некая абстрактная формальная система возникает для того, чтобы описывать и изучать логос. И если Аристотель использовал переменные (А, В, С) для обозначения большего, среднего и меньшего терминов силлогизма, то стоики отнесли переменные (1, 2, 3) к высказываниям, что явилось значительным шагом вперед в развитии логики.

Стоики ввели собственное обозначение вывода, умозаключения, назвав его термином "ο λόγος". Новым в учении Стои было учение о "лектон", на основании которого и была создана пропозициональная логика.

Любые абстракции выражаются в языке, и с этой точки зрения важны исследования Хрисиппом природы и значения языкового знака. Согласно учению стоиков, логика (диалектика) есть наука об обозначаемом и, главным образом, обозначаемом (это и есть "лектон"). Стоики исследовали связь между знаком, обозначаемым смыслом (то, что высказывается) и реальным объектом (реальная чувственная предметность) – хорошо известный семантический треугольник.

Язык непосредственно связан с процессом абстракции и является важнейшим средством абстрагирующей деятельности, и поэтому сама потребность в изучении языка, которая обнаруживается в стоической школе, позволяет говорить о высоком теоретическом уровне учения стоиков.

Литература

1. Горский Д.П. Вопросы абстракции и образование понятий. М., 1961.
2. Лосев А.Ф. История античной эстетики. Ранний эллинизм. М., 1979.
3. Попов П.С., Стяжкин Н.Н. Развитие логических идей от Античности до эпохи Возрождения. М., 1974.
4. Секст Эмпирик Сочинения в двух томах. Т.1. М., 1975.
5. Степанова А.С. Теория познания и логическое учение Ранней Стои. Автореферат. ЛГУ, 1990.
6. Столяров А.А. Стоя и стоицизм. М., 1995.
7. Целлер Э. Очерк истории греческой философии. СПб, 1996.
8. Kneale W. The development of Logic. Oxford, 1964.

РАЗВИТИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ЛИЧНОСТИ СТУДЕНТА В МЕЖДУНАРОДНОМ ОБЩЕСТВЕ

И.М. Кудрявцева

Научный руководитель – к.т.н. С.С. Гвоздев

В работе рассмотрены потенциалы личности (познавательный, творческий, ценностный, коммуникативный и эстетический) и проанализировано их развитие в рамках международных обществ, имеющих в своих рядах студентов и аспирантов, и в уставах которых декларируется целенаправленная работа с творческой молодежью; приведены основные преимущества международной организации над национальными. На примере деятельности международного общества The Instrumentation, systems & automation (The ISA), а также работы по организации студенческой секции при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) делаются выводы об исключительном влиянии международного общества на повышение профессиональной культуры специалиста 21 века.

Введение

Социально-экономические и политические реформы во многом изменили высшую школу. В настоящее время практически отменена система распределения выпускников. Вследствие этого после окончания высшего учебного заведения бывший студент оказывается полностью предоставленным самому себе и нередко теряется: Противоречие между уровнем профессиональной подготовки специалистов и требованиями современной социокультурной среды порождает у нового дипломированного специалиста существенные проблемы самореализации в обществе. Практика показывает: чем лучше выпускник был подготовлен к этому во время обучения в вузе, тем короче будет период адаптации бывшего студента в новой для него среде.

Целью работы является изучение важнейших составляющих профессиональной культуры специалиста и анализ их развития в международном обществе. Само поле культуры профессиональной деятельности специалиста включает в себя такие составляющие, как [1] культура общения, этическая культура, гуманитарная культура, культура устной и письменной речи, организационная культура, информационная культура и т.д. Этот список можно было бы продолжать еще долго и расставлять свои приоритеты для конкретного рода деятельности специалиста, но даже из перечисленных составляющих видно, что достигаются они развитием потенциалов личности, а именно познавательного, творческого, ценностного, коммуникативного и эстетического.

Сегодня в мировой практике накоплен достаточный опыт, касающийся качественной подготовки будущего специалиста. Эту задачу приходится решать всем вузам мира, но самым эффективным на сегодняшний день методом вовлечения студентов в активную научно-техническую и организационную деятельность, а, следовательно, и повышения его профессиональной культуры, является участие будущего специалиста в работе студенческой организации.

Развитие потенциалов личности в международных обществах

В общем случае рост **познавательного потенциала** личности определяется объемом и качеством знаний и информации, которым она располагает. Но, если студент становится членом секции научного общества, то рост его познавательного потенциала, ко всему прочему, будет определяться как традициями и потенциалом коллектива в целом, опытом его членов, так и уровнем профессиональной мотивации конкретного студента.

По мнению Герцога, школа будущего должна уделять внимание качеству обучения, а не количеству знаний. Поэтому здесь прежде всего следует говорить о методах передачи и приобретения знаний. Учащиеся должны учиться правильно выбирать информацию, структурировать её и обрабатывать, делать выбор и находить решения. Та-

ким образом, требуемая форма обучения должна соответствовать концепции, выдвигающей на первое место наряду с получением научных знаний умение активно действовать. Владеть тем и другим можно лишь посредством активных действий в практических ситуациях [2]. В международном обществе студент получает прекрасную возможность использовать уже имеющиеся знания для достижения общей цели, показать себя и увеличить объем своих знаний посредством тесного общения с другими студентами и ведущими специалистами всего мира. Став членом исполнительного комитета студенческой секции международного общества, руководя его работой и финансами, управляя его проектами и сайтом, составляя сборники трудов и публикуя статьи, студент получит неоценимый практический опыт решения задач, с которыми он может столкнуться лицом к лицу в последующей профессиональной деятельности. Такое обучение также способствует развитию чувства ответственности при решении проблем или выполнении заданий. Оно учит принимать помощь и оказывать её другим, заставляет учащихся при возникновении несогласий в группе отстаивать свою собственную позицию, свои результаты.

Рост творческого потенциала студента как члена международной организации определяется как способностью к созидательному действию и развитию уровня творческой инициативы, так и уровнем мотивации и личностных качеств членов общества, уровнем результативности и завершенности проектов коллектива. В секциях международных обществ чаще всего оказываются студенты, обладающие высоким уровнем способностей и готовые к научно-исследовательской и организационной работе. Высоко мотивированные системой поощрений, видя перед собой примеры успешных студентов, они добиваются высоких результатов, одновременно развивая свой творческий потенциал.

Ценностный потенциал студента как члена организации определяется личностными качествами старших коллег – членов коллектива и их способностью формировать мотивацию студентов, воспитывать специалистов, обладающих системой ценностных ориентаций, способствующих достижению поставленных профессиональных и личностных целей. При этом огромное значение имеет организационная культура, которая в большинстве случаев лучше именно в международных обществах, нежели в местных студенческих образованиях. Как правило, общества обладают тщательно проработанной высокоэффективной системой личностной мотивации и поощрения, а также, наряду со студентами, содержат в своем составе лучших и высоко-активных специалистов – научную элиту всех ведущих стран мира. Вследствие этого у студента вырабатывается устойчивое ощущение его общественной значимости и принадлежности к высокой социальной категории, что существенным образом изменяет нормы и ценностные установки его поведения.

Коммуникативный потенциал определяется способностью реализовывать контакты с заданной целью. Рост же этого потенциала, как правило, начинается с осмысления личностных контактов внутри творческого коллектива, проходит через определение места собственной личности в коллективе и развития при различных внешних научных и творческих контактах.

Вступив в международное общество, студент оказывается частью большой, тщательным образом продуманной системы, невольно вовлекается в его многоуровневую систему коммуникаций. Студент – член коллектива уже не предоставлен самому себе, он включен в сложную систему взаимодействий, которая постоянно на него действует. Внутри международной организации возможны все пути коммуникаций: от взаимодействия на уровне "студент – студент" до "начальник – подчиненный". Войдя в состав секции как простой член, студент осознает и испытывает огромную потребность в самореализации внутри секции, активно участвуя в ее работе, он вынужден взаимодействовать на своем уровне с другими членами, получает помощь от специалистов и стар-

ших товарищей с опытом в конкретных видах деятельности, с необходимостью участвует в международных конференциях и собраниях секции. Помимо этого, возникает потребность в специальных качествах в зависимости от способа передачи профессиональных знаний. Следует учиться разрешать возникающие противоречия и использовать различные перспективы для анализа событий. Смене перспектив способствуют в первую очередь интернациональность и интер-дисциплинарность. Главным результатом участия студента в деятельности общества является приобретение практических навыков управления и принятия решений, а так же умение работать в команде.

Эстетический потенциал личности определяется уровнем эстетических потребностей, содержанием и интенсивностью их реализации, тем уровнем гармонии качеств личности, который также связан с личностным ранжированием мотивов и потребностей и возможностями их реализации. Следует отметить, что в коллективе эти возможности всегда несомненно шире, чем у отдельной личности. Как отмечалось ранее, студент, являющийся членом международного общества и активно участвующий в его работе, отличается высокой степенью самооценки, что в соединении с его способностями помогает ему достичь значительных результатов во многих сферах деятельности.

Подводя итог, следует отметить некоторые преимущества международной организации над просто городской или общероссийской. Основное из них – это возможность как для отдельного студента, так и для Университета (поддерживающего работу секции международного общества) в целом наладить контакт со специалистами во всем мире и обменяться с ними опытом решения профессиональных задач. Выход на международный уровень поднимает профессиональный уровень специалиста и его общую образованность, а также помогает лучше ориентироваться на международном рынке товаров и услуг.

Главными преимуществами международных обществ при развитии перечисленных ранее потенциалов личности являются:

- для *познавательного* потенциала – устоявшиеся традиции, выработанные на протяжении десятилетий с учетом опыта западноевропейских и американских обществ; огромный потенциал членов общества, постоянно увеличивающийся за счет формирования новых секций и присоединения новых членов по всему миру; действенная система мотивации и возможности для всемирного признания студента и его научной работы;
- для *творческого* потенциала – высокий уровень личностных качеств членов международного общества, обеспечивающийся целенаправленным и ограниченным их набором, а так же их повышенные мотивация и активность;
- для *ценностного* потенциала – высокий уровень организационной культуры международного общества, осознание студентом своей принадлежности к научной элите;
- для *коммуникативного* потенциала – неограниченное пространство для коммуникаций, параллельные и вертикальные связи в котором иницируются и поддерживаются самим обществом; существование огромного числа международных мероприятий, проводимых международными обществами, их тематическая направленность, а также широкий охват областей знаний и географических регионов; возможность практического развития навыков делового, технического и повседневного общения с иностранными гражданами на английском языке;
- для *эстетического* потенциала – органично слившийся воедино опыт многих стран в решении конкретных задач и высокая степень самооценки студента – члена международного общества.

Международное общество The ISA и его работа с молодыми учеными

В качестве успешного примера реализации подхода к развитию вышеназванных потенциалов личности рассмотрим организацию работы со студентами всемирно из-

вестного общества The Instrumentation, systems & automation Society (The ISA), которое в дальнейшем будем называть как Общество.

Сегодня Общество имеет уже устоявшиеся традиции и проверенные десятилетиями методы и программы работы со студентами, но, несмотря на это, является достаточно гибким к внешним воздействиям. Оно объединяет ведущих специалистов, как теоретиков, так и практиков, а также студентов и молодых ученых по всему миру, специализирующихся в различных областях науки и техники, и имеет уже более чем 50-летнюю историю. В настоящее время творческим коллективом нашего вуза, в который входит и автор данной работы, ведется активная работа по созданию секции Общества в СПбГУ ИТМО. Вот почему, осознавая его возможности и преимущества и зная проблему изнутри, мы и выбрали в качестве примера именно The ISA – оно как нельзя лучше подходит для цели успешного развития профессиональной культуры специалиста.

Общество, обладая неограниченным потенциалом за счет объединения квалифицированных специалистов и активных студентов по всему миру в специальные рабочие группы по направлениям деятельности (Devisions) и по географическому их местоположению (Districts), а также имея тщательно проработанную структуру поощрения и мотивации, дает существенный вклад в развитие познавательного потенциала личности студента.

Кроме квалифицированного совета специалиста и продуктивного контакта со студентами вузов всего мира, студент – член Секции может получить международное признание, а также существенные денежные средства международного фонда, что, как показывает практика, является очень важным для молодого специалиста и лучше всего мотивирует его на занятие наукой. Сейчас The ISA вручает стипендии и гранты студентам и молодым специалистам, демонстрирующим выдающийся потенциал в решении различных технических и практических задач в областях приборостроения, систем и автоматики. Для членов Общества также доступны: специальные скидки на публикации, стандарты, видеопродукция и программное обеспечение, а также уменьшенные взносы на симпозиумах, конференциях и выставках; возможность обучения и стажировки по специальности во многих странах мира.

В Уставе The ISA говорится, что его членами могут быть студенты и специалисты, продемонстрировавшие высокий потенциал в решении научных и практических задач. Таким образом, в его секциях оказываются студенты, обладающие высоким уровнем способностей и готовые к научно-исследовательской и организационной работе, что существенным образом изменяет нормы и ценностные установки его поведения.

Для удобства работы и максимального удовлетворения потребностей его членов Общество The ISA имеет хорошо организованную внутреннюю структуру. Секции, организованные в пределах широкой географической территории, объединены в отдельные районы (Districts). В настоящее время существует 13 таких районов, каждый из которых имеет структуру параллельной ISA-секции. Управление района осуществляет координацию и поддерживает деятельность секций внутри района. Таким образом, Общество может учитывать особенности и менталитет членов его секций. Секция при СПбГУИТМО, как и все российские секции, относится к европейскому району и работает непосредственно с его правлением, что является очень важным и дает прямой выход на Запад. Значение секции в деятельности специалиста особо подчеркивается в ISA тем, что в данном Обществе нет индивидуального членства. Каждый член Общества автоматически присоединяется к ближайшей секции, что позволяет ему участвовать в региональных программах и проектах, помимо общеизвестных.

Все члены The ISA, как уже было отмечено ранее, принадлежат к специальным группам, объединенным по сфере их интересов и называемым дивизионами (Divisions)

или отделами. Такие отделы не имеют географических границ. Всего существует 22 подразделения внутри The ISA. Членство в подразделении помогает специалистам и студентам наладить более прямую связь для достижения цели. Общество всячески поощряет участие в работе по крайней мере двух дивизионов: один – по интересующим технологиям, а второй – по типу производства, в котором специализируется специалист. Следует отметить, что отделы охватывают практически все виды человеческой деятельности от обучения до шахтерского дела и театрального искусства.

Таким образом, члены Общества работают в различных областях, а также специализируются в различных технологиях и могут получить квалифицированную помощь специалистов других областей. Вот почему The ISA обеспечивает работу 22 технических подразделений, где специалисты объединены по сферам их личных интересов, несмотря на географическое их местоположение. Войдя в состав секции как простой член, студент осознает и испытывает огромную потребность в самореализации внутри секции, активно участвуя в ее работе, он вынужден взаимодействовать на своем уровне с другими членами, получает помощь от специалистов и старших товарищей с опытом в конкретных видах деятельности, с необходимостью участвует в между-народных конференциях и собраниях секции, делает ежегодные доклады о достигнутых им за год результатах. Осмысливая свое положение в коллективе, студент стремится занять более высокую должность в секции и может пройти в этом стремлении весь путь от члена комитета до президента Общества, опираясь на плечо предшественника и ощущая постоянную поддержку товарищей.

Особенно хочется отметить необходимость владения иностранным языком для успешной деятельности специалиста 21 века. В настоящее время знание английского языка, который уже давно стал международным, является первостепенным критерием при отборе и приеме на работу даже в российские фирмы, не говоря уже о всех остальных. Как известно, практика – вот лучшее средство изучить иностранный язык. В рамках Общества студент получает возможность практического развития навыков делового, технического и повседневного общения с иностранными гражданами, что существенно расширяет сферу его общения и укрепляет уверенность в себе.

Главным результатом участия студента в деятельности Общества является приобретение практических навыков управления и принятия решений, а также умение работать в команде. Таким образом, участие студента в работе Общества дает неоценимый вклад в развитие всех вышеназванных потенциалов личности будущего специалиста и выводит его профессиональную культуру на качественно новый уровень.

Заключение

В работе были рассмотрены различные потенциалы личности (познавательный, творческий, ценностный, коммуникативный и эстетический), развитие которых ведет к повышению профессиональной культуры специалиста, а также проанализированы возможности их развития в международном обществе на примере деятельности международного общества The Instrumentation, systems & automation (The ISA) и представлены основные преимущества международного общества над национальными.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о необходимости существования секций различных международных обществ в каждом вузе. Их деятельность должна быть направлена на повышение профессионального уровня студентов и молодых специалистов; поддержку инициатив, связанных с научной и общественной деятельностью членов секции в области развития конкретных наук, профилирующих в вузе; вовлечение студентов и молодых специалистов в активную научно-техническую деятельность; способствование развитию научных, образовательных и других молодежных программ в различных областях знаний; установление; расширение контактов между студенческой молодежью российских и зарубежных вузов.

Литература

1. Гвоздев С.С. Возможности молодежных отделений научных обществ в повышении качества подготовки специалистов / Материалы конференции «Планирование и обеспечение подготовки кадров для промышленно-экономического комплекса региона», СПб, 15.10.02 г., с. 106
2. Herzog, Roman; Rede zur Eröffnung des Paderborner Podiums im Heinz Nixdorf-MuseumsForum am 9. Juni 1998

Секция 3. Механика, приборостроение и системный анализ.....	3
Фролов Д.А. (научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев). Отыскание параметров колёс с несимметричными зубьями, обеспечивающих отсутствие заострения и подрезания	3
Фролов Д.А. (научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев). Возможные пути контроля норм бокового зазора в передачах, составленных из колёс с несимметричным профилем зуба	8
Монахов Ю.С., Янгужов Г.И. (научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев) Влияние параметров сборки шарикоподшипниковых узлов на их вибрационные характеристики	12
Емельянов А.В., Монахов Ю.С. (научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев). Методика определения степени точности зубчатых колёс в передаче по нормам кинематической точности с учётом погрешностей изготовления и монтажа деталей	21
Ефименко А.В., Монахов Ю.С. (научный руководитель – к.т.н., доц. Е.В. Шалобаев). Оптимизация параметров оптико-механического дефлектора сканирующего лазерного стимулятора	27
Млокосевич С.Ю. (научные руководители – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев, к.т.н., доц И.Д. Гебель). Использование рядов Фурье для фильтрации при измерении круглости	31
Млокосевич С.Ю. (научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев). Контроль гармонических составляющих неплоскостности и некруглости и возможные пути их устранения в производстве	35
Абрамчук М.В. (научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев). Анализ недостатков ГОСТ 1643-81	39
Кириченко А.И. (научный руководитель – д.т.н., проф. Б.П. Тимофеев). Влияние угла профиля и угла наклона зуба на контактные напряжения и долговечность	43
Керпелева С.Ю. (научный руководитель – д.ф.-м.н., проф. А.О. Голубок). Варианты конструкции датчика в составе нанотестера, используемого для диагностики и модификации микро- и наноструктур	48
Захарова И.Г. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.М. Мусалимов). Классификация виброизоляторов (амортизаторов)	56
Юсупов П.Д. (научный руководитель – д.т.н., проф. Д.Д. Куликов). Использование удалённой базы данных технологического назначения в среде PDM-системы	62
Кишкурно В.С. (научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун). Модель представления информации о детали для интеграции CAD/CAPP систем	66
Свердлина И.И. (научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун). Элементы управления проектированием технологических процессов	69
Гнездилова С.А. (научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун). Экспертные системы в технологическом проектировании	73

Шаймарданов Р.М. (научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун). Организация управления и интеграция в автоматизированной системе технологической подготовки производства.....	77
Ильенков Р.В. (научный руководитель – к.т.н., проф. Б.С. Падун). Синтез структур технологической системы адаптивно-селективной сборки.....	87
Герасимов Д.Н., Мигуш С.А. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.О. Никифоров). Алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания.....	93
Аржаник А.В. (научный руководитель – к.т.н., доц. А.В. Лямин). Система технического зрения мобильного робота.....	97
Галушкин А.В., Дударев М.Н., Лебедев А.Д., Таюрский В.А. (научный руководитель – д.т.н., проф. И.В. Мирошник). Синтез управлений в задаче частичной стабилизации нелинейного объекта.....	103
Коновалов С.А. (научный руководитель – д.т.н., проф. И.В. Мирошник). Исследование динамической модели инжекторного двигателя.....	109
Ефимова А.Н. (научный руководитель – к.т.н., проф. Н.Д. Фролов) Управление гидродинамическим турбулентным потоком.....	116
Кудрявцева И.М. (научный руководитель – к.т.н. С.С. Гвоздев). Алгоритм построения аналитического описания сифонов для расчета их параметров с помощью ЭВМ.....	121
Жданов И.Н. (научный руководитель – к.т.н, доц. В.А. Сеницын). Моделирование микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ для прецизионного электропривода.....	126
Лукичѳв Д.В. (научный руководитель – к.т.н., доц. А.А. Усольцев). Виртуальная установка для исследования характеристик асинхронного двигателя.....	131
Борисов П.А. (научный руководитель – к.т.н., доц. В.С. Томасов). Методика расчѳта и проектирования энергоподсистем электротехнических комплексов с РС-нагрузкой.....	139
Никитина М.В., Осипов Д.В. (научные руководители – к.т.н., доц. В.А. Толмачев, к.т.н., доц. В.В. Кротенко). Адаптивная система управления программируемого источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП.....	149
Секция 4. Физика твѳрдого тела.....	157
Боровинская Т.Н., Пилюгина Ю.А. (научный руководитель – к.ф.-м.н., ст.н.с. Е.В. Астрова). Получение рисунка в слое макропористого кремния.....	157
Сидько А.П. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль). Моделирование химического газофазного осаждения эпитаксиальных слоѳв SiGe.....	161
Сидько А.П. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль). Роль эффектов переноса и поверхностной химии в процессе гидридной газофазной эпитаксии GaN.....	171
Тараканов Д.Е., Богданов М.В., Кулик А.В. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.С. Сегаль). Моделирование массопереноса в порошковом источнике при выращивании объѳмных SiC кристаллов.....	180
Севастьянова Ю.Б. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.Т. Прокопенко). Исследование и выращивание приборных гетероструктур методом жидко-фазной эпитаксии для детекторов ядерного излучения.....	185

Соловьёв Д.В. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.Л. Ткалич). Этапы и перспективы развития технологии тонких плёнок	191
Петров Д.В. (научный руководитель – д.т.н., проф. Е.Б. Яковлев). Локальная модификация поверхности пористого стекла излучением YAG:Nd-лазера	194
Сарнаков С.М. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. Г.Н. Шандыбина). Оптимизация режима лазерной абляции тонких слоёв	200
Волков М.В., Ерёменко А.С. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.П. Вейко). Особенности сверления микроотверстий импульсами микросекундной длительности	203
Секция 5. Биомедицинские технологии и томография	209
Уткина Н.А. (научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина). Фазовая коррекция изображений в МР-томографии.....	209
Чиркова В.А. (научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина). Томографические методы картирования нестабильного и неоднородного поляризуемого магнитного поля	215
Рущенко Н.Г. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.С. Сизиков). Новые результаты моделирования высокооднородных магнитных полей в катушках МР-томографов.....	221
Серёгин А.Н. (научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина). Графический метод создания геометрически точных магнитно-резонансных одномерных изображений в неоднородном поле	229
Хлистунова Е.Н. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.Л. Ткалич). Алгоритм обработки данных для анализа изображений в позитронно-эмиссионной томографии	236
Казначеева А.О. (научный руководитель – к.т.н., доц. М.Я. Марусина). Устройство для контроля качества изображений в ЯМР-томографии.....	243
Щекотин Д.С. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.С. Сизиков). Сравнение и развитие различных методов реконструкции изображений в рентгеновской томографии	247
Пушкарёва А.Е. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. М.З. Смирнов). Моделирование температурной динамики кожи при лазерном лечении угревой болезни.....	255
Такмакова Е.С. (научный руководитель – к.т.н., доц. В.А. Трофимов). Аналитический обзор методов и средств измерения внутриглазного давления	259
Рассади́на А.А. (научные руководители – д.т.н., проф. Г.Н. Лукьянов, д.м.н., проф. В.И. Усачёв). Оригинальная модель для исследования движения воздушных потоков внутри полости носа.....	265
Смолянская О.А. (научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. А.В. Беликов). Влияние температуры на флуоресцентные свойства жировой ткани	271
Москалёва А.Ю. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.А. Тарлыков). Использование фотоиндуцированного термогемолиза для измерения механических характеристик эритроцитов	276
Зунг Зьонг Ван, Марковкина Н.Н. (научный руководитель – д.т.н., проф. В.П. Вейко). Микропипетки: основные приложения	283
Макаров Д.С. (научный руководитель – к.т.н., ст.н.с. В.А. Кораблёв). Термостатирование и контроль температуры элементов лазерных схем с импульсным тепловыделением.....	289

Секция 6. Гуманитарные науки.....	293
Цуканова О.А. (научный руководитель – д.э.н., проф. Э.Н. Кроливецкий). Сущность и роль стратегического управления в повышении результативности деятельности хозяйствующих субъектов	293
Пуляевский М.Д. (научный руководитель – д.э.н., проф. С.Б. Смирнов). Реинжиниринг и возможность его применения в условиях современной российской действительности	296
Базарова Ж.С. (научный руководитель – д.э.н., проф. С.Б. Смирнов). Проблемы занятости и информационного обеспечения рынка труда в Республике Бурятия.....	300
Ломова И.О. (научный руководитель – к.ф.н., доц. Т.А. Новолодская). Критический анализ основных положений трансцендентальной логики Канта в работах Н.Я. Грота.....	304
Чернышева П.С. (научный руководитель – к.ф.н., доц. Т.А. Новолодская). Эвристические возможности логической теории принятия решений.....	306
Стукалова О.Ю. (научный руководитель – д.ф.н., проф. З.О. Джалиашвили). Вопросы абстракции в логическом учении стоической школы	312
Кудрявцева И.М. (научный руководитель – к.т.н. С.С. Гвоздев). Развитие потенциалов личности студента в международном обществе	319

Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 328 с.

**ВЕСТНИК КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
СПБГУ ИТМО**

Сборник научных трудов

Том 2

Научный редактор – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич

Дизайн обложки Т.В. Точилина

Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано в печать 22.06.04.

Заказ 780. Тираж 100 экз.