

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

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

---

**ВЕСТНИК II МЕЖВУЗОВСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ**

**Сборник научных трудов**

**Том 2**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2005**

Выпуск содержит материалы II межвузовской конференции молодых учёных, посвященной 100-летию первого выпуска механико-оптического и часового отделения Ремесленного училища цесаревича Николая – предшественника Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Конференция была проведена 28–31 марта 2005 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. **Л.Н. Андреев**, д.т.н., проф. **В.А. Зверев**, д.т.н., проф. **В.А. Иванов**, д.т.н., проф. **В.К. Кирилловский**, д.т.н., проф. **А.Г. Коробейников**, д.т.н., проф. **Д.Д. Куликов**, д.т.н., проф. **С.М. Латыев**, д.т.н., проф. **В.М. Мусалимов**, д.ф.-м.н., проф. **Н.В. Никоноров**, д.т.н., проф. **Э.Д. Панков**, 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.Б. Смирнов**, д.т.н., проф. **С.К. Стафеев**, д.т.н., проф. **В.А. Тарлыков**, д.т.н., проф. **А.А. Шалыто**, д.т.н., проф. **А.В. Шарков**, д.т.н., проф. **Е.Б. Яковлев**, к.т.н., доц. **В.М. Домненко**, к.т.н., доц. **М.Я. Марусина**, к.т.н., проф. **Б.С. Падун**, к.т.н., проф. **М.И. Потеев**, к.ф.н., доц. **В.Н. Садовников**, к.т.н., доц. **И.Н. Тимошук**, к.т.н., доц. **Б.Д. Тимченко**, к.т.н. **Т.В. Точилина**, к.т.н., доц. **Е.Ф. Чуфаров**, к.т.н., доц. **Е.В. Шалобаев**

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

### **Председатель**

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

### **Зам. председателя**

К.т.н. **Т.В. Точилина**

### **Члены организационного комитета**

**К.В. Богданов**, **П.А. Борисов**, **Н.Н. Валентик**, **Н.Ф. Гусарова**, **И.Н. Жданов**, **С.Ю. Кerpелева**, **Н.В. Когай**, **Д.В. Лукичев**, **А.Г. Метляков**, **Н.Б. Нечаева**, **М.В. Никитина**, **А.В. Перепелкин**, **Т.А. Прудентова**

ISBN 5-7577-0259-1

© Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
2005

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОБРАЗЦОВ И СТРУКТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

И.А. Абдурахманов, Д.В. Король

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

Изучены процессы, происходящие в трущихся поверхностях. С помощью трибометрической системы «Трибал», осуществлена структурная и параметрическая идентификация процесса. Результат анализа показал, что для адекватного описания процесса необходимо учитывать в системе взаимодействующих тел наличие и третьего тела.

Целью исследования было зарегистрировать процессы, происходящие на границе двух трущихся образцов, а также в поверхностном слое материала образцов, и построить математические модели процессов. Для решения этих задач была использована система «Трибал», схема которой приведена на рис. 1.

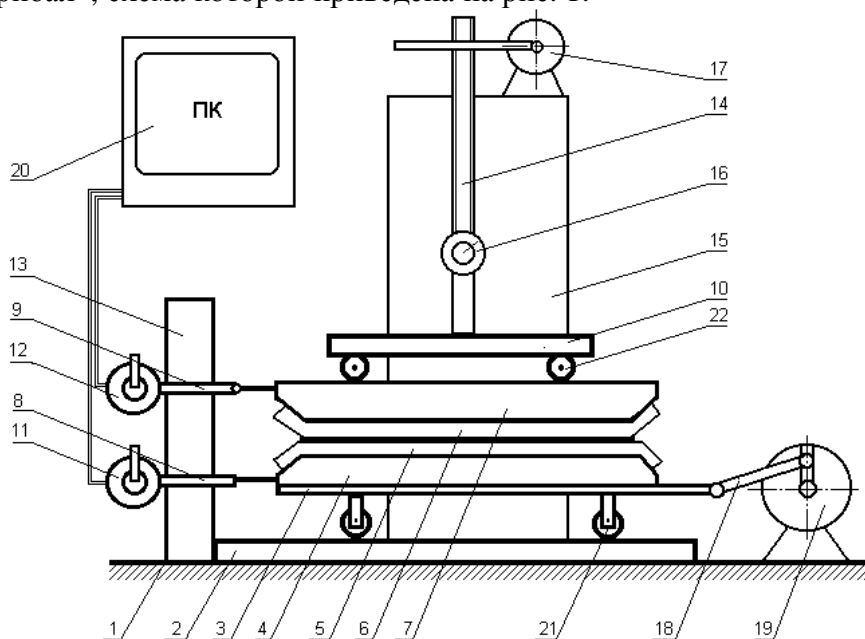


Рис. 1. Схема установки «Трибал»

Здесь на основании 1 закреплены две направляющие 2, по которым движется ползун (платформа) 3. К ползуну жестко крепится держатель 4 образца 5. Держатель 7 образца 6 нагружается через шарикоподшипники 22 нагрузочной площадки 10 винтовым домкратом 14. Нагрузка измеряется динамометром 16. Нагружение производится двигателем 17, закрепленным на стойке 15. Перемещение нижнего держателя осуществляется двигателем 19 с помощью шатунно-кривошипного механизма 18 и фиксируется датчиком-индикатором 11 через стержень 8, жестко соединенным с держателем 4. Сила трения, действующая на образцы, измеряется датчиком-индикатором 12, закрепленным на стойке 13. Информация с датчиков 11, 12 вводится в персональный компьютер 20. Платформа представляет собой тележку на четырех катках 21, передвигающихся по направляющим 2. Платформа служит для закрепления на ней нижнего держателя 4 образ-

ца 5 и в то же время является ползуном в кривошипно-шатунном механизме, обеспечивающем ей возвратно-поступательное движение. Система «Трибал» имеет, таким образом, один вход  $u$  (датчик 11) и один выход  $y$  (датчик 12). Пара сигналов  $u(t)$ ,  $y(t)$  далее исследуется как сигналы объекта (трибопары) автоматического регулирования. Такое представление объекта позволяет поставить задачу структурной и параметрической идентификации динамической системы процесса фрикционного взаимодействия и получить ее динамические характеристики.

Динамические свойства линейных механических объектов и систем автоматического регулирования в целом могут быть описаны дифференциальными уравнениями. В этом, собственно, и состоит структурная идентификация. Были поставлены задачи:

1. построить систему дифференциальных уравнений для динамической системы с одной степенью свободы – здесь узел трения рассматривается как «черный ящик» с одним входом  $u(t)$  и одним выходом  $y(t)$ ;
2. построить систему дифференциальных уравнений для динамической системы с двумя степенями свободы – здесь узел трения рассматривается как реальная трибопара, имеющая массы  $m_1$  и  $m_2$  контртел;
3. построить систему дифференциальных уравнений для динамической системы с тремя степенями свободы – здесь, наряду с массами контртел  $m_1$  и  $m_2$ , учитывается масса  $\mu$  третьего тела.

Исследования производились на примере двух образцов оптического стекла. Полученные экспериментальные данные представляют собой записи двух сигналов: входного  $u(t)$  и выходного  $y(t)$  (см. рис. 2).

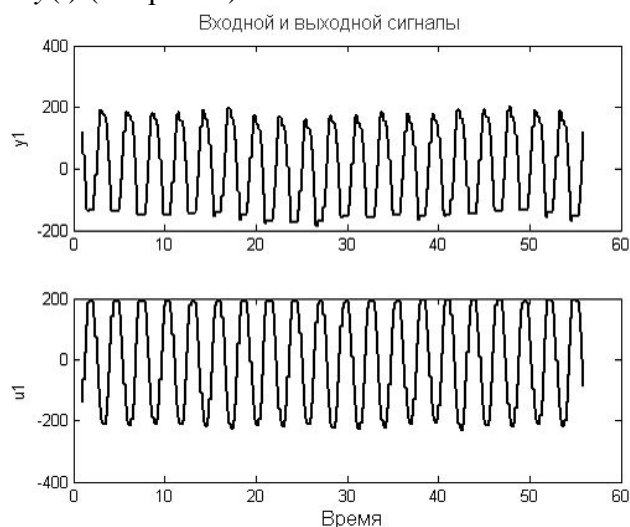


Рис. 2. Входной и выходной сигналы

На первом этапе была рассмотрена модель с одной степенью свободы. В этом случае были получены следующие значения коэффициентов демпфирования и частоты собственных колебаний, показанные в табл. 1 в столбце I. Здесь видно, что в этом случае его значение достаточно велико, а значение частоты собственных колебаний, наоборот, мало (см. рис. 3).

Во втором случае (столбец II) была исследована система с двумя степенями свободы, одна из которых соответствует первому образцу, а вторая – второму. Здесь наблюдается более интересная картина. В первом образце имеет место последовательное (по сравнению с предыдущей системой) уменьшение значения коэффициента демпфирования и увеличение частоты собственных колебаний. С другой стороны, на выходе коэффициент демпфирования оказывается еще большим. При этом частота собственных колебаний пренебрежимо мала (см. рис. 4).

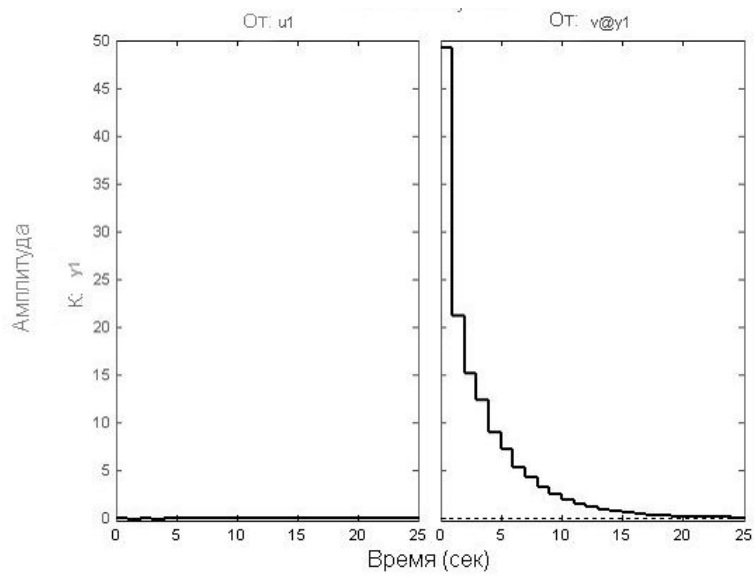


Рис. 3. Реакция системы 1 на единичный импульс

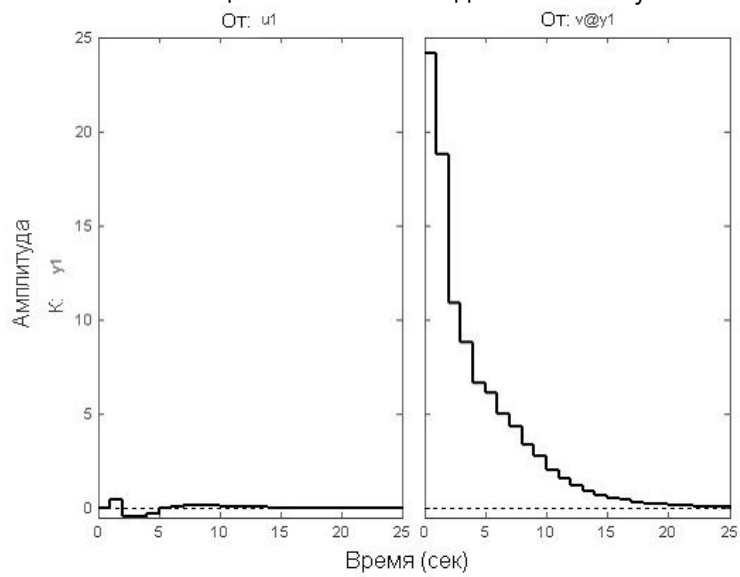


Рис. 4. Реакция системы 2 на единичный импульс

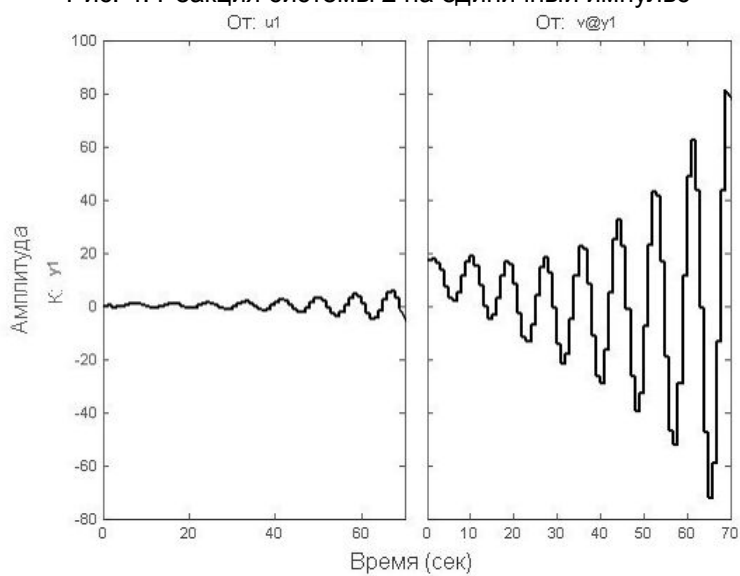


Рис. 5. Реакция системы 3 на единичный импульс

В третьем случае (столбец III) вводится дополнительная, третья, степень свободы, которая соответствует так называемому третьему телу. Третье тело – это отработанные частицы поверхностного слоя трущихся поверхностей, которые влияют на всю систему трения. Это тело и накладывает третью степень свободы. При введении этой степени свободы в рассмотрение получается, что коэффициенты демпфирования резко уменьшаются. В свою очередь, частоты собственных колебаний растут и начинают играть ключевую роль (см. рис. 5).

Итак, как видно из проведенного исследования, по мере увеличения количества степеней свободы коэффициенты демпфирования плавно уменьшаются, а частоты собственных колебаний, наоборот, увеличиваются, а в третьем случае коэффициент демпфирования вообще перестает влиять на систему. Таким образом, в третьем случае мы имеем неустойчивую систему.

Структурная идентификация позволила получить следующие модели в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases},$$

где в первом случае:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0.5215 & 0.08838 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} -0.204 & 21.15 \\ -0.05336 & 15.05 \end{pmatrix}; C = (1 \ 0),$$

во втором случае:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.2018 & -0.5528 & 0.1013 & 1.13 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0.3958 & 18.74 \\ -0.4599 & 10.91 \\ -0.4731 & 8.771 \\ -0.2979 & 6.626 \end{pmatrix}; C = (1 \ 0 \ 0 \ 0),$$

а в третьем случае:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.6331 & 0.8121 & 0.9078 & -1.642 & -0.3615 & 1.897 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.2989 & 17.39 \\ -0.7248 & 16.1 \\ -0.4127 & 13.43 \\ -0.4051 & 7.288 \\ 0.003989 & 3.014 \\ 0.5776 & 2.079 \end{pmatrix}; C = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0).$$

При исследовании систем с различными степенями свободы были получены значения коэффициентов демпфирования, полюсов и частот собственных колебаний, представленные в табл. 1. Случай 1 соответствует системе с одной степенью свободы, случай 2 – системе с двумя степенями свободы, а случай 3 – системе с тремя степенями свободы.

Таким образом, были смоделированы динамические системы с различным числом степеней свободы. При помощи снятых экспериментальным путем зависимостей с использованием ППП Matlab эти математические модели, учитывающие последовательно

одну, две и три степени свободы, исследованы на отклик при действии ступенчатой нагрузке. На основе изучения решений можно сделать вывод: существенно влияет на систему лишь третья, дополнительная степень свободы, соответствующая третьему телу.

|                               | I         | II               | III               |
|-------------------------------|-----------|------------------|-------------------|
| Коэффициент демпфирования     | 0.5215    | 1                | 1                 |
|                               | 1         | 1                | 1                 |
|                               |           | 1                | 1                 |
|                               | 1.00e+000 | 0.2018           | 1                 |
|                               | 1.22e-001 | -0.5528          | 1                 |
|                               |           | 0.1013           | -0.6331           |
|                               |           |                  | 0.8121            |
|                               |           | 1.00e+000        | 0.9078            |
|                               |           | 6.96e-001        | -1.642            |
|                               |           | 6.96e-001        | -0.3615           |
|                               |           | 1.11e-001        |                   |
|                               |           |                  | 5.63e-001         |
|                               |           |                  | 5.63e-001         |
|                               |           |                  | -4.92e-002        |
|                               |           |                  | -4.92e-002        |
|                               |           |                  | 7.36e-002         |
|                               |           |                  | 7.36e-002         |
| Полюс                         | 0.08838   | 1,130            | 1.897             |
| Частоты Собственных колебаний | -0.6793   | -0.7045          | -0.7538 + 0.3136i |
|                               | 0.7677    | 0.7731           | -0.7538 - 0.3136i |
|                               |           | 0.5308 + 0.2980i | 0.7664 + 0.6987i  |
|                               |           | 0.5308 - 0.2980i | 0.7664 - 0.6987i  |
|                               |           |                  | 0.9358 + 0.0857i  |
|                               |           |                  | 0.9358 - 0.0857i  |
|                               |           |                  |                   |
|                               | 2.64e-001 | 2.57e-001        | 1.10e-001         |
|                               | 3.17e+000 | 7.13e-001        | 1.10e-001         |
|                               |           | 7.13e-001        | 7.40e-001         |
|                               |           | 3.16e+000        | 7.40e-001         |
|                               |           |                  | 2.75e+000         |
|                               |           |                  | 2.75e+000         |

Таблица 1. Коэффициенты демпфирования, полюса и частоты собственных колебаний систем

## Литература

1. Бесекаерский В. А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2004.
2. Мусалимов В. М. Бифуркационный механизм разрушения поверхностного слоя при трении // Инструмент и технологии. 2004. Т.5. № 9. С. 143–146.

# ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРЫ ТРЕНИЯ «СТЕКЛО – СТЕКЛО»

М.А. Сапожков

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

Рассмотрен принцип работы исследовательской установки и его преимущества перед известными методами определения трибологических характеристик различных материалов. С использованием программной среды MATLAB показан результат идентификации (в разные промежутки времени трибологического процесса) в виде графиков, а также дан его анализ.

Исследование трибологических характеристик стекла является перспективным для оптической промышленности, а именно в области обработки оптических стекол – с позиций повышения точности и снижения себестоимости продукции.

В настоящее время для исследования трибологических характеристик материала в основном используется один и тот же принцип. На диск из исследуемого материала подается вращательное движение с определенным усилием (чтобы диск вращался с определенной скоростью при условии, что на него не будут воздействовать внешние силы), при этом на диск давит палец с определенным усилием. В итоге измеряется скорость диска, которая из-за силы трения меньше, и эти данные обрабатываются (к примеру, находится коэффициент трения). Таким образом, образуется система с двумя и более входами и одним и более выходами, что затрудняет процесс измерения. К тому же, чтобы измерить некоторые (например, изменение шероховатости в результате процесса) параметры материала, необходимо остановить процесс.

Представленное исследование проводилось на установке «ТРИБАЛ-2» [1], собранной студентами и аспирантами ГИТМО, работа которой основывается на применении компьютерных и мехатронных технологий. Принципиальным отличием используемой триболометрической установки от вышеупомянутого метода является то, что в установке «ТРИБАЛ-2» имеется один вход и один выход, которые и позволяют снять динамические характеристики. Еще одним отличием является снятие этих характеристик без остановки процесса, а также возможность осуществлять постоянный мониторинг узла трения трибологической системы путем отслеживая динамических характеристик на мониторе компьютера. Принцип работы установки заключается в том, что есть два образца (в представленном исследовании это стекло-стекло), на один из которых подается возвратно-поступательное движение, а второй образец прижат к первому таким образом, чтобы осуществлялось проскальзывание (более подробное описание работы установки «ТРИБАЛ-2» приведено ниже). С обоих образцов снимаются результаты их движения, после чего они обрабатываются в программной среде MATLAB, где строится модель в пространстве состояний, в котором лучше всего чувствуется физика процесса.

Стоит отметить, что проводилось много работ по исследованию трения металлов и очень мало – по исследованию трения стекол, к тому же в динамике таких исследований ранее не было.

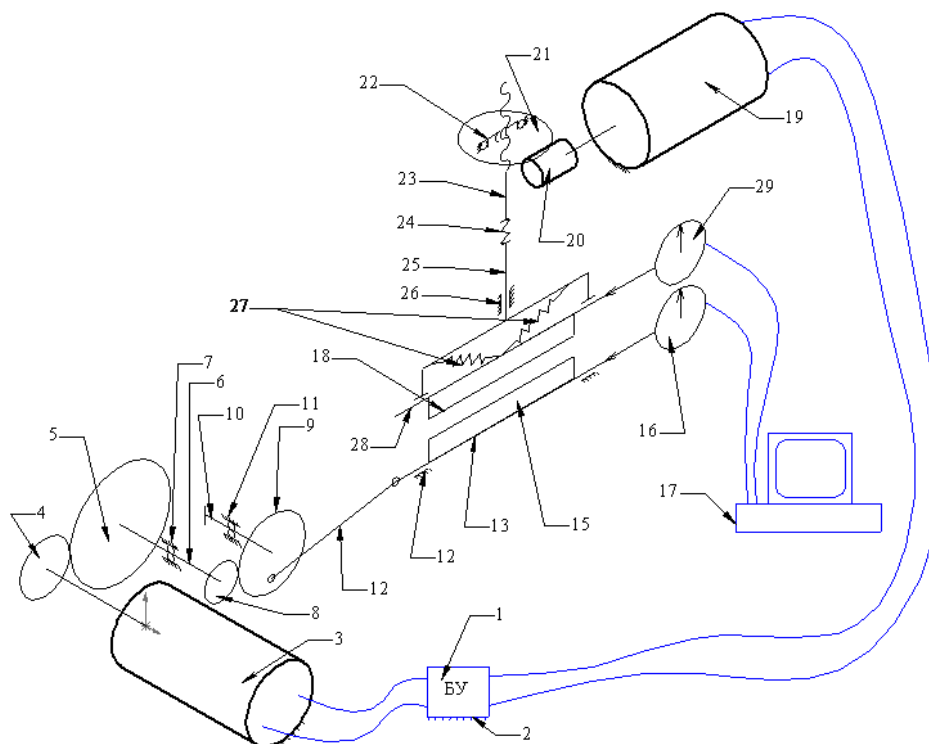
В представленной работе данные с установки (рис. 1а) снимались через каждые 30 минут в течение полутора часов. Частота ведущего образца составляла 0,029 Гц, при усилении нагружения образцов, обусловленном обратной связью в режиме трения, но не в режиме истирания. В исследовании использовались образцы из оптического стекла с геометрическими размерами 110×15×6 мм.

Используемую установку можно представить в виде блок-схемы (рис. 1б), состоящей из четырех основных блоков.

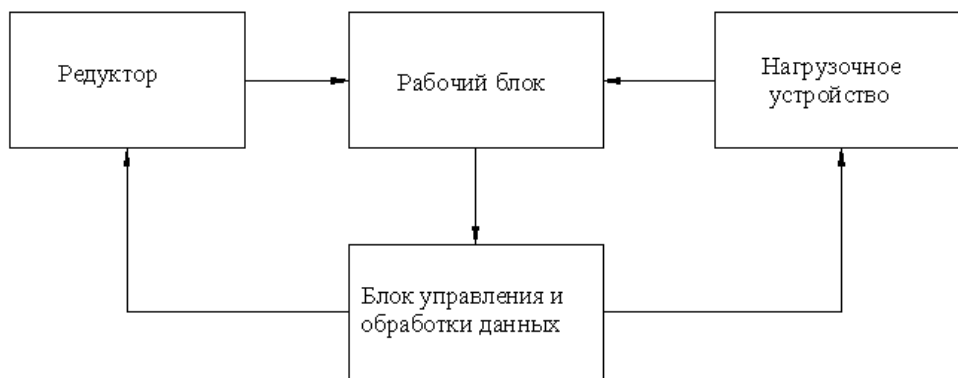
- Блок управления и обработки данных состоит из блока управления 1, компьютера 17 и датчиков 16, 29.



- Редуктор включает в себя двигатель 3 и зубчатые колеса 4,5,8,9.
- Нагрузочное устройство содержит двигатель 19, зубчатые колеса 21,22, гайку 22, винт 23, муфту 24 и нагрузочный стержень 25.
- В рабочий блок входят образцы 15, 18, шатун 12, а также верхняя и нижняя тележки 13, 28.



а



б

Рис. 1. Кинематическая схема (а) и блок-схема (б) трибологической установки «ТРИБАЛ-2»

Работа трибологической системы осуществляется следующим образом. С блока управления (1) подаем электрический сигнал на двигатель (3), который в итоге через зубчатые колеса (4–6) передает вращательное движение на зубчатое колесо (9). К последнему прикреплен со смещением относительно его центра шатун (12), который, в свою очередь, передает возвратно-поступательное движение на нижнюю тележку (13), на которой жестко закреплен нижний образец (15).

С блока управления (1) электрический сигнал также поступает на двигатель (19), который передает вращательное движение через червяк (20) на зубчатое колесо (21). С помощью пары винт (23) – гайка (22) вращательное движение преобразуется в поступательное, обеспечивая тем самым движение нагрузочной стойки (25). К последней по-

средством пружин (27) прикреплена верхняя тележка (28) с жестко закрепленным на ней верхним образцом (18). Сигналы входного и выходного поступательного движения снимаются с помощью датчиков (29, 16), после чего поступают на компьютер (17).

На рис. 2–5 представлены динамические характеристики (амплитудно-частотная, фазово-частотная и переходная) процесса трения стекло – стекло в моменты снятия данных 0, 30, 60, 90 минут, соответственно.

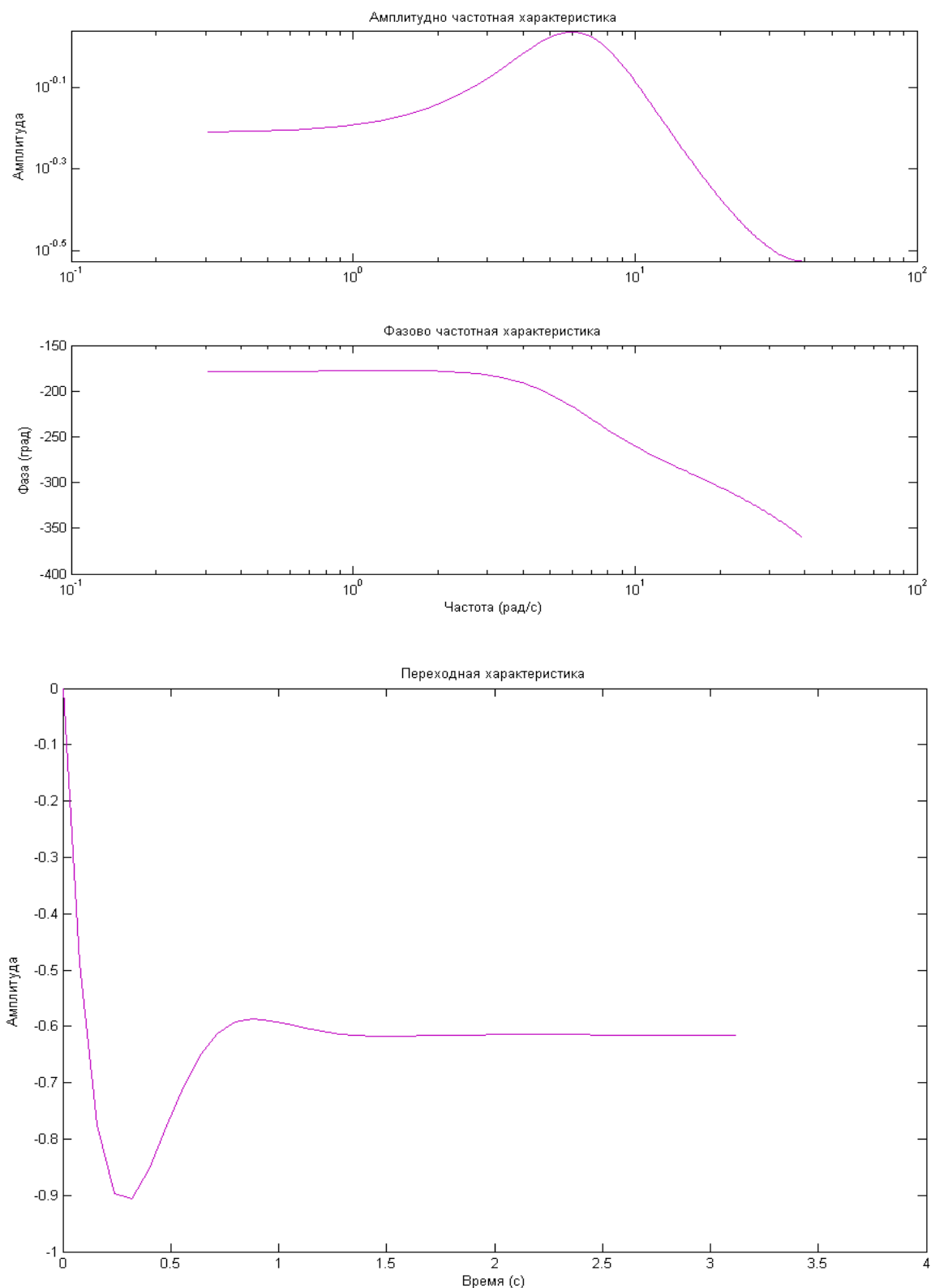


Рис. 2. Динамические характеристики, снятые в начальный момент времени :  $\sigma \approx 47\%$ ,  $X_{\max} \approx 0,91$ ,  $\tau_{\Pi} \approx 1,2$

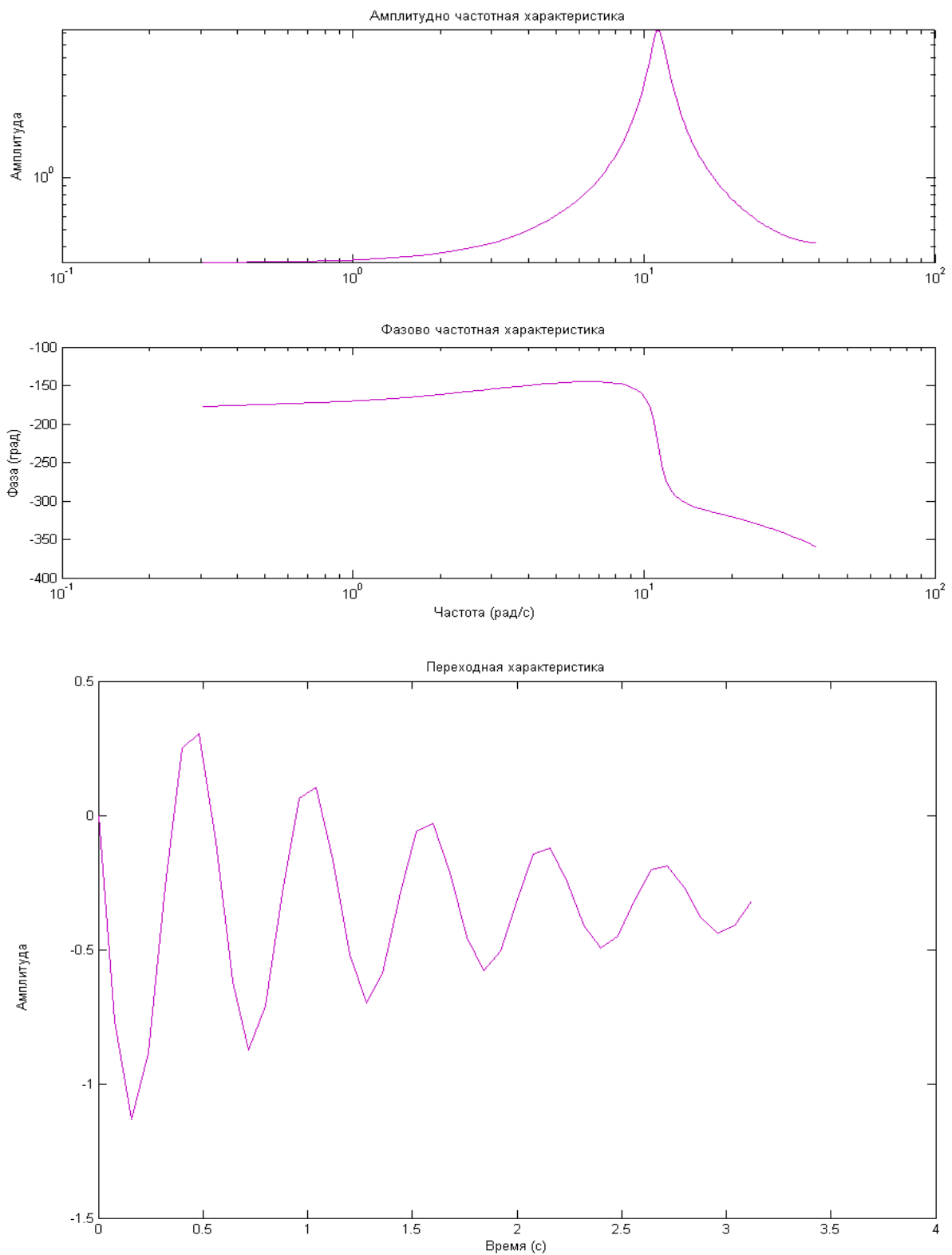


Рис. 3. Динамические характеристики, снятые через 30 минут после начала процесса трения:  
 $\sigma \approx 456\%$ ,  $X_{\max} \approx 1,14$ ,  $\tau_{II} > 3,3$

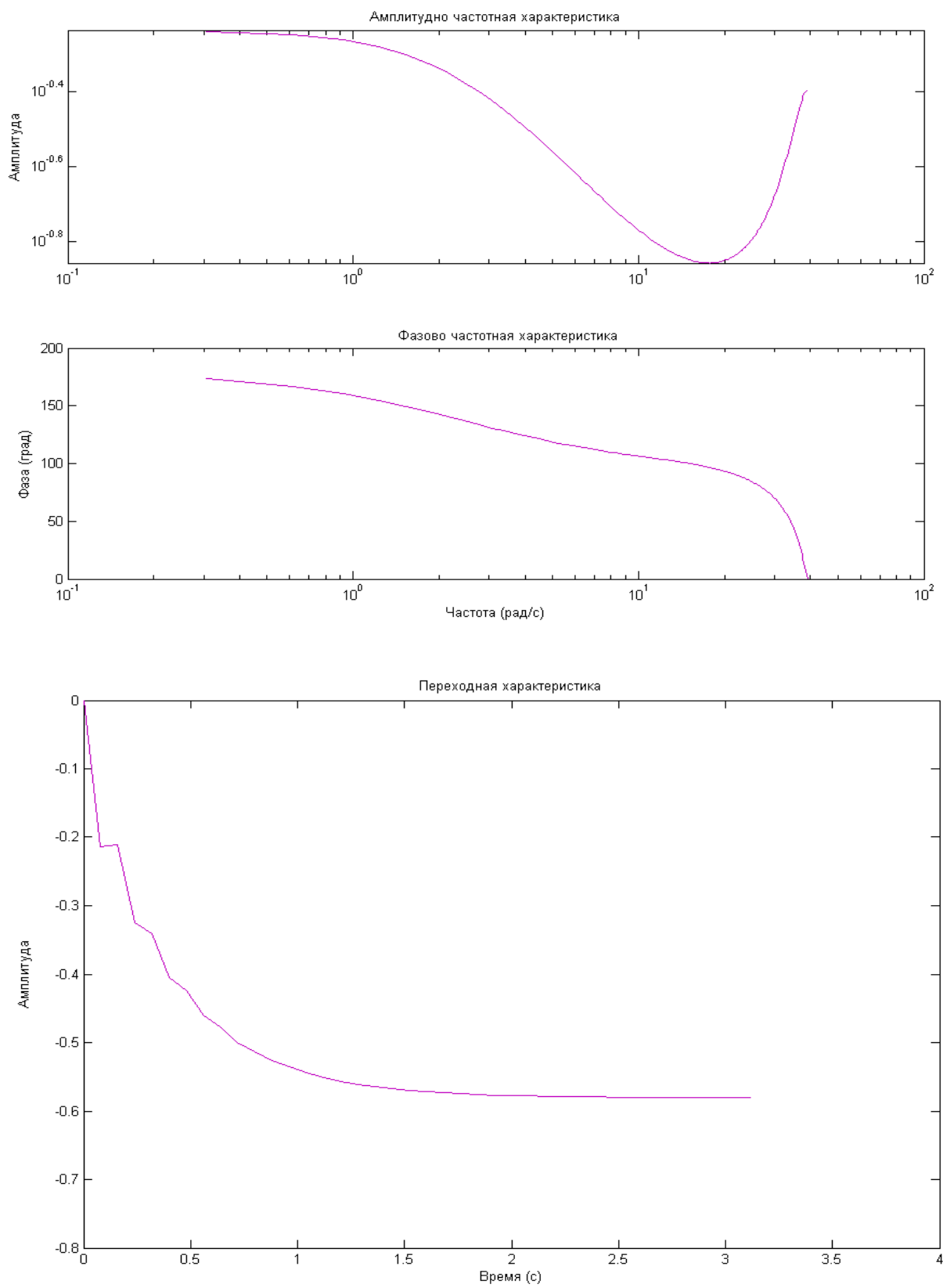


Рис. 4. Динамические характеристики, снятые через 60 минут после начала процесса трения:  
 $\tau_{II} > 1,3$

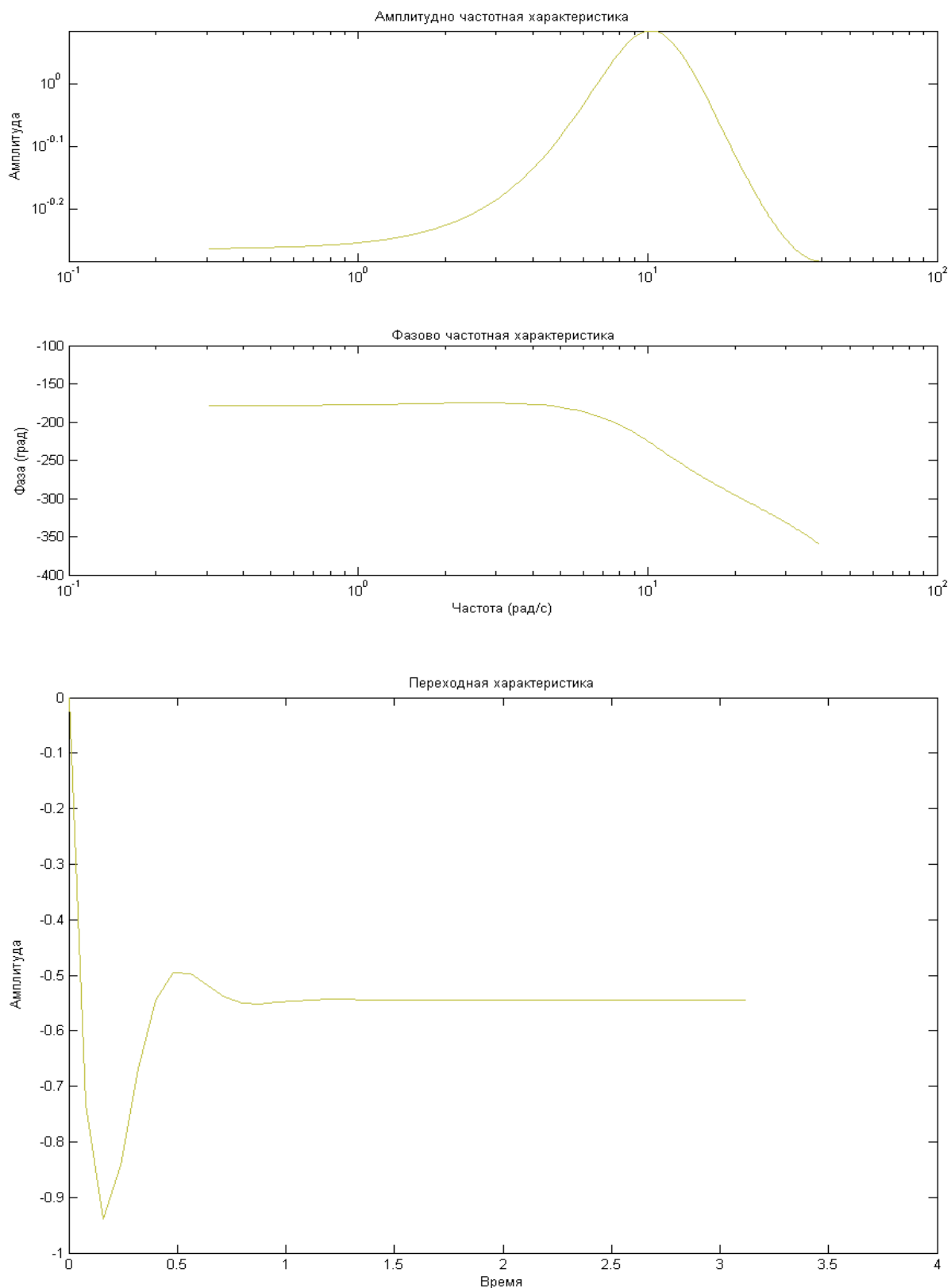


Рис. 5. Динамические характеристики, снятые через 30 минут после начала процесса трения:  
 $\sigma \approx 70,9\%$ ,  $X_{\max} \approx 0,94$ ,  $\tau_{п} > 0,7$

Анализируя амплитудно–частотные характеристики, можно заметить, что во время снятия данных 0, 30 и 90 минут наблюдается вполне классическая картина, т.е. до и после резонансной частоты, характеризующейся пиком (при этом он направлен в по-

ложительную сторону оси ординат), амплитуда выходного сигнала меньше амплитуды входного. На графике, данные для которого снимались через 60 минут после начала трения, наблюдается аномалия, а именно: во время резонанса амплитуда выходного сигнала не увеличивается по сравнению с амплитудой входного, как это происходило в остальных случаях, а уменьшается, на графике это направление пика, перевернутого в обратную сторону. С точки зрения систем автоматического регулирования [2] это объясняется положительной обратной связью, что не характерно для представленного процесса; это обстоятельство требует самостоятельного рассмотрения.

На фазово-частотных характеристиках выявляется не менее интересная картина. А именно, в моменты снятия данных 0, 30 и 90 минут, в начале наблюдается очень незначительное опережение фазы выходного сигнала по сравнению с входным, затем осуществляется относительно плавный переход к отставанию фазы, в то время как из теории известно, что у инерционной системы всегда имеет место отставание по фазе, что и подтверждают данные, снятые в момент времени равный 60 минутам.

На рис. 2–5, кроме графиков, также представлены основные параметры, характеризующие систему и найденные по переходной характеристике – это перерегулирование  $\sigma$ , максимальное значение регулируемой величины  $X_{\max}$  и время переходного процесса  $\tau_n$ . По этой же характеристике видно, что в течение всего процесса система устойчива, что и подтверждается временем переходного процесса.

Таким образом, в представленных графиках динамических характеристик наблюдаются (учитывая, что данные снимались с одной и той же установки одного и того же процесса) значительные различия. Этот разброс является причиной того, что обратная связь осуществляется оператором на глаз, и пока что невозможно оперировать усилием как постоянной величиной, поэтому в статье не приведены данные по шероховатости. В дальнейшем планируется это исправить при помощи ввода автоматической обратной связи.

На момент написания статьи существует очень мало работ по исследованию трибологических свойств пары трения стекло-стекло, и, подводя общие итоги, можно сказать, что данный процесс представляется достаточно интересным и незавершенным, определяя дальнейшее направление изучения.

## Литература

1. Мусалимов В.М., Ларичкин М.П., Анিকেенко А.Д. Трибометрическая система идентификации динамики процесса циклического изнашивания // Труды шестой сессии международной научной школы. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. / Под ред. В. М. Мусалимова и Б. С. Падуна СПб. ИТМО. 2003. С. 52–59.
2. Б.А. Бесекерский, Е.П. Попов. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.

# АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПЛОСКИХ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕРКОНОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Н.Н. Валентик, В.А. Климанов, Н.В. Когай

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич

В работе осуществлён вывод уравнений динамики плоских упругих чувствительных элементов (УЧЭ). Проведён анализ АЧХ контактных сердечников герконов и акселерометров.

Динамические характеристики герконов для процесса срабатывания находятся решением системы трех уравнений. Первое уравнение системы – уравнение электрических процессов в обмотке, второе – уравнение движения подвижного звена, третье – уравнение магнитных процессов в магнитной системе [1].

Новый подход к исследованию упругих чувствительных элементов герконов, основанный на применении абелевых функций [1], позволяет достичь наиболее корректного и адекватного аналитического описания как самих УЧЭ, так и происходящих в них динамических процессов. При этом подходе аналитические выражения, описывающие рабочие поверхности УЧЭ, решения нелинейного уравнения движения, а также решение вариационной задачи порядка  $p$ , используемые для оценки устойчивости и надежности УЧЭ, строятся из абелевых функций от  $p$ -переменных.

Найдем АЧХ для нелинейного дифференциального уравнения, описывающего динамику плоских УЧЭ [6]:

$$A \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + B_1 \frac{d\varphi}{dt} + B_2 \frac{d\varphi}{dt} \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| + C \sin \varphi = F(t). \quad (1)$$

Для этого воспользуемся методом комплексных амплитуд [2, 3]. Положим, что возмущающая сила меняется по закону  $F(t) = F_0 \cos \omega t$ , и перепишем уравнение (1) в виде

$$\ddot{y} + 2 \frac{n}{m_\Sigma} \dot{y} + \frac{\mu}{m_\Sigma} \dot{y} |\dot{y}| + p_k^2 y = (F_0 / m_\Sigma) \cos \omega t. \quad (2)$$

Введем в рассмотрение комплексную величину  $y_*$ , действительная часть которой совпадает с выражением для смещения  $\text{Re } y_* = y$ . Зависимость возмущающей силы от времени также представим в комплексной форме  $F_*(t) = F_0 \exp(i\omega t)$ , так что  $F(t) = \text{Re } F_*(t) = F_0 \cos \omega t$ .

Действительная часть решения уравнения

$$\ddot{y}_* + 2 \frac{n}{m_\Sigma} \dot{y}_* + \frac{\mu}{m_\Sigma} \dot{y}_* |\dot{y}_*| + p_k^2 y_* = (F_0 / m_\Sigma) e^{i\omega t}, \quad (3)$$

совпадает с решением уравнения (2), так как коэффициенты уравнения являются действительными величинами. Искомое решение запишем в виде

$$\begin{aligned} \dot{y}_* &= A_* \omega i e^{i\omega t}, \\ \ddot{y}_* &= -A_* \omega^2 e^{i\omega t}, \\ |\dot{y}_*| &= |A_* \omega i e^{i\omega t}| = A_* \omega. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно, получаем:

$$A_* (-\omega^2 + 2 \frac{n}{m_\Sigma} \omega i + \frac{\mu}{m_\Sigma} A_* \omega^2 i + p_k^2) = F_0 / m_\Sigma, \quad (5)$$

откуда определяется комплексная амплитуда в виде

$$A_*(\omega) = \frac{F_0}{m_\Sigma \left[ p_k^2 - \omega^2 + i \left( 2 \frac{n}{m_\Sigma} \omega + \frac{\mu}{m_\Sigma} A_* \omega^2 \right) \right]} \quad (6)$$

или в показательной форме:

$$A_* = A_* \exp(i\omega t), \quad (7)$$

где

$$A(\omega) = \frac{F_0}{m_\Sigma \sqrt{(p_k^2 - \omega^2)^2 + \left(2 \frac{n}{m_\Sigma} \omega + \frac{\mu}{m_\Sigma} A_* \omega^2\right)^2}}, \quad (8)$$

$$\phi = \arctg \frac{2(n/m_\Sigma)\omega + (\mu/m_\Sigma)A_*\omega^2}{p_k^2 - \omega^2}. \quad (9)$$

В качестве модели, отражающей динамику чувствительного элемента акселерометра и инерционного элемента микромеханического сенсора (рис.1, 2), используется нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\left(m_0 + \frac{\rho b L^3}{12h}\right) \ddot{y} + \left(\frac{\eta b L^3}{h^3}\right) \dot{y} + \left(\frac{\rho b L^3}{6h^2}\right) \dot{y} |\dot{y}| + R_0 y = m_0 a(t). \quad (10)$$

АЧХ рассматриваемой модели акселерометра имеет вид

$$A(\omega) = \frac{a_0}{\sqrt{\left(\frac{R_0}{m_0 + \frac{\rho b L^3}{12h}} - \omega^2\right)^2 + 4 \left\{ \frac{\eta b L^3}{2h^3} \frac{1}{m_0 + \frac{\rho b L^3}{12h}} + \frac{4}{3\pi} \left(\frac{1}{m_0 + \frac{\rho b L^3}{12h}}\right) \frac{\rho b L^3}{6h^2} \omega A(\omega) \right\} \omega^2}}. \quad (11)$$

Частоту собственных колебаний приведенных моделей можно определить по методу Релея из условия постоянства полной энергии системы (при отсутствии сопротивления и возмущающих сил).

Для построения графиков АЧХ герконов различных типов разработан ППП (Приложение 4) на языке программирования Visual C++ 6.0 Enterprise Edition. При расчете функции  $A(\omega, p_k)$  использовался метод половинного деления [2, 3]:

$$A(\omega, p_k) = \frac{F_0}{m_\Sigma \sqrt{(p_k^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{2n}{m_\Sigma} \omega + \frac{\mu}{m_\Sigma} A(\omega, p_k) \omega^2\right)^2}} = 0. \quad (12)$$

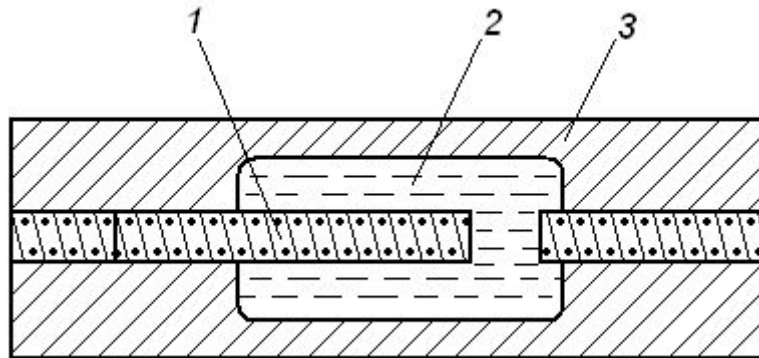


Рис.1. Акселерометр с УЧЭ в виде плоской балки (1 – УЧЭ, 2 – вязкая среда, 3 – корпус акселерометра)

Начальными данными в алгоритме расчета АЧХ являются коэффициенты уравнения и требуемый уровень точности вычислений.



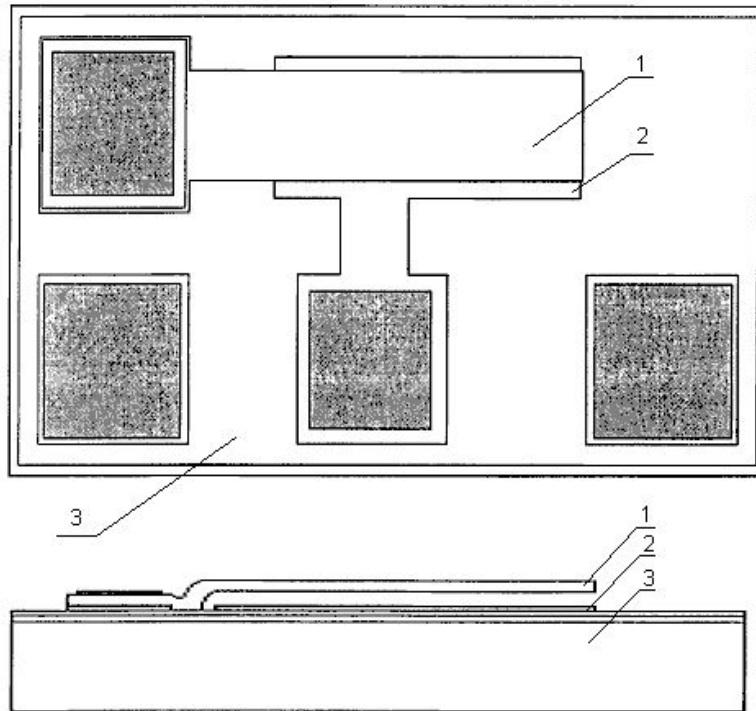


Рис. 2. Балочный инерционный элемент кремниевого микромеханического сенсора (1 – УЧЭ, 2 – контактная площадка, 3 – подложка микромеханического сенсора)

АЧХ для геркона типа МКА-27101, полученные с помощью разработанного ППП, опубликованы в работах автора [1, 4, 5].

Разработанные математические модели для АЧХ плоских пружин герконов и акселерометров позволяют выявить влияние конструктивных параметров магнитоуправляемых контактов и датчиков ускорения на их АЧХ, что очень важно при разработке инженерной методики подбора коэффициента демпфирования данных устройств в зависимости от рабочего диапазона.

## Литература

1. Ткалич В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 98 с.
2. Бидерман В.А. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
3. Бидерман В.А. Прикладная теория механических колебаний.- М.: Высшая школа, 1972. 416 с.
4. Ткалич В.Л., Лобанцев А.В., Галин Ю.В. Построение уточненного аналитического выражения АЧХ газонаполненных герконов. // Тезисы доклада на Всероссийской научной конференции (Computer-Based Conference) «Методы и средства измерений» в разделе 11. «Мат. модели и численное моделирование измерительных приборов и датчиков», Нижний Новгород, 1 мая 2000 г., с.17.
5. Ткалич В.Л., Михеева О.Д., Лобанцев А.В., Галин Ю.В. Анализ АЧХ измерительных устройств на основе плоских УЧЭ компьютерными методами. // Депонирована в ВИНТИ № 1330 – В00, 06.05.00. – 8с.

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ГОФРОВ СИЛЬФОНА

И.М. Кудрявцева

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

В данной статье представлен алгоритм расчета аналитическими методами жесткости гофров сальфона, находящегося под действием системы различных внешних сил. Полученные в статье формулы могут быть использованы для эффективного регулирования жесткости системы изменением физико-механических свойств и геометрии изучаемого объекта.

## Введение

Объектом исследования статьи являются цилиндрические гофрированные оболочки (сальфоны). В предыдущих публикациях автора было построено аналитическое описание профилей изучаемых объектов с использованием эллиптических функций, а также установлена связь между параметрами эллиптических функций и геометрическими параметрами сальфонов различной формы [1]. Такое построение имеет ряд существенных преимуществ и выводит инженеров на качественно новый уровень расчета и проектирования упругих чувствительных элементов, позволяющий описывать их поведение при различных нагрузках.

В статье аналитическими методами определяется жесткость гофров сальфона, находящегося под действием системы внешних сил, включающая в себя комбинацию произвольно распределенных по длине гофра единичных и распределенных сил  $q$  и  $P$ . Это позволит нам в дальнейшем перейти к описанию его динамики.

## Определение жесткости гофра сальфона аналитическими методами

Рассмотрим отдельно взятый гофр сальфона, имеющий заданные характеристики: длину  $l$ , ширину  $h$ , жесткости при изгибе  $E_1 J_1$ ,  $E_2 J_2$  и представим его в виде расчетной схемы, изображенной на рис.1. Приложим к верхнему горизонтальному стержню полученной конструкции систему внешних сил, включающую в себя различные комбинации распределенных нагрузок  $qb$  и единичных сил  $P$ .

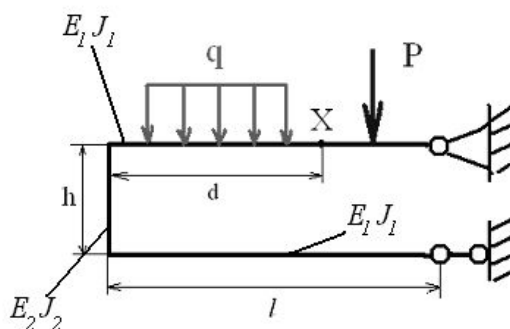


Рис.1. Расчетная схема гофра сальфона

Определим жесткость гофра сальфона, находящегося под действием описанной выше системы внешних сил, в произвольной точке  $X$ , и найдем зависимость жесткости конструкции от параметров сальфона и нагрузки.

Для решения поставленной задачи сначала определим перемещения заданной произвольным образом точки  $X$  конструкции, находящейся под действием каждой отдельной силы, и воспользуемся принципом суперпозиции. Это поможет существенно упростить расчеты и проследить влияние каждого отдельного вида нагрузки на жесткость конструкции.

Рассмотрим два вида сил, действующих на конструкцию: единичная сила  $P$ , находящейся на расстоянии  $a$  от вертикального стержня (см. рис.2.а) и распределенная нагрузка  $qb$  (см. рис.2.б).

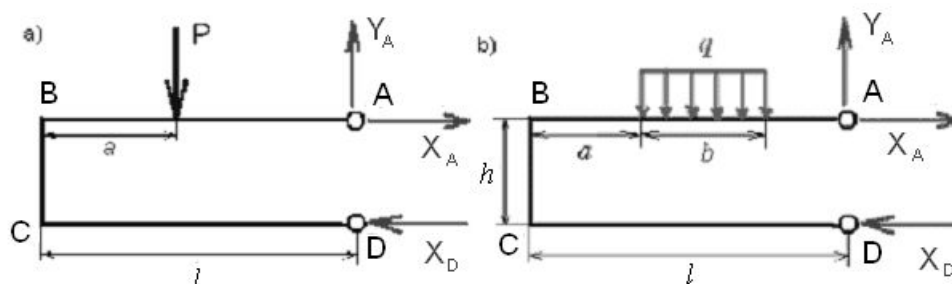


Рис. 2. Расчетные схемы для различных видов нагружения:  
а) единичная нагрузка; б) распределенная нагрузка

Независимо от вида нагружения, для определения жесткости мы будем пользоваться одним и тем же алгоритмом, представленным ниже.

1. С учетом статической определимости задачи определяем **реакции опор конструкции**. Для случая а) они равны:

$$X_A = X_D = \frac{P(l-a)}{h}, \quad (1)$$

$$Y_A = P.$$

а для распределенной нагрузки, соответственно:

$$X_A = X_D = \frac{qb(l-a-b/2)}{h}, \quad (2)$$

$$Y_A = qb.$$

2. **Построим эпюру момента от силы нагружения**. Для этого наметим на каждой схеме характерные сечения и определим момент, действующий на каждом из полученных участков, а также найдем зависимости  $M_p = f(x)$  на каждом из участков.

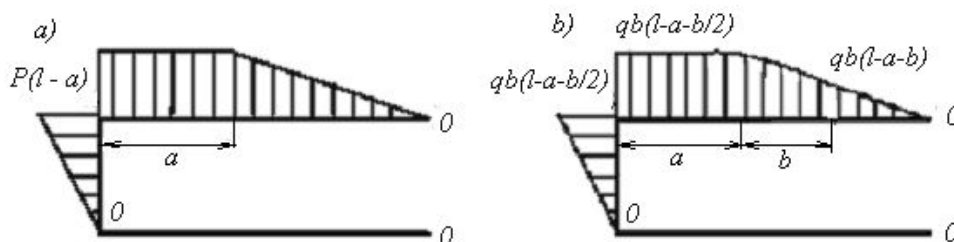


Рис. 3. Эпюра момента от различных нагрузок

3. Построим **эпюру момента от единичной силы, приложенной в точке X**, где требуется найти перемещение от заданной нагрузки. Вид эпюры будет зависеть от местоположения точки  $X$  на конструкции, поэтому далее рассмотрим три возможных варианта нахождения точки  $X$ :
  - 3.1. Точка  $X$  находится на стержне АВ на расстоянии  $d$  от внешнего края (см. рис. 4). Данный случай аналогичен нагружению конструкции единичной силой при  $P = 1$ ,  $a = d$ , поэтому реакции опор будут выражаться следующим образом:

$$X_A = X_D = \frac{(l-d)}{h},$$

$$Y_A = 1.$$

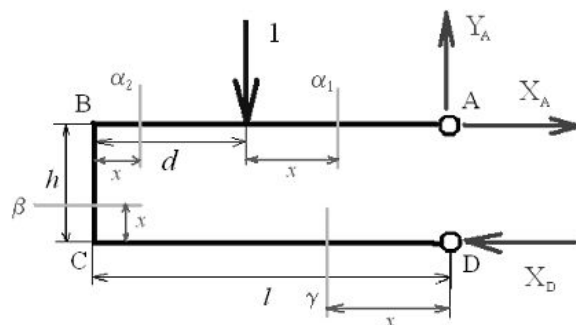


Рис. 4. Расчетная схема для случая 3.1

Эпюра момента будет иметь вид, представленный на рис. 5.

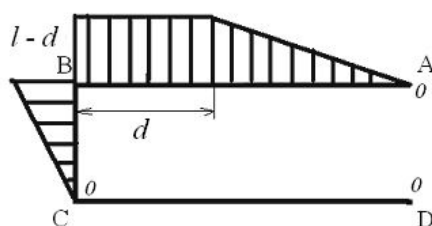


Рис. 5. Эпюра момента от единичной силы, приложенной в точке X на расстоянии d от края

3.2. Точка X находится на стержне BC. Принимая во внимание то, что все точки рассматриваемой прямой перемещаются в вертикальном направлении одинаково под действием единичной силы, приложенной в точке X, ей принадлежащей, данный случай может быть рассмотрен как предельный вариант 3.1 при  $d = 0$ .

3.3. Точка X принадлежит горизонтальному стержню CD и находится на расстоянии d от внешнего края (рис. 6).

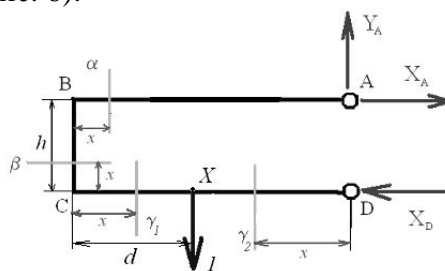


Рис. 6. Положение точки X на конструкции в случае 3.3.

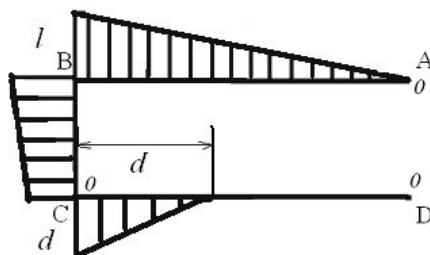


Рис. 7. Эпюра момента от действия единичной силы, приложенной в точке X для случая 3.3

В данном случае возникают реакции опор, равные

$$\begin{aligned} X_A = X_D = 0, \\ Y_A = 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Для построения эпюры момента от действия данной единичной силы наметим 4 характерных сечения, показанных на рис. 6. Искомая эпюра изображена на рис. 7.

4. Найдем перемещение точки  $X$  в вертикальном направлении под действием различных сил. Для этого составим интеграл Мора для каждого из рассмотренных в п.3 случаев нахождения точки  $X$ :

$$\Delta_{1P} = \sum \int_s \frac{M_1 M_P}{JE} ds, \quad (4)$$

где  $\Delta_{1P}$  – перемещение в направлении 1 (вертикально вниз) от силы нагружения  $P$ ;  $M_1$  – момент от действия единичной силы функции  $s$ ;  $M_P$  – момент от действия силы нагружения  $P$  функции  $s$ ;  $EJ$  – жесткость конструкции при изгибе;  $E$  – модуль продольной упругости стержня конструкции.

Если точка  $X$  находится на продольном стержне  $AB$ , решающее значение будет иметь ее расположение относительно нагрузки, поэтому при расчете перемещений требуется разбить случай 3.1 на два возможных варианта решения для единичной силы  $P$ , когда  $d \geq a$  и  $d < a$ , а для распределенной нагрузки – на три:  $d \geq a + b$ ,  $a \leq d \leq a + b$  и  $0 \leq d \leq a$ . Составляя интеграл Мора для каждого из указанных случаев, получим выражения перемещений точек конструкции, приводимые ниже.

*1. Система нагружена только единичной силой  $P$ .*

Точка  $X$  находится на продольном стержне  $AB$ .

$d \geq a$ :

$$\Delta_{1P}^{AB1} = \frac{P}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-d)(l-a)^2}{2} - \frac{(l-d)^3}{6} + a(l-a)(l-d) \right] + \frac{P}{E_2 J_2} \frac{(l-a)(l-d)h}{3}. \quad (5)$$

$d < a$ :

$$\Delta_{1P}^{AB2} = \frac{P}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)(l-d)^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} + d(l-a)(l-d) \right] + \frac{P}{E_2 J_2} \frac{(l-a)(l-d)h}{3}. \quad (6)$$

Для случая, когда точка  $X$  находится на поперечном стержне  $BC$ , подставим в выражение перемещений (7) значение  $d = 0$  и рассчитаем перемещения вершины  $B$ , принадлежащей продольному стержню  $AB$  и поперечному стержню  $BC$  одновременно:

$$\Delta_{1P}^{BC} = \frac{P}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)l^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} \right] + \frac{P}{E_2 J_2} \frac{(l-a)lh}{3}. \quad (7)$$

В случае, когда точка  $X$  находится на продольном стержне  $CD$  на расстоянии  $d$  от внешнего края, выражение для вычисления вертикальных перемещений точек конструкции имеет вид

$$\Delta_{1P}^{CD} = \frac{P}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)l^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} \right] + \frac{P}{E_2 J_2} \left[ \frac{(l-a)(l-d)h}{3} + \frac{(l-a)dh}{2} \right]. \quad (8)$$

*2. Система находится под действием распределенной нагрузки  $qb$ .*

Точка  $X$  находится на продольном стержне  $AB$ ,  $d \geq a + b$ . Перемещение в вертикальном направлении точки  $X$  будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \Delta_{1Q}^{AB1} = \frac{qb}{E_1 J_1} \left[ (l-d) \frac{(l-a-b)^2}{4} + \frac{(l-d)(l-a)^2}{4} - \frac{(l-d)^3}{6} + a(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) \right] + \\ + \frac{qb}{E_2 J_2} \frac{(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) h}{3}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$a \leq d \leq a + b,$$

$$\Delta_{1Q}^{AB2} = \frac{qb}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-d)(l-a)^2}{4} - \frac{(l-d)^3}{12} + a(l-d)(l-a-b/2) \right] +$$

$$+ \frac{qb}{E_2 J_2} \frac{(l-d)(l-a-b/2)h}{3}.$$
(10)

$$0 \leq d \leq a,$$

$$\Delta_{1Q}^{AB3} = \frac{qb}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + (l-a-b/2) \left[ \frac{(l-d)^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} + (l-d)d \right] \right] +$$

$$+ \frac{qb}{E_2 J_2} \frac{(l-d)(l-a-b/2)h}{3}.$$
(11)

Точка  $X$  находится на поперечном стержне BC

$$\Delta_{1Q}^{BC} = \frac{qb}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + (l-a-b/2) \left[ \frac{l^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} \right] \right] +$$

$$+ \frac{qb}{E_2 J_2} \frac{l(l-a-b/2)h}{3}.$$
(12)

Точка  $X$  находится на продольном стержне CD

$$\Delta_{1Q}^{CD} = \frac{qb}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + (l-a-b/2) \left[ \frac{l^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} \right] \right] +$$

$$+ \frac{qb}{E_2 J_2} \left[ \frac{(l-d)(l-a-b/2)h}{3} + \frac{(l-a-b/2)hd}{2} \right].$$
(13)

Итак, используя формулы (5)–(13), мы можем определить перемещения любой точки конструкции (рис. 1) под действием единичной силы  $P$  и распределенной нагрузки  $qb$ . Нетрудно заметить, что данные перемещения зависят от геометрических и физических характеристик конструкции ( $l, h, E, J$ ), от значения силы нагружения и ее положения на стержне АВ. Данные зависимости также позволяют нам определить жесткости гофра сиффона в соответствии с заданными характеристиками и параметрами системы.

5. Определим **жесткость системы** (рис.1). Для этого воспользуемся формулой:

$$P = C \cdot \Delta, \tag{14}$$

где  $P$  – сила нагружения;  $C$  – жесткость системы,  $\Delta$  – перемещение под действием силы  $P$ .

3.1. Система нагружена единичной силой  $P$ .

1) В случае, если точка  $X$  находится на продольном стержне АВ,  $d \geq a$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-d)(l-a)^2}{2} - \frac{(l-d)^3}{6} + a(l-a)(l-d) \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-a)(l-d)h}{3}}. \tag{15}$$

2) В случае, когда точка  $X$  находится на продольном стержне АВ,  $d < a$ :

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)(l-d)^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} + d(l-a)(l-d) \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-a)(l-d)h}{3}}. \tag{16}$$

3) В случае, когда точка  $X$  находится на поперечном стержне BC:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)l^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-a)lh}{3}}. \quad (17)$$

4) В случае, когда точка  $X$  находится на продольном стержне CD:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a)l^2}{2} - \frac{(l-a)^3}{6} \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \left[ \frac{(l-a)(l-d)h}{3} + \frac{(l-a)dh}{2} \right]}, \quad (18)$$

где  $EJ$  – жесткость системы при изгибе;  $l$  – длина продольных стержней системы (см. рис.1);  $h$  – длина поперечного стержня системы (см. рис 1);  $a$  – расстояние до точки приложения силы нагружения (см. рис. 2);  $d$  – расстояние до точки, в которой требуется посчитать частоту (см. рис.1).

3.2. Система нагружена распределенной нагрузкой  $qb$ :

1) Точка  $X$  находится на продольном стержне АВ,  $d \geq a + b$ . Жесткость системы в точке  $X$  будет определяться выражением:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ (l-d) \frac{(l-a-b)^2}{4} + \frac{(l-d)(l-a)^2}{4} - \frac{(l-d)^3}{6} + a(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) h}{3}}. \quad (19)$$

2) Точка  $X$  находится на продольном стержне АВ,  $a \leq d \leq a + b$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-d)(l-a)^2}{4} - \frac{(l-d)^3}{12} + a(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) h}{3}}. \quad (20)$$

3) Точка  $X$  находится на продольном стержне АВ,  $0 \leq d \leq a$ .

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + \left( l - a - \frac{b}{2} \right) \left[ \frac{(l-d)^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} + (l-d)d \right] \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{(l-d) \left( l - a - \frac{b}{2} \right) h}{3}}. \quad (21)$$

4) Точка  $X$  находится на поперечном стержне BC:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + \left( l - a - \frac{b}{2} \right) \left[ \frac{l^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} \right] \right] + \frac{1}{E_2 J_2} \frac{l \left( l - a - \frac{b}{2} \right) h}{3}}. \quad (22)$$

5) Точка  $X$  находится на продольном стержне CD

$$C = \frac{1}{\frac{1}{E_1 J_1} \left[ \frac{(l-a-b)^3}{6} + \frac{(l-a)^3}{6} + (l-a-\frac{b}{2}) \left[ \frac{l^2}{2} - \frac{(l-a)^2}{2} \right] \right]} + \frac{1}{E_2 J_2} \left[ \frac{(l-d)(l-a-\frac{b}{2})h}{3} + \frac{(l-a-\frac{b}{2})hd}{2} \right], \quad (23)$$

где  $EJ$  – жесткость системы при изгибе;  $l$  – длина продольных стержней системы;  $h$  – длина поперечного стержня системы;  $a$  – расстояние до точки приложения нагрузки;  $b$  – длина действия распределенной нагрузки;  $d$  – расстояние до точки, в которой требуется посчитать частоту.

Используя формулы (15)–(23), можно вычислить жесткость в любой точке системы (рис.1), находящейся под действием различных нагрузок. Если действует система нескольких единичных сил и распределенных нагрузок, то необходимо посчитать перемещение точки от каждой нагрузки по отдельности и воспользоваться принципом суперпозиции, т.е. сложить все отдельные перемещения, а далее получить выражения для жесткости системы.

## Заключение

В статье представлен алгоритм расчета жесткостей гофров сильфона, находящегося под действием системы внешних сил, аналитическими методами. Он включает в себя следующие этапы: 1) определить реакции опор на внешнее воздействие; 2) построить грузовую эпюру; 3) приложить единичную силу в точку, где требуется определить жесткость, в направлении перемещения и построить эпюру момента от действия единичной силы; 4) составить интеграл Мора (4) и вычислить перемещения под действием внешней нагрузки; 5) вычислить жесткость системы в точке под действием заданной системы сил. Из полученных в данной статье формул следует, что жесткость гофров сильфона зависит от точки приложения и величины силы, параметров системы, а также непостоянна во всех точках системы. Из этих формул также следует, что мы можем эффективно регулировать жесткость гофров, изменяя их физико-механические свойства и геометрию.

Данный алгоритм может быть использован для расчета перемещений, жесткости и частоты собственных колебаний рассматриваемой системы (рис.1) с помощью ЭВМ, например в MATLAB.

## Литература

1. Кудрявцева И.М., Гвоздев С.С. Математическое моделирование чувствительных элементов приборов как их безопасное испытание. / Труды IV Международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека», Санкт – Петербург, 10 – 12 ноября 2004 г. / СПб: СПб ГУИТМО, 2004, с. 171–176.



# ДИНАМИКА СИЛЬФОНА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ

И.М. Кудрявцева

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

В статье представлена расчетная линейная модель сальффона. На примере сальффона 160-12-0,5 показано, что жесткость и частота собственных колебаний исследуемого элемента зависит от его линейных размеров, проанализирована его амплитудно-частотная характеристика и показана зависимость напряжения в элементе сальффона от соответствующих частот его колебаний. Отмечено, что регулирование линейными размерами и схемами нагружения определяет прочностные характеристики исследуемого элемента.

## Введение

Объектом исследования статьи являются статические и динамические характеристики гофров сальффионов. В предыдущих публикациях автора было построено аналитическое описание профилей изучаемых объектов с использованием эллиптических функций, установлена связь между параметрами эллиптических функций и геометрическими параметрами сальффионов различной формы [1], а также аналитическими методами была определена жесткость гофров сальффона, находящегося под действием системы внешних сил. Это позволяет перейти к описанию его динамики, в том числе и в резонансном режиме.

В статье выводится уравнение динамики сальффона при его малых колебаниях, строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) исследуемого элемента на примере однослойного сальффона 160-12-0,5 – 36НХТЮ, изготовленного по ГОСТ 21482-76, а также определяются напряжения изгиба при различных режимах его работы.

## Исследование статических характеристик элемента сальффона

Рассмотрим отдельно взятый элемент сальффона, имеющий заданные характеристики: длину  $l$ , ширину  $h$ , жесткости при изгибе  $E_1 J_1$ ,  $E_2 J_2$  и представим его в виде расчетной схемы, изображенной на рис.1.

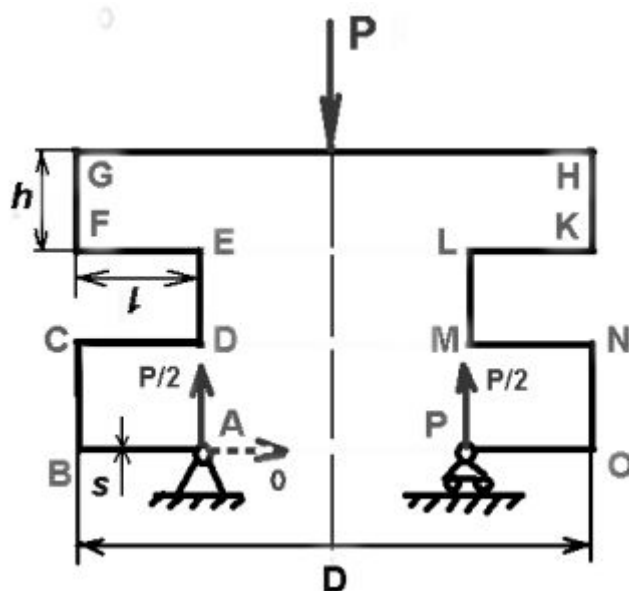


Рис.1. Расчетная схема элемента сальффона:  $D$  – наружный диаметр сальффона;  $h$  – половина шага гофров;  $l$  – длина гофра;  $s$  – толщина сальффона

Приложим к верхнему горизонтальному стержню ГН полученной конструкции единичную силу и с помощью интеграла Мора определим перемещение  $\Delta$  и жесткость  $C$  полученной конструкции в точке приложения силы под действием силы  $P$ :

$$\Delta = \frac{P}{E \cdot b \cdot s^3} (6l^3 + 6l^2h + D^3), \quad (1)$$

$$C = \frac{E \cdot b \cdot s^3}{6l^3 + 6l^2h + D^3}, \quad (2)$$

где  $D$  – наружный диаметр сальфона;  $h$  – половина шага гофров сальфона;  $l$  – длина гофра сальфона;  $s$  – толщина сальфона;  $P$  – внешняя сила;  $E$  – модуль Юнга;  $b=1$  – ширина сечения элементов конструкции.

Из формулы (2) видно, что жесткость элемента сальфона зависит от его геометрических параметров. Построим графики зависимости жесткости от вышеназванных параметров, взяв в качестве примера сальфон 160-12-0,5 – 36НХТЮ, изготовленный по ГОСТ 21482-76 (см. рис. 2–5).

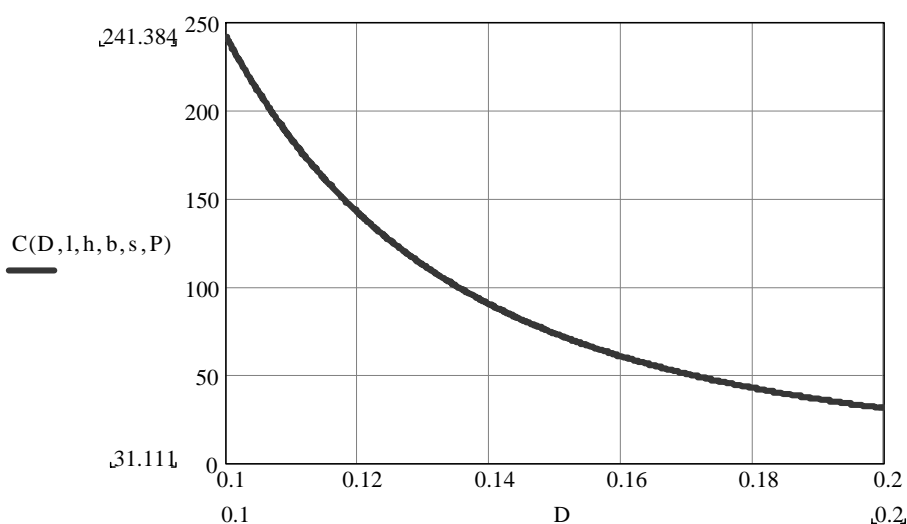


Рис. 2. Зависимость жесткости  $C$  от наружного диаметра  $D$ , где  $D$  изменяется в пределах от 100 до 200 мм

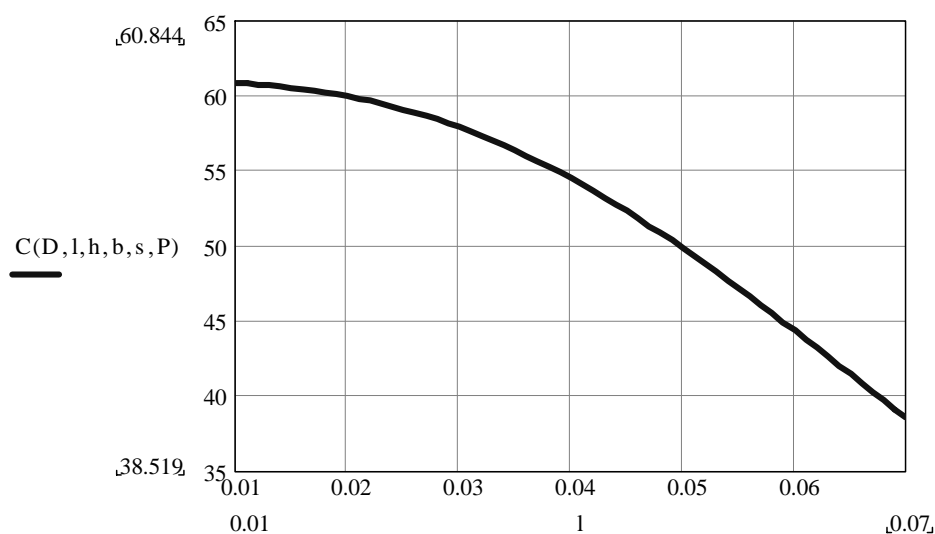


Рис. 3. Зависимость жесткости  $C$  от длины гофров  $l$ , где  $l$  изменяется в пределах от 10 до 70 мм

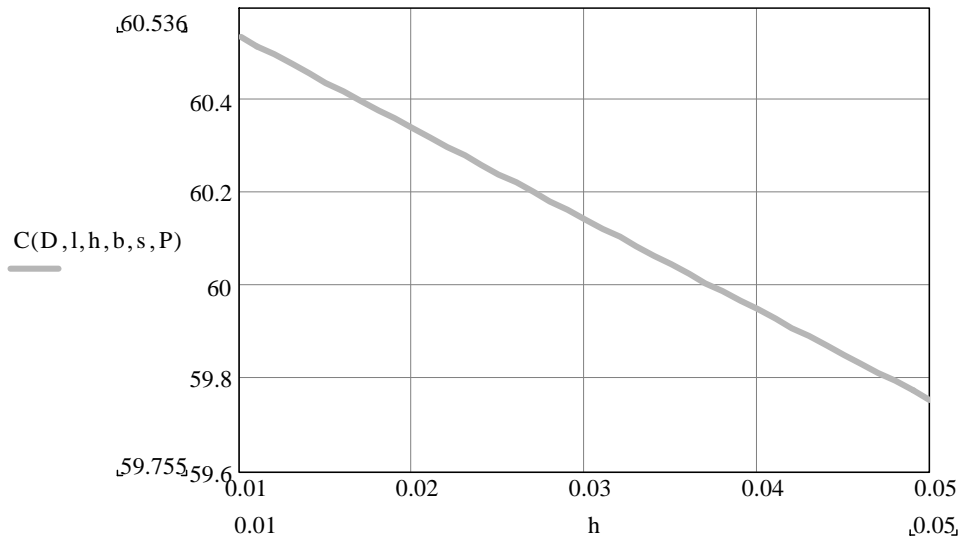


Рис. 4. Зависимость жесткости  $C$  от  $h$ , где  $h$  изменяется в пределах от 10 до 50 мм

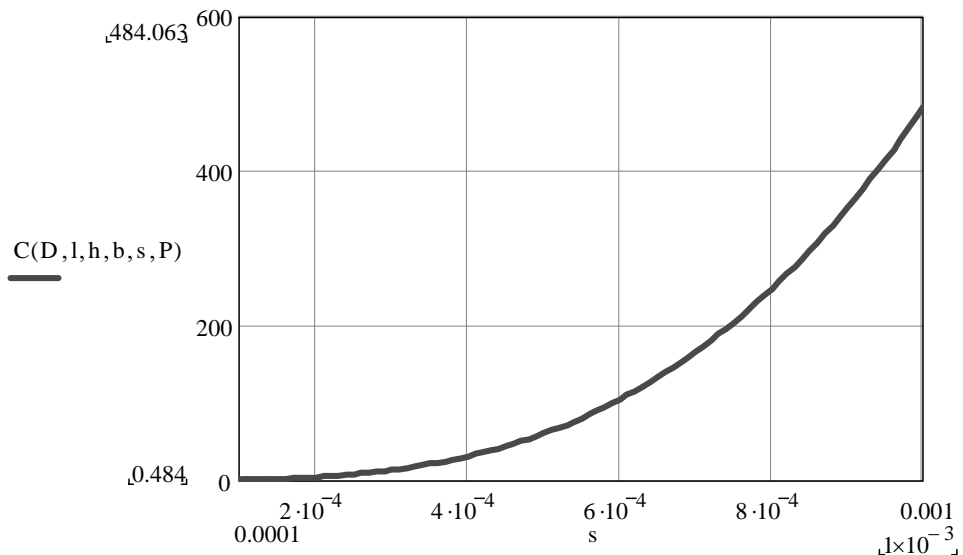


Рис. 5. Зависимость жесткости  $C$  от толщины сальфона  $s$ , где  $s$  изменяется в пределах от 0.1 до 1 мм

Из выражений (1) и (2) следует, что, меняя геометрические характеристики сальфонов, можно эффективно регулировать его жесткость. Так, если мы хотим повысить жесткость рассматриваемого нами сальфонного элемента, то мы можем либо увеличить его толщину  $s$ , либо уменьшить наружный диаметр  $D$ , длину гофров  $l$  и  $h$ .

### Исследование динамических характеристик элемента сальфона

Так как для упругой системы перемещение точки приложения силы прямо пропорционально силе, то дифференциальное уравнение малых колебаний элемента сальфона можно записать в виде

$$\ddot{\Delta} + p^2 \cdot \Delta = 0 \quad (3)$$

где  $\ddot{\Delta}$  – вторая производная по времени от перемещения  $\Delta$ , вычисленного нами ранее;  $p$  – частота собственных колебаний системы  $p^2 = \frac{C}{m}$ ;  $C$  – жесткость элемента сальфона;  $m$  – масса нагружения ( $P = m \cdot 9.8H$ ).

Проведем возбуждение исследуемого элемента гармонической силой.

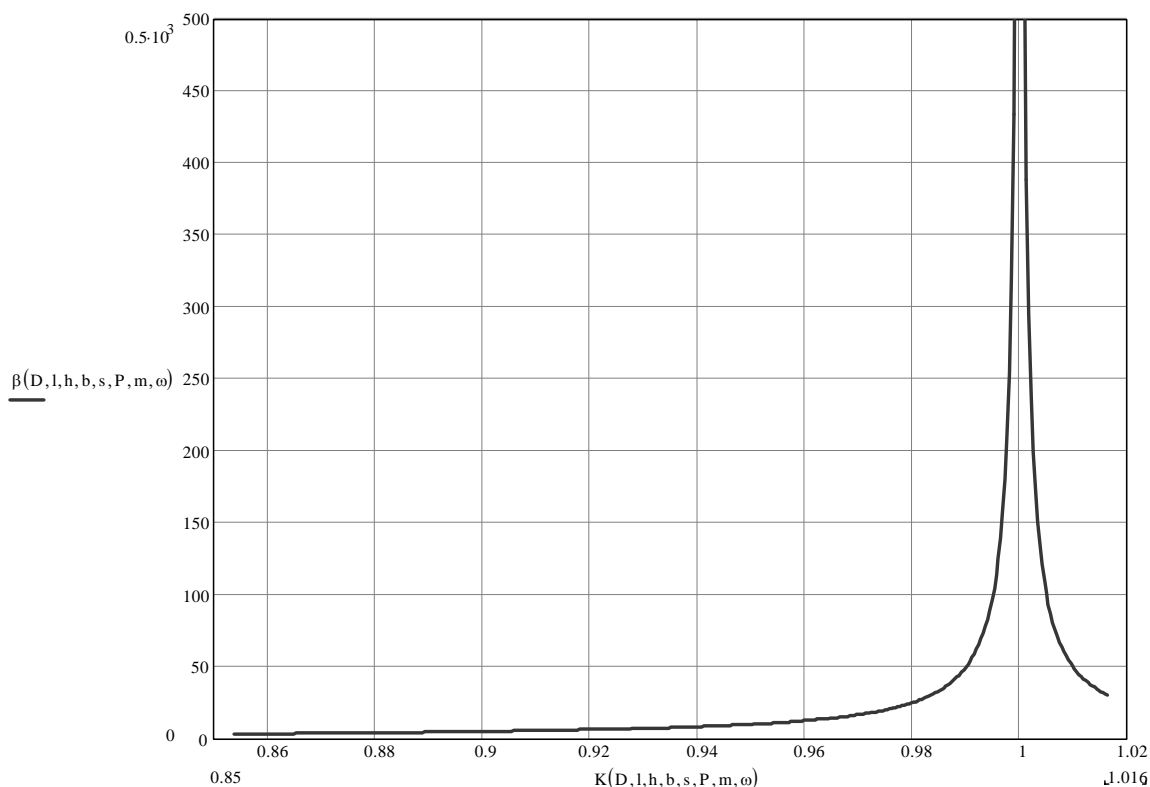


Рис. 6. АЧХ сиффона 160-12-0,5:  $\beta = \left| \left( 1 - \omega^2 / p^2 \right)^{-1} \right|$  – коэффициент усиления

колебаний;  $K = \frac{\omega}{p}$

Уравнение динамики сиффона примет форму

$$\ddot{\Delta} + p^2 \cdot \Delta = \frac{P_0}{m} \cos \omega t. \quad (4)$$

Построим АЧХ исследуемого сиффона, она имеет вид, представленный на рис. 6.

Определим динамические характеристики исследуемого сиффона в различных режимах (точках кривой рис. 6). Результаты вычислений можно представить в виде табл. 1.

| $K = \frac{\omega}{p}$ | $\omega, 1/\text{сек}^2$ | $P, \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}}{\text{сек}^2}$ | $\beta$            | $\Delta_{\text{дин}}, \text{м}$ | $\sigma_{\text{дин}}, \frac{\text{кг}^2 \cdot \text{м}}{\text{сек}^2}$ |
|------------------------|--------------------------|--|--------------------|---------------------------------|--|
| 1                      | 24,598                   | $3,47 \cdot 10^4$                                    | $3,541 \cdot 10^4$ | 585,216                         | $-2,707 \cdot 10^{13}$   |
| 0,99                   | 24,352                   | 49,174   | 50,177             | 0,829                           | $-3,8 \cdot 10^{10}$   |
| 0,96                   | 23,614                   | 12,495   | 12,750             | 0,211                           | $-9,7 \cdot 10^9$  |
| 0,9                    | 22,139                   | 5,159  | 5,264              | 0,087                           | $-4,0 \cdot 10^9$  |
| 0,86                   | 21,155                   | 3,764  | 3,841              | 0,063                           | $-2,936 \cdot 10^9$  |
| 0,5                    | 12,299                   | 1,307  | 1,333              | 0,022                           | $-1,019 \cdot 10^9$  |
| 0,01                   | 0,246                    | 0,98   | 1                  | 0,017                           | $-7,6 \cdot 10^8$  |

Таблица 1. Динамические характеристики исследуемого сиффона в различных режимах

Если внимательно посмотреть на значения перемещения  $\Delta_{дин}$  точки приложения силы при резонансе ( $K=1$ ), то можно заметить, что оно существенно превышает допустимое, поэтому в таком режиме конструкция разрушается.

Так как жесткость элемента сильфона зависит от его геометрических параметров и эта зависимость была выявлена и математически описана уравнением (2), а от жесткости непосредственно зависит частота собственных колебаний, то теперь представляется возможным исследовать и динамические характеристики сильфонов, а также проектировать элементы с заранее известными характеристиками.

## **Заключение**

В статье были исследованы статические и динамические характеристики расчетной схемы сильфона (рис. 1) на примере сильфона 160-12-0.5 – 36НХТЮ, изготовленного по ГОСТ 21482-76. В результате были получены зависимости жесткости исследуемой конструкции от различных геометрических параметров сильфона, графически представленные на рис. 2–5. На графиках явно видно, что, меняя геометрические характеристики сильфонов, можно эффективно регулировать его жесткость, а, следовательно, и динамику.

Также в данной статье была построена амплитудно-частотная характеристика исследуемого элемента при массе нагружения 100 г. и исследованы его динамические характеристики в различных точках полученной кривой. Результаты исследования представлены в табл. 1, где строке при  $K=1$  соответствует резонанс, а при  $K=0,01$  имеем характеристики режима статического нагружения.

Так как формулы, полученные методами сопротивления материалов, не учитывают многих особенностей реальных объектов, то они могут быть эффективно использованы для расчета исследуемых элементов на стадии их проектирования.

## **Литература**

1. Кудрявцева И.М., Гвоздев С.С. Математическое моделирование чувствительных элементов приборов как их безопасное испытание. / Труды IV Международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека», Санкт – Петербург, 10–12 ноября 2004 г. / СПб: СПб ГУИТМО, 2004, с. 171 – 176.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

П.А. Борисов

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.С. Томасов

Приводится система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергетических подсистемах на базе неуправляемых выпрямителей. Получены диаграммы зависимости электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей от основных параметров схем.

## Введение

Оптимизация энергетических подсистем заключается в комплексном решении задач улучшения их массогабаритных показателей, повышения качества потребляемой ими электроэнергии и улучшения тем самым их энергетических показателей. Все эти задачи напрямую связаны с вопросами определения составляющих полной мощности энергетических подсистем, которые решены не в полной мере на сегодняшний день. Итогом указанного состояния дел с вопросами теории энергетических процессов в вентильных преобразователях стала ситуация, когда устройство преобразования электрической энергии не может быть непосредственно охарактеризовано энергетическими соотношениями общего вида, что обычно необходимо на этапе проектирования, а должно быть подвергнуто трудоемкому расчету во временной или частотной областях [1].

В теории мощности в цепях с несовпадающими формами напряжения и тока выделяются два направления: спектральное (рядов Фурье) и интегральное. Определение составляющих полной мощности на основе разложения на гармоники является сложной и трудоемкой операцией [1]. Однако требования международных стандартов IEC 61000-3, IEEE 519, EN 61000-3-2 жестко регламентируют уровень гармонических составляющих тока вплоть до 49 гармоники. Таким образом, перспективность использования метода гармонического анализа очевидна и этот метод взят, совместно с операторным методом, за базу методики исследований, основные положения которой разработаны в публикации [2].

Решение вопроса об оптимальном выборе структуры и параметров энергоподсистемы должно производиться в зависимости от требований, предъявляемых к системе в целом с учетом типа первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, реализуется по классической структуре: сеть переменного тока – выпрямитель – силовой фильтр (СФ) – нагрузка. В статье рассмотрены энергетические подсистемы на базе мостовых неуправляемых выпрямителей (НУВ) с емкостными и индуктивно-емкостными фильтрами, которые чаще всего используются в современных электротехнических комплексах и системах с полупроводниковыми преобразователями. Получена система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистемах на базе НУВ, приводятся зависимости электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей от основных параметров схем. Достоверность результатов подтверждена сравнением найденных зависимостей с результатами, полученными на имитационных моделях в пакете MATLAB/Simulink, а также с данными из литературы по выпрямителям.

## Методика исследований

Структуры исследуемых энергетических подсистем, питающихся от сети переменного тока, приведены на (рис. 1). При исследовании полагаются следующие типо-

вые допущения: питающая сеть бесконечной мощности, реактивные элементы являются линейными, время коммутации вентилях пренебрежимо мало. Для универсальности вводятся базовые величины: за базовое напряжение  $E_B$  принимается амплитуда э.д.с. источника для однофазных схем выпрямления и амплитуда линейной э.д.с. для трехфазных схем выпрямления, за базовый принят ток короткого замыкания цепи источника  $I_B = E_B / Z$ , где  $Z$  – полное сопротивление цепи источника.

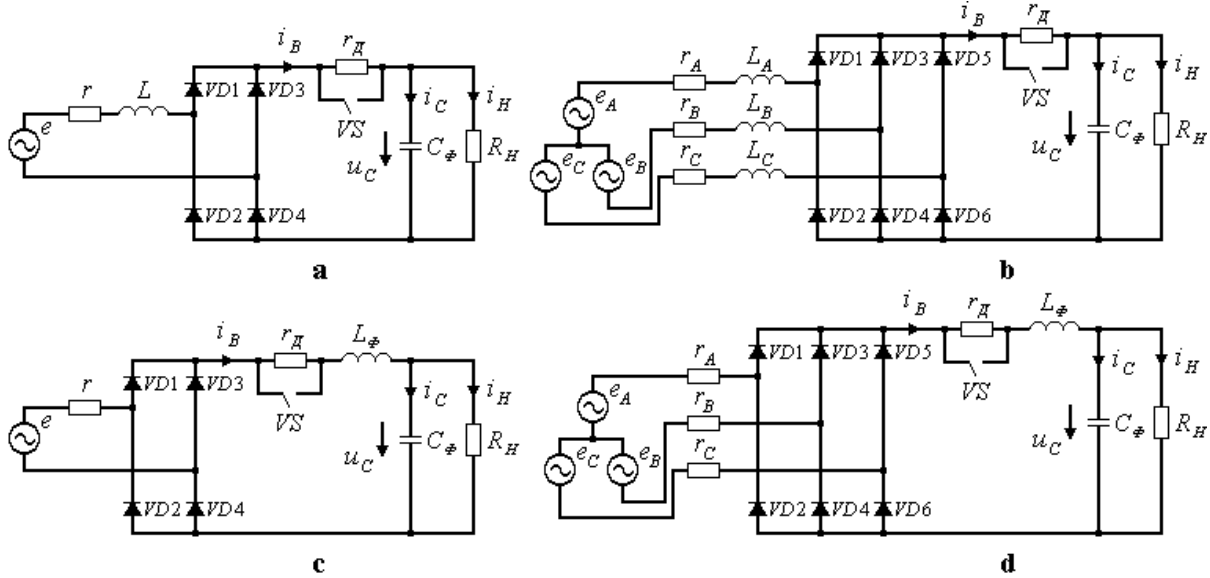


Рис. 1. Структуры энергоподсистем: сеть переменного тока – неуправляемый выпрямитель - (необязательный элемент: цепь запуска) – силовой фильтр – нагрузка

Передаточная функция, связывающая напряжение на конденсаторе СФ с входной э.д.с., имеет вид:

$$H(p) = \frac{u_C(p)}{e_H(p)} = \frac{1}{a_0 p^2 + a_1 p + a_2} = \frac{1}{\tau_{L/r} \tau_{rC} p^2 + (\bar{r} \tau_{L/r} + \tau_{rC}) p + (\bar{r} + 1)}, \quad (1)$$

где  $\bar{r} = (r + r_D) / R_H$ ,  $\tau_{rC} = (r + r_D) C_\phi = \bar{r} \tau_{CR}$ ,  $\tau_{CR} = C_\phi R_H$ , для схем (рис. 1а, б)  $\tau_{L/r} = L / (r + r_D)$ , для схем (рис. 1с, д)  $\tau_{L/r} = L_\phi / (r + r_D)$ . В трехфазных схемах резистивное сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$  определяются соответственно алгебраическими суммами резистивных сопротивлений и индуктивностей проводящих фаз. В случае активно-емкостной нагрузки ( $L = 0$ ):

$$H(p) = \frac{u_C(p)}{e_H(p)} = \frac{1}{\tau_{rC} p + (\bar{r} + 1)}. \quad (2)$$

Рассмотрим включение энергоподсистемы в питающую однофазную сеть с начальной фазой  $\psi_H$  э.д.с. источника, изменяющегося по гармоническому закону:

$$\bar{e}_H(\bar{t}) = \sin(\bar{t} + \psi_H) = \cos \psi_H \sin \bar{t} + \sin \psi_H \cos \bar{t}. \quad (3)$$

Напряжение на конденсаторе СФ при открытых диодах схемы возрастает согласно:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{C3}(\bar{t}) = & \bar{U}_{C\text{const}} + \bar{U}_{C\text{sin}} \sin(\bar{t}) + \bar{U}_{C\text{cos}} \cos(\bar{t}) + \\ & + [\bar{U}_{C\text{expC}} \cos(\sigma \bar{t}) + \bar{U}_{C\text{expS}} \sin(\sigma \bar{t})] \exp(-\bar{t}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\bar{t} = \omega_H t$  – относительное время,  $\omega_H = 2\pi f_H$  – угловая частота э.д.с. источника,  $\bar{\omega} = \bar{a}_1 / 2\bar{a}_0$ ,  $\sigma = \sqrt{4\bar{a}_0 \bar{a}_2 - \bar{a}_1^2} / \bar{a}_1$ ,  $\bar{a}_0 = \omega_H^2 a_0$ ,  $\bar{a}_1 = \omega_H a_1$ ,  $\bar{a}_2 = a_2$  – приведенные коэффициенты из (1). Амплитуды постоянной, принужденных и свободных составляющих напряжения на конденсаторе СФ на первом интервале заряда определяются согласно:

$$\overline{U}_{C_{const}} = \overline{u}_C(0), \quad (5.1)$$

$$\overline{U}_{C_{\sin}} = (A_2 - A_0) \cos \psi_H + A_1 \sin \psi_H, \quad (5.2)$$

$$\overline{U}_{C_{\cos}} = -A_1 \cos \psi_H + (A_2 - A_0) \sin \psi_H, \quad (5.3)$$

$$\overline{U}_{C_{\exp C}} = A_1 \cos \psi_H - (A_2 - A_0) \sin \psi_H, \quad (5.4)$$

$$\overline{U}_{C_{\exp S}} = \frac{(A_1 + 2 \frac{A_0^2}{A_1} - 2 \frac{A_0 A_2}{A_1}) \cos \psi_H - (A_2 + A_0) \sin \psi_H}{\sigma}, \quad (5.5)$$

где  $A_0 = K \overline{a}_0$ ,  $A_1 = K \overline{a}_1$ ,  $A_2 = K \overline{a}_2$  и  $K = 1/[(\overline{a}_2 - \overline{a}_0)^2 + \overline{a}_1^2]$ .

По известному закону изменения напряжения на конденсаторе СФ  $\overline{u}_C(\overline{t})$  устанавливаются токи в нагрузке  $\overline{i}_H(\overline{t})$  и через конденсатор СФ  $\overline{i}_C(\overline{t})$ , далее выпрямленный ток  $\overline{i}_B(\overline{t})$ . В режиме непрерывных токов, который характерен для схем (рис. 1с, d), выпрямленный ток не прерывается, что используется при исследовании этого режима. В режиме прерывистых токов, который характерен для схемы (рис. 1а, b), угол выключения  $\beta$  группы диодов при пуске, так и на других интервалах заряда определяется из условия:

$$\overline{i}_B(\beta) = 0 \quad (6)$$

После выключения диодов схемы напряжение на конденсаторе СФ спадает экспоненциально:

$$\overline{u}_{CP}(\overline{t}) = \overline{u}_{C3}(\beta) \exp(-\overline{rt}/\overline{\tau}_{rC}), \quad (7)$$

при этом отсчет времени  $\overline{t}$  удобно начать заново от угла  $\beta$ . Когда напряжение на конденсаторе СФ сравняется с выпрямленной э.д.с.:

$$\overline{u}_{CP}(\alpha) = \sin \alpha, \quad (8)$$

включатся диоды и начнется заряд конденсатора СФ под воздействием напряжения:

$$\overline{u}_H(\overline{t}) = (1 - \sin \alpha) \sin\{(1 + \frac{2\alpha}{\pi - 2\alpha})\overline{t}\} = (1 - \sin \alpha) \sin \vartheta \overline{t}, \quad (9)$$

при этом отсчет  $\overline{t}$  также удобно начать заново от угла  $\alpha$ . Напряжение на конденсаторе СФ возрастает согласно (4), однако приведение коэффициентов осуществляется уже к частоте  $\vartheta \omega_H$ . Амплитуды постоянной, принужденных и свободных составляющих напряжения на конденсаторе СФ определяются согласно:

$$\overline{U}_{C_{const}} = \sin \alpha, \quad (10.1)$$

$$\overline{U}_{C_{\sin}} = (A_2 - A_0)(1 - \sin \alpha), \quad (10.2)$$

$$\overline{U}_{C_{\cos}} = -A_1(1 - \sin \alpha), \quad (10.3)$$

$$\overline{U}_{C_{\exp S}} = (1 - \sin \alpha)(A_1 + 2 \frac{A_0^2}{A_1} - 2 \frac{A_0 A_2}{A_1}) / \sigma, \quad (10.4)$$

$$\overline{U}_{C_{\exp C}} = A_1(1 - \sin \alpha). \quad (10.5)$$

В дальнейшем зарядно-разрядные процессы протекают в соответствии с (4) и (7), углы  $\beta$  и  $\alpha$  определяются соответственно из (6) и (8).

Для энергоподсистемы, питающейся от трехфазной сети переменного тока, выражение для напряжения на конденсаторе СФ может быть получено с учетом того, что эквивалентное э.д.с. источника в этом случае изменяется согласно:

$$e_H(t) = \max\{e_A(t), e_B(t), e_C(t)\} - \min\{e_A(t), e_B(t), e_C(t)\} \quad (11)$$



Спектральный состав возмущения  $\bar{f}(\bar{t})$ , составляющими которого являются постоянная, принужденные и свободные, определяется с использованием преобразований Фурье и Эйлера. Необходимая система выражений приведена в статье [2]. Расчет действующего значения сетевого тока, установленных мощностей и составляющих полной мощности для всех рассмотренных случаев производится по спектральному составу выпрямленного тока. Определив полную мощность энергоподсистемы  $S$  и ее составляющие  $P$  – активную мощность,  $Q$  – реактивную или мощность сдвига,  $T$  – мощность искажения, можно определить основные показатели качества энергопотребления [1]:  $K_{\text{МОЩНОСТИ}} = P/S$  – коэффициент мощности,  $K_{\text{СДВИГА}} = P/\sqrt{P^2 + Q^2}$  – коэффициент

сдвига,  $K_{\text{ИСКАЖЕНИЯ}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}}$  – коэффициент искажения,

$K_{\text{ГАРМОНИК}} = T/\sqrt{P^2 + Q^2}$  – коэффициент гармоник или  $K_{\text{THD}}$  (Total Harmonic Distortion).

### Результаты исследований, их верификация и выводы

На базе полученной системы выражений были произведены расчеты в пакете MathCad, при этом спектр выпрямленного тока ограничивался гармониками по 49 включительно (согласно стандарту IEEE 519). По результатам расчетов получены зависимости электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей для широкого диапазона изменения параметров схем, некоторые из которых представлены на рис. 2-5.

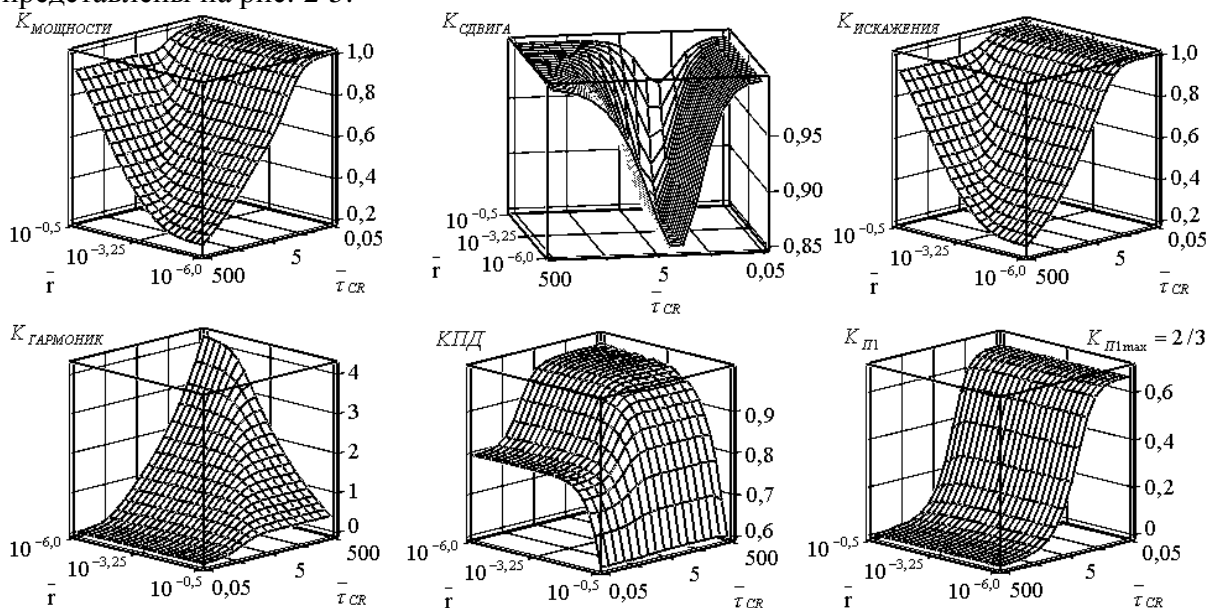


Рис. 2. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы однофазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой: коэффициента мощности, коэффициента сдвига, коэффициента искажения, коэффициента гармоник, К.П.Д., коэффициента пульсаций выходного напряжения по 1-й гармонике в квазиустановившемся режиме работы

В публикациях [3–4] предложены модели, разработанные в пакете MATLAB/Simulink, измерителей составляющих полной мощности энергоподсистем, в основу которых заложен классический интегральный метод определения составляющих полной мощности, и вычислитель показателей качества энергопотребления. Сравнение найденных зависимостей с результатами, полученными на имитационных моделях энергоподсистем в пакете MATLAB/Simulink с применением разработанных измерительных схем, подтвердило их достоверность. При этом относительная погрешность в

значительной степени определялась: 1) выбранным в пакете MATLAB/Simulink численным методом расчета, 2) выбранным шагом интегрирования. Для различных методов расчета и шаге интегрирования  $\Delta h = \{\pi - p(\alpha - \beta)\} / N\omega_H$  (при  $N \geq 500$ ) относительная погрешность не превышала 4%.

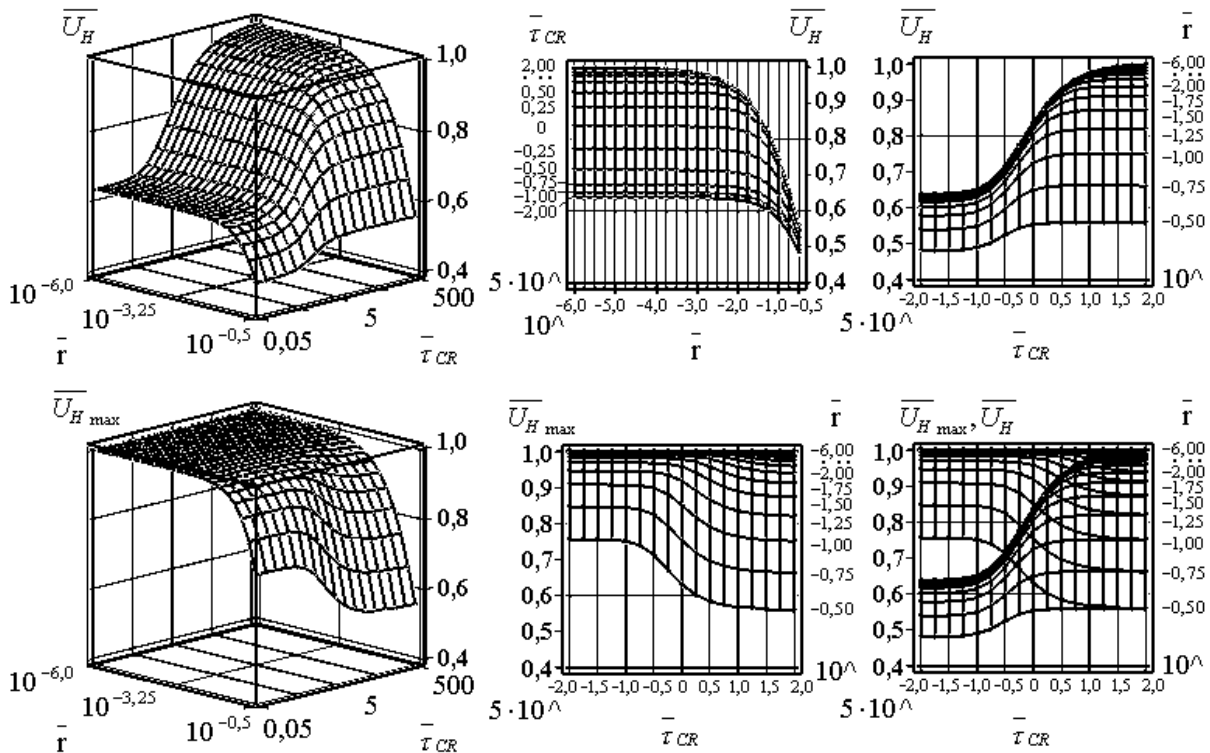


Рис. 3. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы однофазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой: среднего и максимального напряжения на нагрузке (конденсаторе СФ) в квазиустановившемся режиме работы

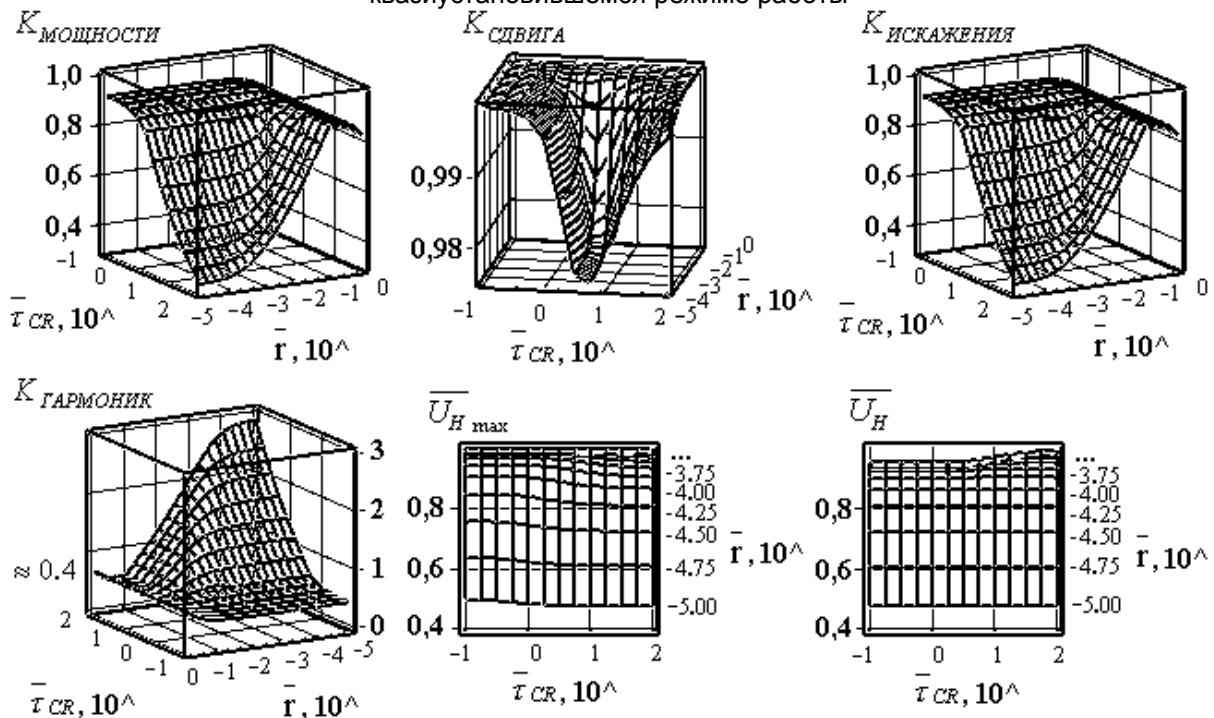


Рис. 4. Диаграммы зависимостей от основных параметров схемы трехфазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой: коэффициента мощности, коэффициента сдвига, коэффициента искажения, коэффициента гармоник, среднего и максимального напряжения на нагрузке (конденсаторе СФ) в квазиустановившемся режиме работы

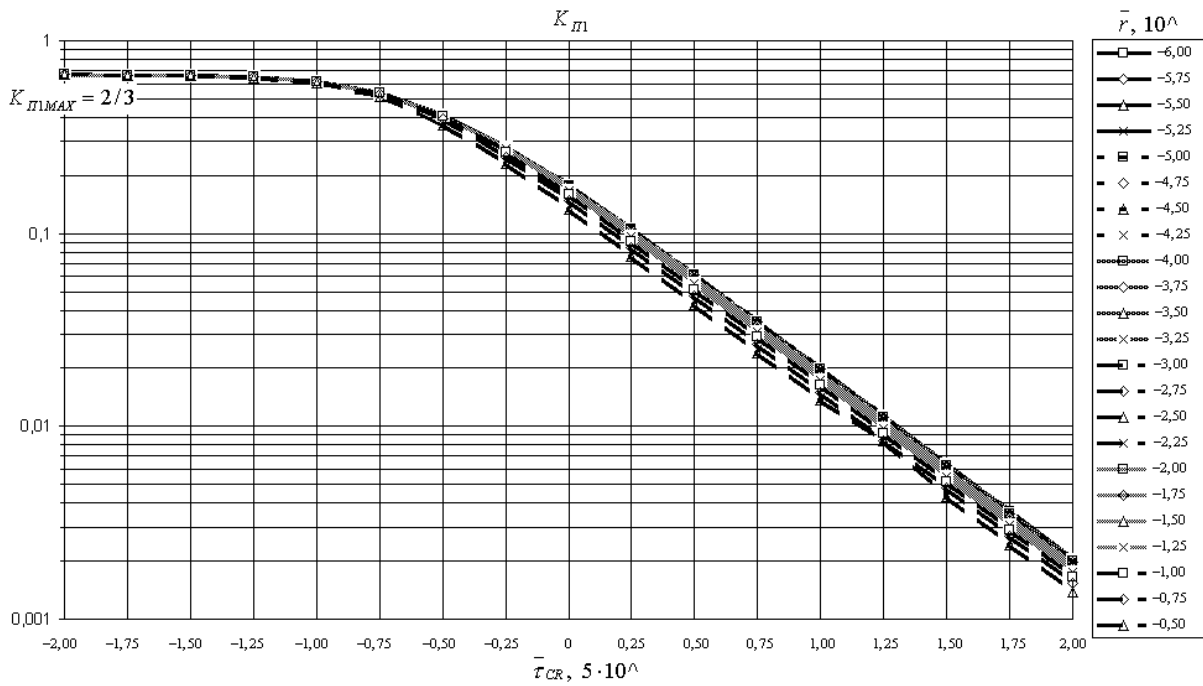


Рис. 5. Диаграмма зависимости  $K_{PI}$  от основных параметров схемы однофазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой

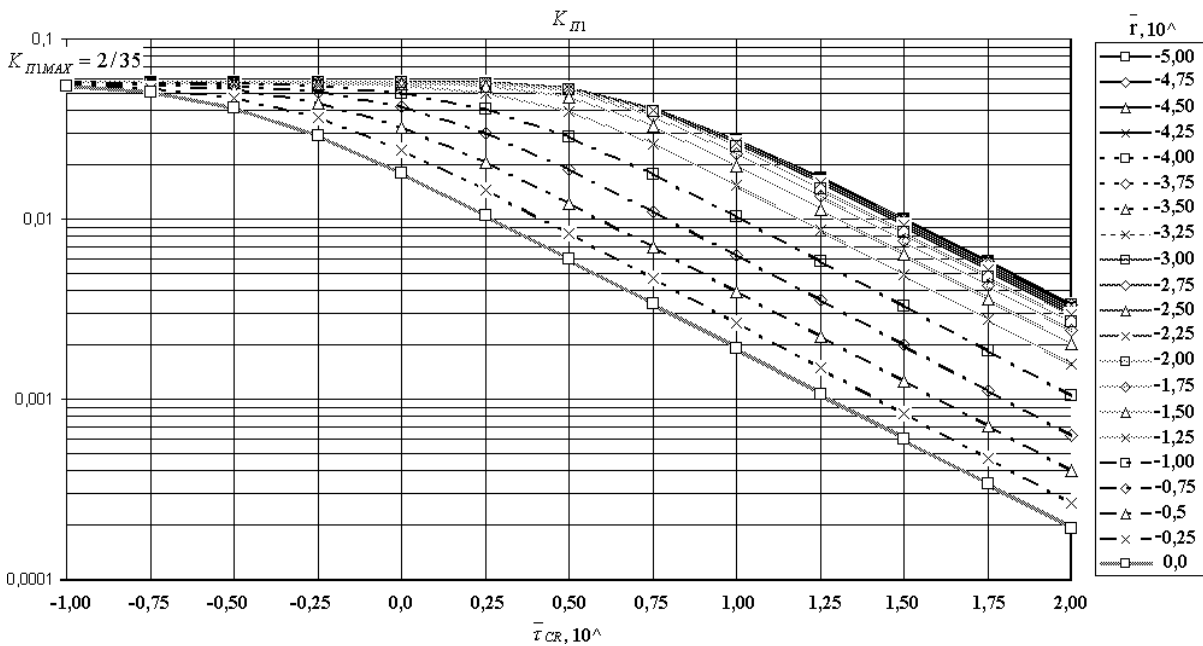


Рис. 6. Диаграмма зависимости  $K_{PI}$  от основных параметров схемы трехфазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой

Достоверность результатов подтверждена также сравнением найденных зависимостей с данными из литературы по выпрямителям, так диаграмма (рис. 3) зависимости среднего напряжения на нагрузке (конденсаторе СФ) от параметров схемы однофазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой приведена в литературе [5]. Однако, несмотря на большое количество публикаций по выпрямителям, многие из полученных диаграмм в литературе не встречаются.

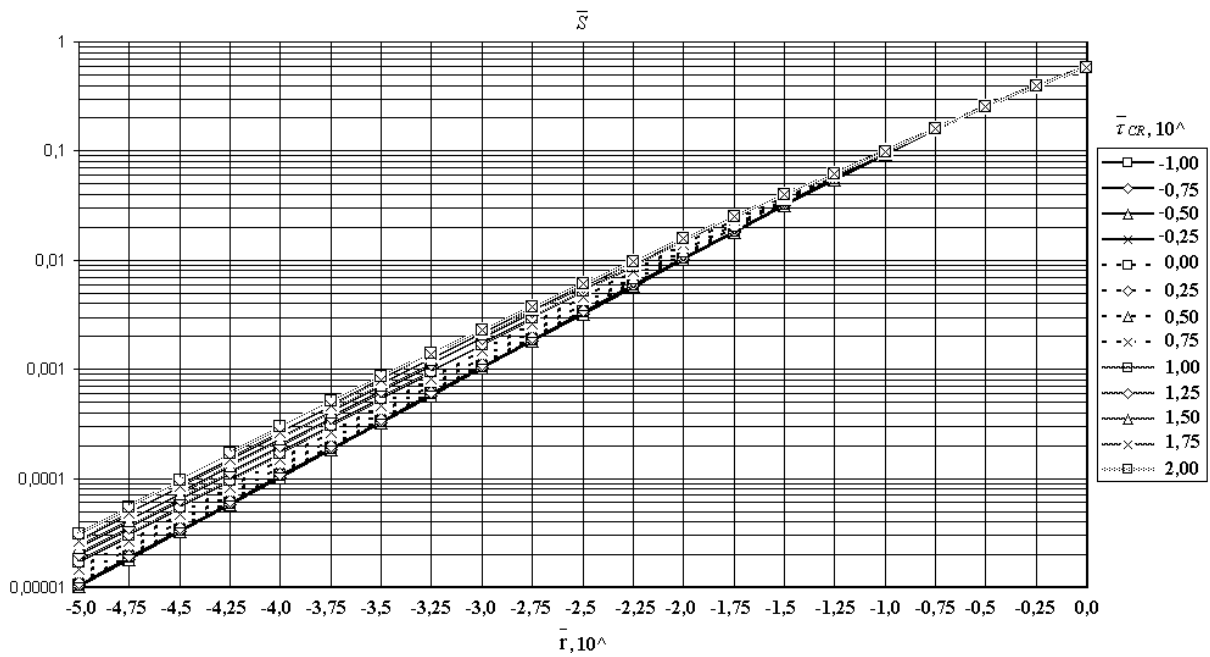


Рис. 7. Диаграмма зависимости полной мощности от основных параметров схемы трехфазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой

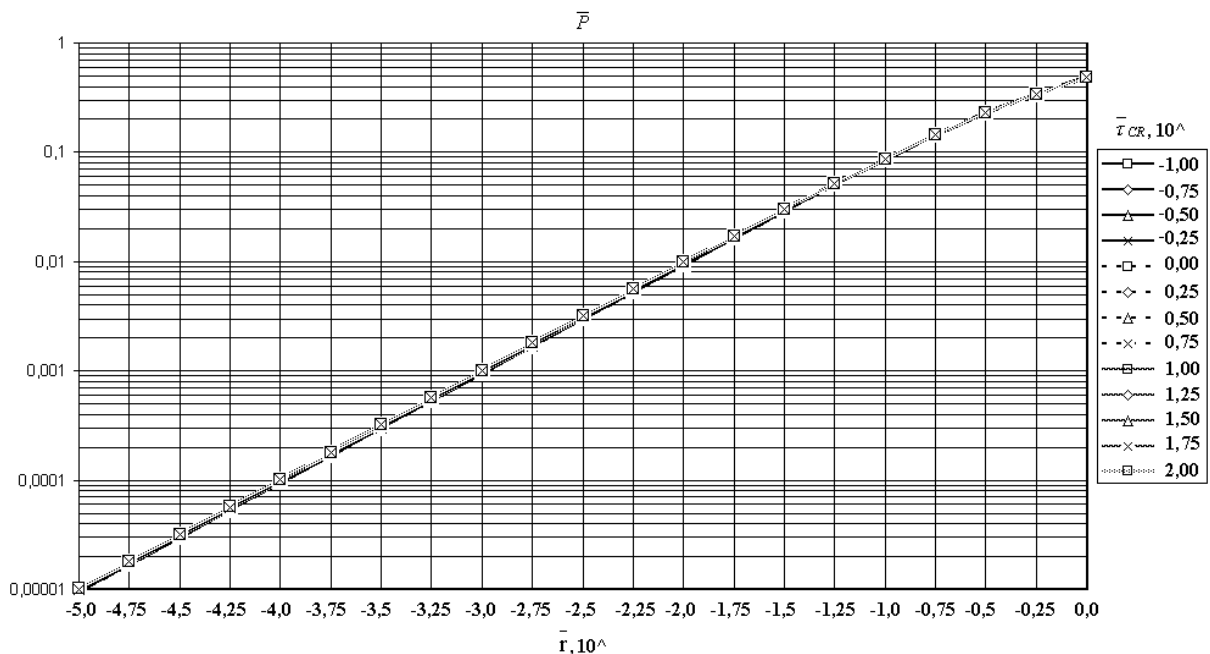


Рис. 8. Диаграмма зависимости активной мощности от основных параметров схемы трехфазного НУВ с активно-емкостной нагрузкой

На рис. 5–6 приведены диаграммы зависимости коэффициента пульсаций выходного напряжения по 1-й гармонике  $K_{П1}$  от параметров схем, из которых видно, что величина  $K_{П1}$  практически не зависит от  $\bar{r}$ , при  $\bar{r} \leq 0,01$ . Обычно это условие обеспечивается, так как определяет высокий КПД системы. Требуемый  $K_{П1}$  обеспечивается соответствующим выбором  $\bar{\tau}_{CR}$ , т.е. выбором емкости конденсатора СФ при заданном  $R_H$ . Величина  $\bar{r}$  определяет существенным образом значение полной мощности энергоподсистемы  $\bar{S}$  (рис. 7) и полностью определяет величину ее активной составляющей  $\bar{P}$  (рис. 8). В выбранной системе единиц полная мощность и ее активная составляющая изменяются практически линейно и пропорционально  $\bar{r}$ .

Мощность сдвига  $\bar{Q}$  достигает экстремальных значения в области  $\bar{\tau}_{CR} = 10^{0,50} \div 10^{0,75}$ , как видно по  $K_{СДВИГА}$  (рис. 2 и 4), при этом величина  $K_{П1}$  не удовлетворительна. Для достижения приемлемого  $K_{П1}$  идут по пути увеличения емкости конденсатора СФ. При этом увеличивается неактивная составляющая полной мощности в основном за счет мощности искажения  $\bar{T}$ , судя по  $K_{ГАРМОНИК}$  (рис. 2 и 4), мощность сдвига вносит незначительный вклад при удовлетворительных  $K_{П1}$ . Применение LC-фильтра позволяет достичь лучших энергетических показателей при обеспечении требуемого  $K_{П1}$ , так как выпрямитель равномерно в течение периода потребляет энергию первичного источника питания, что приводит к улучшению гармонического состава сетевого тока и снижению неактивных мощностей.

## Заключение

Решение задач оптимизации напрямую связано с вопросами определения составляющих полной мощности энергетических подсистем. В статье получена система выражений для анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергоподсистемах на базе НУВ, приводятся зависимости электромагнитных нагрузок, установленных мощностей и энергетических показателей от основных параметров схем. Предложенная методика исследований и найденные зависимости позволяют решать вопросы параметрической оптимизации энергетических подсистем электротехнических устройств на базе НУВ. Оптимальный выбор параметров элементов, при обеспечении требуемых характеристик системы, позволяет снизить габариты и массу всего оборудования энергоподсистемы.

## Литература

1. Зиновьев Г.С. Прямые методы расчета энергетических показателей вентильных преобразователей. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 220 с.
2. Борисов П.А. Методика расчета и проектирования энергоподсистем электротехнических комплексов с РС-нагрузкой. / Сборник I конференции молодых ученых и специалистов СПб ГУ ИТМО. 2004. Т. 2. с. 139 - 148.
3. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 40–44.
4. Борисов П.А. Применение MATLAB/Simulink для измерения и оценки качества электроэнергии в трехфазных симметричных системах с активными преобразователями. // Труды II-й Всероссийской научной конференции. Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. Москва. 2004. С. 1372–1387.
5. Справочник по полупроводниковой электронике. / Под редакцией Ллойда П. Хантера, проф. Рочестерского университета (Рочестер, Нью-Йорк, США). Сокр. перевод с англ. Под ред. д.т.н. Шаца С.Я., к.т.н. Литвинова И.И. М.: Машиностроение, 1975.

# НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ РОТОРА В СИСТЕМЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Д.В. Лукичев

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев

В статье рассматривается возможность построения наблюдателя магнитного потока асинхронного короткозамкнутого двигателя на основе искусственной нейронной сети. Исследуется поведение наблюдателя, реализованного традиционным способом на DSP-контроллере, а также нейросетевого наблюдателя в условиях вариации активного сопротивления ротора асинхронного двигателя.

## Введение

Как известно, при проектировании алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем (АД), существует необходимость в получении информации о векторе потокосцепления ротора [5]. Поскольку прямое измерение потокосцепления в машине труднодоступно, а его реализация экономически невыгодна, то обычно на практике используют наблюдатели магнитного потока АД, которые должны обеспечить асимптотическую оценку этой переменной. Следует отметить, что достоверность работы таких наблюдателей зависит от точности определения параметров асинхронного двигателя. Вследствие нагрева машины изменяются активные сопротивления статора и ротора, что приводит к возникновению ошибок оценивания магнитного потока, а это в свою очередь сказывается на снижении энергетической эффективности процесса преобразования энергии и даже потери устойчивости. Исследование семейства наблюдателей магнитного потока АД приводится в работе [2]

В последнее время появилось много публикаций, в которых рассматривается использование искусственных нейронных сетей (ИНС) в различных областях техники, в том числе и в системах управления электротехническим оборудованием. Не последнюю роль в распространении ИНС сыграло то, что искусственная нейронная сеть, благодаря присущей ей параллельной обработке информации, позволяет в несколько раз уменьшить время вычисления по сравнению с традиционно применяющимися для этих целей *DSP (digital-signal-processor)*-процессорами [7]. Также несомненным положительным свойством искусственных нейронных сетей является низкая чувствительность к изменению параметров, что значительно повышает устойчивость работы [4].

В данной работе исследуется поведение наблюдателя, построенного на основе искусственной нейронной сети, а также наблюдателя, реализованного традиционным способом на *DSP*-контроллере, в условиях вариации активного сопротивления ротора асинхронного двигателя.

## 1. Модель наблюдателя потокосцепления ротора

Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя в стационарной системе координат  $(\alpha-\beta)$  имеет вид [6]:

$$\begin{aligned} \underline{u}_1 &= R_1 \underline{i}_1 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt}, \\ 0 &= R_2 \underline{i}_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} - j\omega \underline{\psi}_2, \\ \underline{\psi}_1 &= L_1 \underline{i}_1 + L_m \underline{i}_2, \\ \underline{\psi}_2 &= L_m \underline{i}_1 + L_2 \underline{i}_2, \\ \underline{m} &= \frac{3}{2} z(\underline{\psi}_1 \times \underline{i}_1). \end{aligned} \tag{1.1}$$

В (1.1)  $R$  – активное сопротивление,  $\underline{\psi}$  – потокосцепление,  $L$  – индуктивность,  $m$  – электромагнитный момент АД. Индексом «1» отмечены все величины, относящиеся к статору, а индексом «2» – к ротору. Индексом « $m$ » отмечена взаимная индуктивность статора и ротора. Частота вращения ротора АД с одной парой полюсов  $\omega = \omega_1 - \omega_2 = z\Omega$ , где  $z$  – число пар полюсов двигателя,  $\Omega$  – угловая скорость ротора.

В соответствии с данной системой уравнений существует несколько способов идентификации потокосцепления ротора  $\underline{\psi}_2$ , которые определяются конкретным набором переменных, используемых при вычислении. Самым распространенным и наиболее часто используемым на практике способом вычисления  $\underline{\psi}_2$  является способ, при котором используется информация о двух или трех токах статора и скорости вращения ротора [1]. Все эти сигналы обычно являются сигналами обратных связей системы автоматического регулирования (САР).

Выразив из четвертого уравнения системы (1.1) ток  $i_2$  и подставив его во второе уравнение, а затем переходя к изображениям, получим

$$i_1 L_m = \underline{\psi}_2 (1 + pT_2) - j\omega T_2 \underline{\psi}_2, \quad (1.2)$$

где  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$  – постоянная времени обмоток ротора. Раскладывая векторы тока статора

и потокосцепления ротора на вещественную и мнимую составляющие, получим выражения для проекций потокосцепления в неподвижной системе координат

$$\begin{aligned} \psi_{2\alpha} &= \frac{i_{1\alpha} L_m - \psi_{2\beta} \omega T_2}{1 + pT_2}; \\ \psi_{2\beta} &= \frac{i_{1\beta} L_m + \psi_{2\alpha} \omega T_2}{1 + pT_2}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Модуль вектора потокосцепления ротора находится по теореме Пифагора

$$|\underline{\psi}_2| = \psi_{2d} = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2}. \quad (1.4)$$

Тригонометрические функции, необходимые для перехода от вращающейся системы координат в неподвижную и наоборот, могут быть найдены как

$$\sin(\theta) = \frac{\psi_{2\beta}}{|\underline{\psi}_2|}, \quad \cos(\theta) = \frac{\psi_{2\alpha}}{|\underline{\psi}_2|}. \quad (1.5)$$

Принцип построения автономного устройства управления (блок УУ) заключается в создании двух каналов ( $\psi_{2d}$  и  $\omega_2$ ) с передаточными функциями обратными по отношению к передаточным функциям АД. В реальном приводе между выходом устройства управления и статором АД должен быть включен какой-либо усилитель мощности (УМ), имеющий единичную передаточную функцию в зоне отсутствия ограничения тока. Для поставленной цели исследования УМ можно считать идеальным безинерционным звеном. Простейшая система векторного управления типа *TRANSVEKTOR* с ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора для обобщенной двухфазной машины приведена на рис. 1.1 [5].

Представленный на данном рисунке наблюдатель потокосцепления ротора (Н) построен в соответствии с уравнениями (1.3)–(1.5). Асинхронный двигатель реализован во вращающейся системе координат, а блоки с передаточными функциями  $e^{j\theta}$  и  $e^{-j\theta}$  осуществляют переход из вращающейся системы координат в неподвижную и обратно.

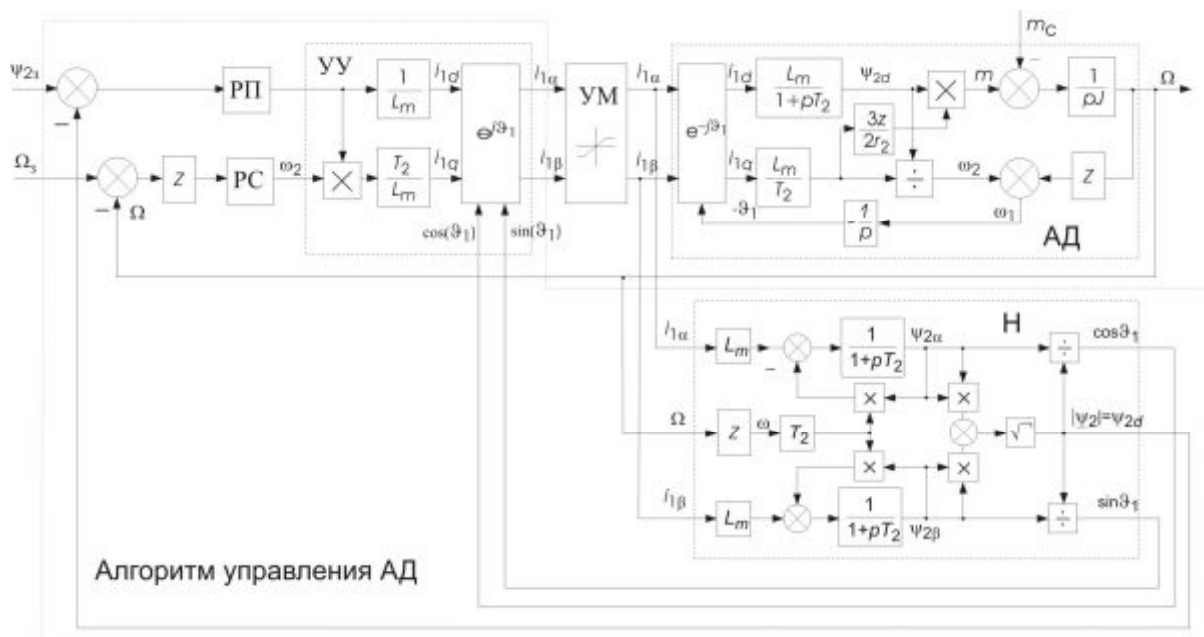


Рис. 1.1. Структурная схема системы векторного управления АД с автономным устройством управления

## 2. Нейросетевой наблюдатель потокосцепления ротора

Скорость вращения вала в замкнутой системе электропривода остается постоянной при изменении приложенного к двигателю момента нагрузки, меняется лишь частота и амплитуда токов статора, поэтому если обучать ИНС на сигналах тока статора и скорости вращения ротора, сеть не сможет адекватно оценивать потокосцепление. В отличие от скорости вращения вала двигателя, частота токов ротора напрямую определяется приложенным моментом нагрузки, поэтому именно эту переменную целесообразно использовать в качестве входной величины ИНС. В системе векторного управления необходимая величина  $\omega_2$  может быть получена на выходе регулятора скорости (рис. 1.1). Таким образом, в качестве входных переменных ИНС будем использовать сигналы статорных обмоток  $i_a$ ,  $i_b$  а также значение частоты токов ротора  $\omega_2$ . По этим данным обученная нейронная сеть должна определять значения проекций вектора потокосцепления ротора в неподвижной системе координат  $\psi_{2\alpha}$  и  $\psi_{2\beta}$ , которые в дальнейшем используются для вычисления его модуля и пространственного угла.

Зададимся средней погрешностью вычисления потокосцепления ротора 0.5%. Точность работы обученной нейронной сети будем оценивать с помощью средней ошибки за период выходного сигнала.

Для эффективного решения данной задачи требуется оптимизировать архитектуру ИНС. Количество входов (входных нейронов) и выходов (выходных нейронов) нейросетевого наблюдателя потокосцепления ротора полностью определяются условиями поставленной задачи, в которой входные и выходные переменные оговариваются. Таким образом, архитектура нейронной сети содержит 3 нейрона во входном слое, на которые поступают соответственно сигналы тока в фазных обмотках «а» и «б», а также величина частоты токов ротора  $\omega_2$  и 2 нейрона в выходном слое, на которых фиксируются значения проекций потокосцепления ротора  $\psi_{2\alpha}$  и  $\psi_{2\beta}$  в каждый момент времени. Для оптимизации нейронной сети требуется выяснить параметры, влияющие на качество нейросетевого решения поставленной задачи. Это, прежде всего: количество слоев нейронной сети, функции активации скрытых и выходных слоев и алгоритм обучения.



Известно, что обучать нейронную сеть можно только на сигналах той системы, где предполагается ее работа [3]. Изменение заданной частоты токов ротора  $\omega_2$  в системе векторного управления АД с ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора вызывает изменение как амплитуды, так и частоты токов статора. Поэтому при составлении выборки для нейросетевого наблюдателя потокосцепления ротора необходимо создать в системе такое изменение частоты токов ротора  $\omega_2$ , которое бы соответствовало всему диапазону работы двигателя, а это прежде всего:

- изменение скорости вращения вала от нулевого значения до скорости холостого хода  $\Omega_0$ ;
- изменение электромагнитного момента двигателя  $m$  от  $-m_{ном}$  до  $m_{ном}$ .

Во многом свойства и структурная сложность ИНС определяется обучающей выборкой, на которой она была обучена. Выборку предлагается записывать в схеме, приведенной на рис. 2.1. Данная схема представляет собой модель системы TRANSVEKTOR с разомкнутыми обратными связями в канале скорости и потокосцепления. При этом входным сигналом канала потокосцепления является номинальное значение потокосцепления ротора, а на вход канала частоты подается линейно изменяющееся задание  $\omega_2$ , которое соответствует изменению электромагнитного момента  $m$  от  $-m_{ном}$  до  $m_{ном}$ .

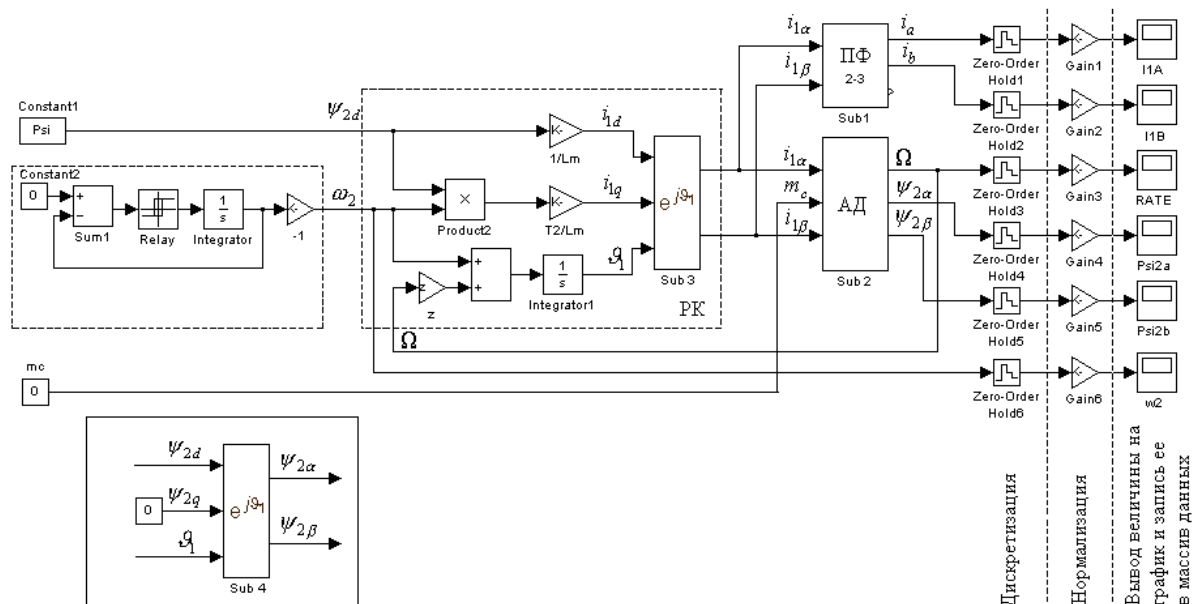


Рис. 2.1. Математическая модель разомкнутой системы векторного управления АД типа TRANSVEKTOR

На длину обучающей выборки влияют два параметра: время выборки и период дискретизации сигналов. Заданная частота дискретизации 1кГц ( $T_0 = 0.001$ , с). Тогда, учитывая время, на котором линейно изменяющаяся функция  $\omega_2$ , достигая значений  $\omega_{2ном}$  и  $-\omega_{2ном}$ , возвращается снова в ноль, получаем длину обучающей выборки:

$$N = \frac{t_k}{T_0} = 1820. \quad (2.1)$$

На рис. 2.2 показаны диаграммы сигналов, полученных на данной модели. Все величины приводятся после процедуры нормализации, т.е. отнесенными к своим номинальным (максимальным) значениям. Процедура необходима для обучения ИНС, поскольку все сигналы в обучающей выборке должны находиться в пределах от 0 до 1.

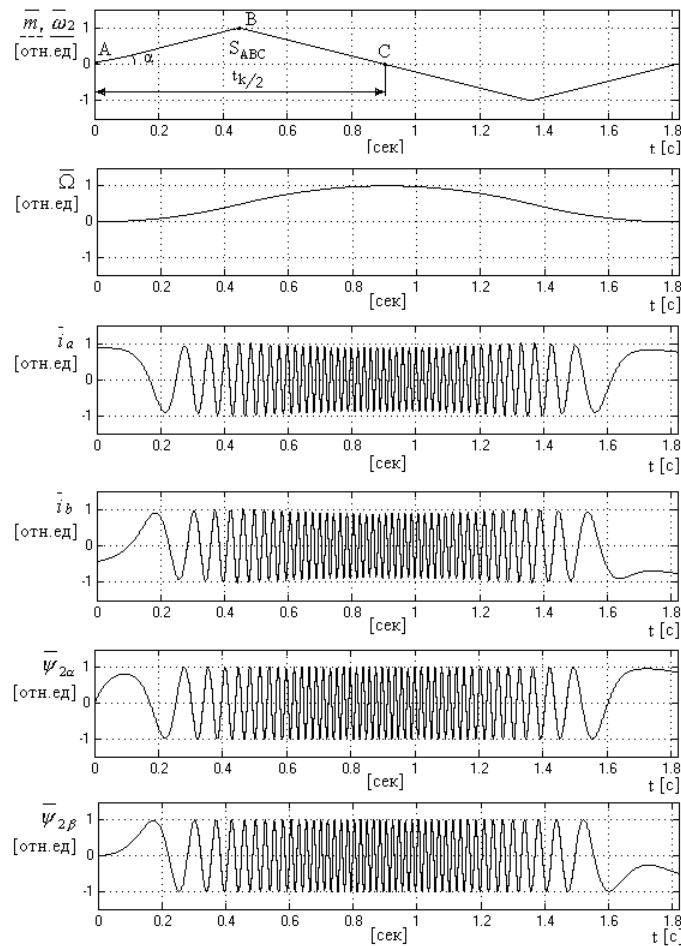


Рис. 2.2. Зависимость электромагнитного момента, токов фаз и потокосцепления ротора от времени при формируемом сигнале частоты тока ротора  $\omega_2$

Рассмотрение сетей с различным числом слоев, различным числом нейронов в скрытых слоях, а также различных функций активации нейронов показало, что при условии минимального количества связей в сети требуемую ошибку обучения демонстрирует ИНС, которая имеет два скрытых слоя с логическими (сигмоидальными) функциями преобразования и линейными функциями активации нейронов выходного слоя. Наилучшую сходимость при обучении ИНС показал алгоритм Левенберга-Марквардта.

### 3. Исследование поведение наблюдателей в условиях изменения параметров АД

Исследование поведения наблюдателей в условиях вариации активного сопротивления ротора АД в пределах от  $R_2$  до  $2R_2$  проводилось в схеме, представленной на рис. 3.1 а. Необходимо отметить, что моделирование осуществлялось при частоте дискретизации 20кГц, что в 20 раз выше частоты дискретизации сигналов, участвовавших в обучении ИНС. Ошибка наблюдателей рассчитывалась как апертурная погрешность  $\varepsilon' = \sqrt{(\varepsilon'_{\psi_{2\alpha}})^2 + (\varepsilon'_{\psi_{2\beta}})^2}$  (рис. 3.1.б). Здесь  $\varepsilon'_{\psi_{2\alpha}}$ ,  $\varepsilon'_{\psi_{2\beta}}$  – средние ошибки при вычислении соответственно  $\psi_{2\alpha}$ ,  $\psi_{2\beta}$ .

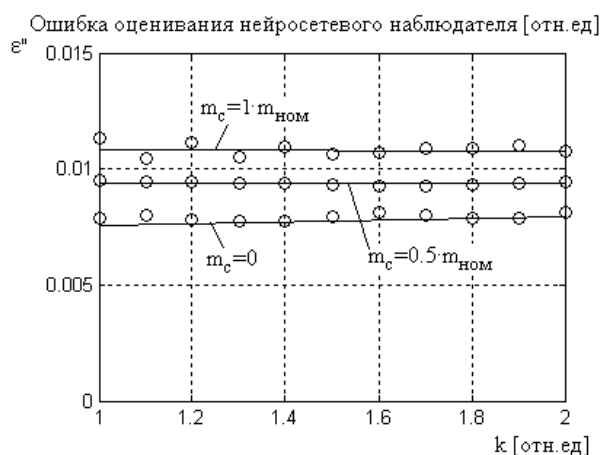
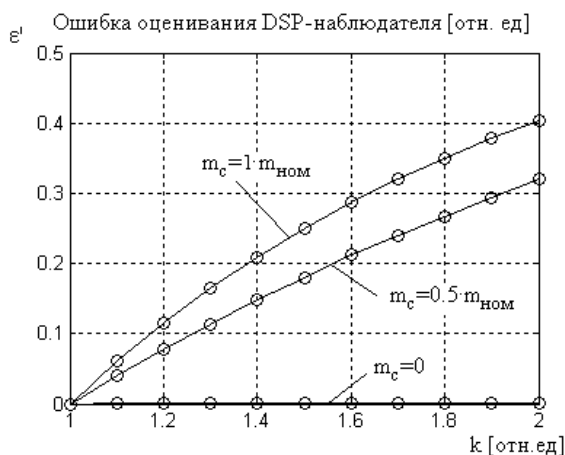
Исследование наблюдателей состоит из двух тестов. Тест А: задается вариация активного сопротивления ротора (относительное сопротивление ротора  $k = \frac{R_2}{R_{2ном}}$  изменяется от 1 до 2), двигатель разгоняется до скорости  $\Omega_0$  и к валу прикладывается за-

данный момент нагрузки ( $0, 0.5, 1 \cdot m_{\text{ном}}$ ); после завершения переходного процесса снимается ошибка оценивания потокосцепления ротора. Тест Б: задается вариация активного сопротивления ротора, двигатель разгоняется до заданной скорости ( $0.002 \cdot \Omega_0, 0.5 \cdot \Omega_0, 1 \cdot \Omega_0$ ), после чего к валу прикладывается номинальный момент нагрузки; после завершения переходного процесса снимается величина ошибки оценивания. Графики, полученные по результатам данных тестов, приводятся на рис. 3.2



Рис. 3.1. Структура исследовательской программы а) и нахождение апертурной погрешности работы наблюдателей б)

### Тест А



### Тест Б

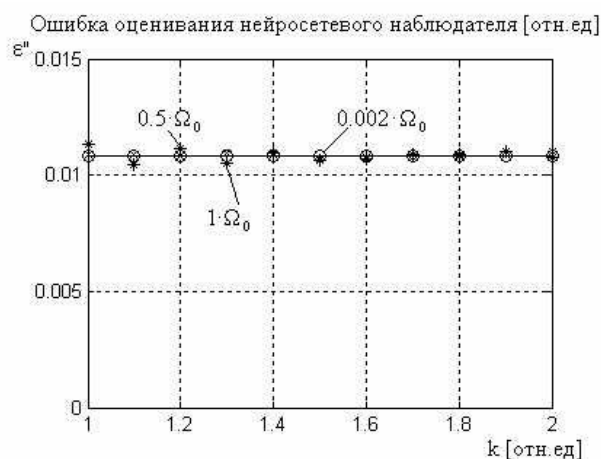
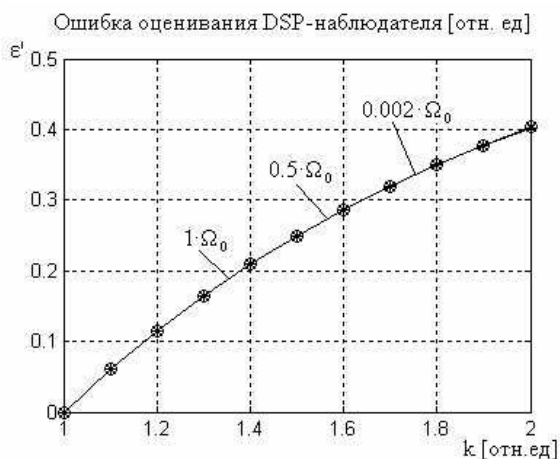


Рис. 3.2. Зависимость средней ошибки наблюдателей от изменения активного сопротивления ротора

## Заключение

Таким образом, в результате исследования было установлено, что искусственная нейронная сеть, обученная для задачи наблюдения за потокосцеплением ротора, адекватно работает во всем диапазоне скоростей и моментов, а также проявляет свойство толерантности к вариациям активного сопротивления ротора. Можно также отметить, что ошибка оценивания нейросетевого наблюдателя при нагруженном двигателе в несколько раз ниже ошибки оценивания *DSP*-наблюдателя. Однако в режиме холостого хода в отличие от ошибки *DSP*-наблюдателя, которая имеет довольно малое значение, которым можно пренебречь, ошибка нейросетевого наблюдателя имеет величину соизмеримую с ошибкой оценивания при ненулевом моменте сопротивления. Это связано со спецификой функционирования устройств, построенных на базе ИНС.

Несомненным достоинством ИНС является то, что погрешность ее работы не зависит от частоты дискретизации сигналов, используемых при вычислениях. Превышение ошибки работы нейросетевого наблюдателя над ошибкой его обучения связано со свойством обобщения ИНС, поэтому иногда целесообразно обучать ИНС с ошибкой, меньше заданной.

## Литература

1. Дацковский Л.Х., Роговой В.И., Абрамов Б.И. и др. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Электротехника. 1996. №10. с.18-28.
2. Ковбаса С.Н. Исследование грубости наблюдателей магнитного потока асинхронного двигателя. – Национальный Технический Университет Украины [www.el-drive.com.ua](http://www.el-drive.com.ua).
3. Лукичев Д.В. Применение методов нейронных сетей для сглаживания сигнала тока в электроприводе. Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». МКЭЭЭ–2003 (ICEEE-2003), Часть I. Крым, Алушта. 2003. С. 719-720.
4. Махотило К.В. Анализ параметрической чувствительности нейросетевой системы управления // Труды Международной научно-технической конференции «microCAD'97», часть 3 / Харьков. 1997. с.137-141.
5. Усольцев А.А., Лукичев Д.В. Опрокидывание асинхронного двигателя с векторным управлением. Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 8. С. 18-25.
6. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979.
7. Shi K.L., Chan T.F., Wong Y.K. Direct Self Control of Induction Motor Based on Neural Network / IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, pp. 1290-1258, Sept./Oct. 2001.

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ АМПЛИТУДНОГО ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГОЛ-КОД

И.Н. Жданов

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Синицын

В работе исследуется влияние различных алгоритмов обработки сигналов при амплитудном способе преобразования угла в код на точность определения угла положения в цифровой системе, использующей в качестве датчика положения синусно-косинусный вращающийся трансформатор.

## 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.

Для получения точной информации о положении и движении вала двигателя широкое распространение получили синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ). Созданные на основе этих преобразователей системы удовлетворяют самым высоким стандартам и способны точно функционировать в широком диапазоне воздействий окружающей среды – температуры, влажности, вибраций и ударов. С появлением цифровых систем стали разрабатываться преобразователи с цифровым выходом, в которых базовый первичный преобразователь сохраняется. В настоящее время созданы системы, соперничающие с цифровыми кодирующими преобразователями в разрешении, точности и динамических показателях.

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. Для амплитуды опорного несущего напряжения  $U_0$  частоты  $\omega$  выходные сигналы в формате СКВТ составляют

$$V_1 = U_0 \sin(\omega t + \Psi_1) \sin\theta,$$

$$V_2 = U_0 \sin(\omega t + \Psi_2) \cos\theta,$$

где  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  – фазовые сдвиги сигналов несущей частоты, вызванные их задержкой в цепях СКВТ.

Для идеальной системы фазовые сдвиги  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  равны нулю, и в большинстве систем их можно не учитывать. В этом случае выходные сигналы СКВТ можно представить в виде

$$V_1 = \sin(\omega t) \sin\theta,$$

$$V_2 = \sin(\omega t) \cos\theta.$$

Таким образом, информация об угловом перемещении заложена в соотношении амплитуд модулированных сигналов переменного тока.

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  $\theta$  в формате СКВТ, поступают на входы функциональных генераторов. На эти генераторы подается также сигнал, соответствующий углу  $\Phi$  по цифровому выходу. Сигналы с функциональных генераторов поступают в схему сравнения, формирующую сигнал, определяемый разностью  $\theta - \Phi$ , т.е. рассогласованием между положением вала и угловым эквивалентом цифрового кода на выходе.

Цифровой входной сигнал соответствует углу  $\Phi$ . В умножителе функциями этого угла являются  $\sin(\Phi)$  и  $\cos(\Phi)$ . Выходные сигналы отдельных функциональных генераторов

$$Va = v1 \cos(\Phi),$$

$$Vb = v2 \sin(\Phi),$$

т.е.

$$Va = \sin(\omega t) \sin(\theta) \cos(\Phi),$$

$$Vb = \sin(\omega t) \cos(\theta) \sin(\Phi).$$

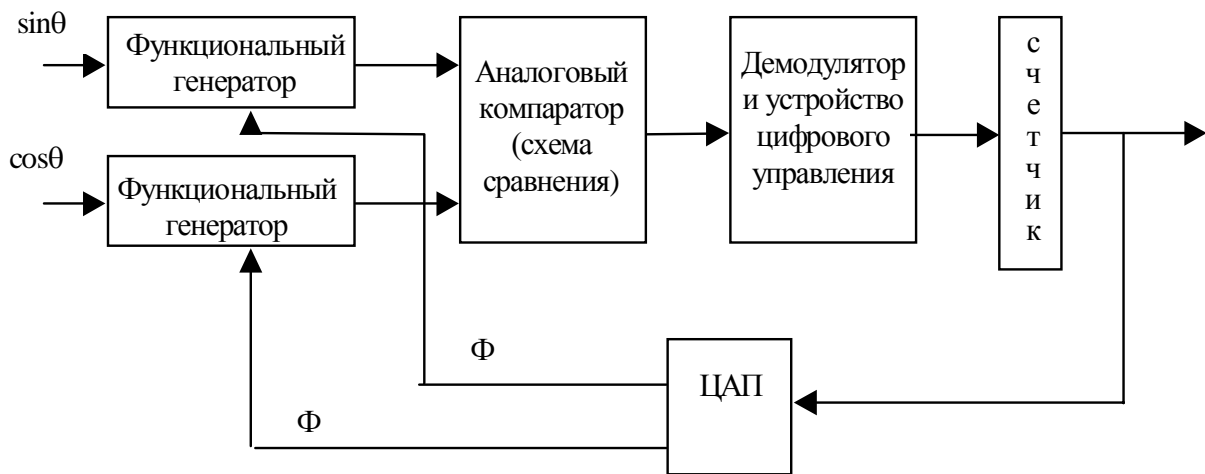


Рис.1. Преобразователь с функциональными генераторами

Оба выходных сигнала подаются затем на дифференциальный усилитель, формирующий сигнал рассогласования

$$Ve = Va - Vb = \sin(\omega t) \sin(\theta - \Phi)$$

Микропроцессорная система подразумевает реализацию необходимых функциональных преобразований на основе цифровых сигнальных процессоров.

Структурная схема микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ представлена на рис. 2.

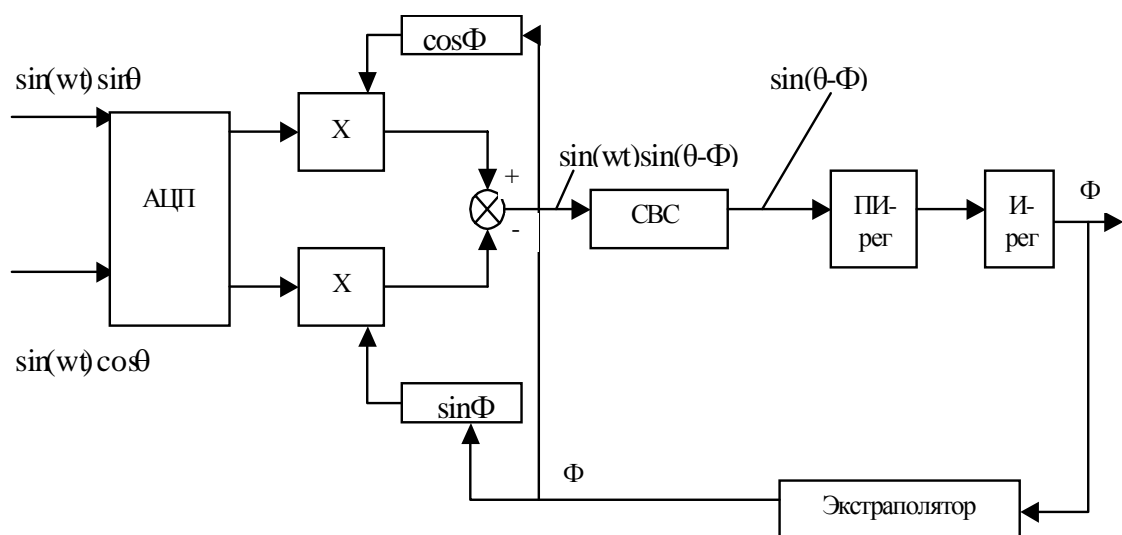


Рис. 2. Структурная схема микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ

На микроконтроллер подаются следующие сигналы:

$$V1 = \sin(\omega t) \sin \theta,$$

$$V2 = \sin(\omega t) \cos \theta,$$

и генерируется опорный сигнал

$$V = \sin(\omega t).$$

Сигнал  $V1$  умножается на косинус вычисляемого угла  $\Phi$ , а  $V2$  – на синус  $\Phi$  (где угол  $\Phi$  поступает по цепи обратной связи); затем из первого произведения вычитается второе. В итоге получим произведение синуса разности реального и мнимого углов на синус  $\omega t$ :

$$\sin(\theta - \Phi) \sin(\omega t).$$

Для выделения синуса разности можно воспользоваться несколькими способами. Один из них – деление полученного сигнала на  $\sin(\omega t)$ , в результате чего получаем синус разности действительного и вычисляемого углов. Другой способ – считывание информации в точках максимума  $\sin(\omega t)$  (аналогично структуре циклического преобразователя), что при достаточно большой его частоте не будет существенно влиять на погрешность определения угла. Третий способ заключается в нахождении среднего за половину периода значения сигнала  $\sin(\theta - \Phi) \sin(\omega t)$ , которое будет пропорционально синусу разности углов.

При малых рассогласованиях  $\sin(\theta - \Phi)$  практически равен  $(\theta - \Phi)$ . Согласно схеме на рис. 2, полученная разность подается на ПИ-регулятор, а затем на интегратор.

## Моделирование микропроцессорной системы

В пакете MatLab была разработана модель микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ с сохранением той же последовательности и разрядности вычислений (рис. 3), что позволяет оценить величину ошибки, возникающей вследствие конечной разрядности и дискретности цифровой системы. С помощью данной модели производится оценка влияния различных алгоритмов выделения синуса разности  $\sin(\theta - \Phi)$  на точность определения угла.

На алгоритм с выделением  $\sin(\theta - \Phi)$  путем деления на  $\sin(\omega t)$  при реализации системы на микроконтроллере затрачивается большее время за счет большой длительности выполнения операции деления. Однако преимуществом данного алгоритма является возможность получения результата деления в любой момент времени.

При измерении сигнала в точках максимума результат вычислений на первый взгляд будет наиболее точен, однако между двумя максимумами информация о текущей ошибке будет отсутствовать. Во многих прецизионных системах позиционирования скорости, как правило, не достигают высоких значений; например, при скорости вращения вала 20 об/мин и частоте синусоидального сигнала первичной обмотки СКВТ в 1 кГц величина рассогласования по углу в худшем случае не превысит  $7.2'$ . В то же время гармоники, шумы и квадратурные компоненты могут маскировать максимумы сигнала, что может привести в данном случае к значительным погрешностям. Таким образом, зачастую предпочтение отдается, особенно при больших скоростях, первому способу.

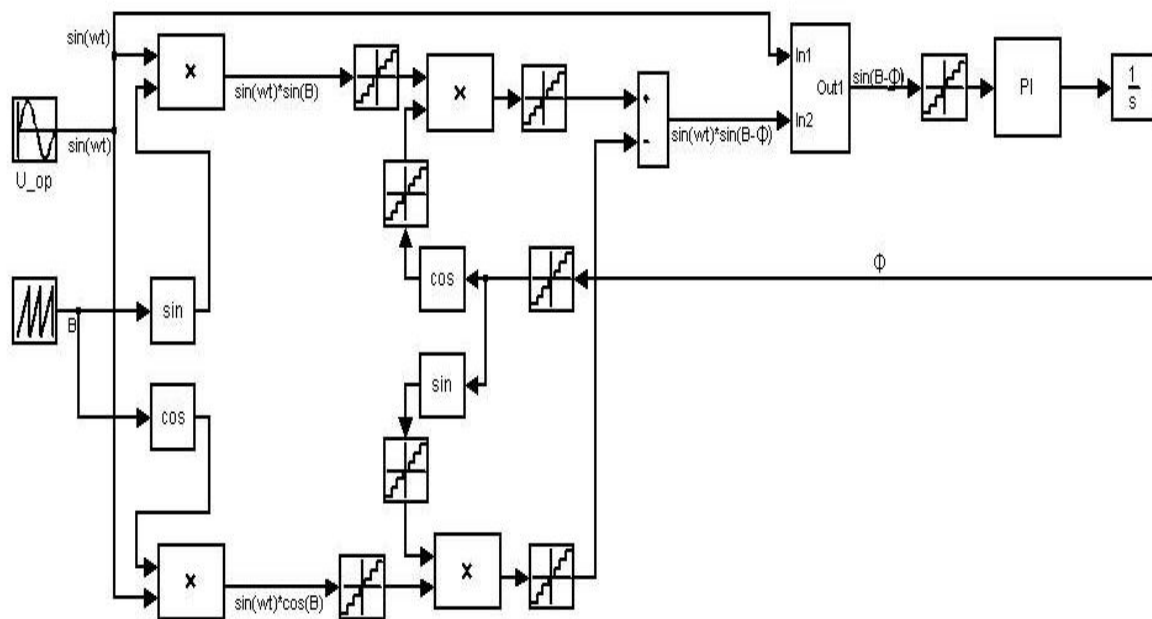


Рис. 3. Модель микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ

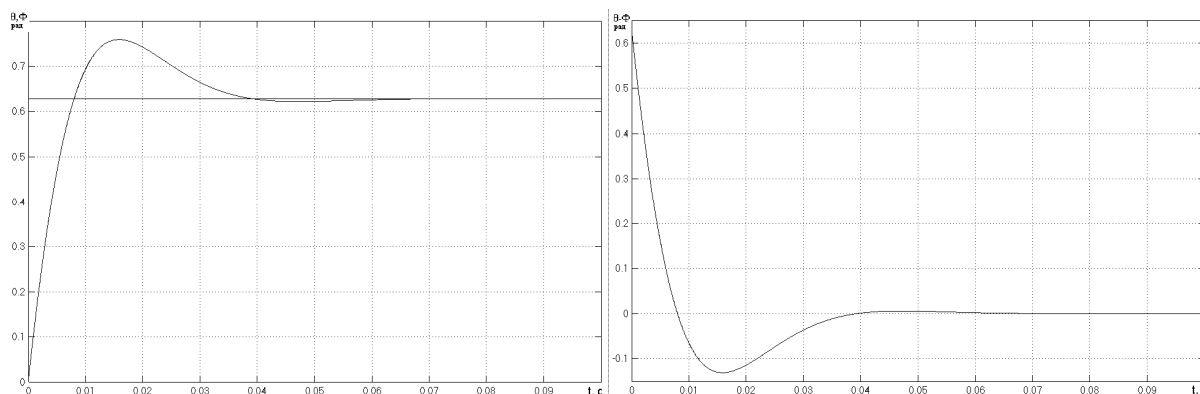


Рис. 4. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при неизменном угле поворота. Алгоритм с делением на  $\sin(\omega t)$

Указанные алгоритмы для 16-ти разрядного вычислительного устройства с 16-ти разрядным АЦП были промоделированы в пакете Matlab, графики переходных процессов, приведены на рис. 4–9. На рис. 4, 5 приведены графики изменения реального  $\theta$ , вычисляемого  $\Phi$  углов и их разности при неизменном и линейно изменяющимся углами поворота вала при расчете  $\sin(\theta - \Phi)$  путем деления на  $\sin(\omega t)$ ; на рис. 6, 7 приведены



аналогичные графики при измерении сигнала в точках максимума; на рис. 8, 9 – при вычислении через среднее значение.

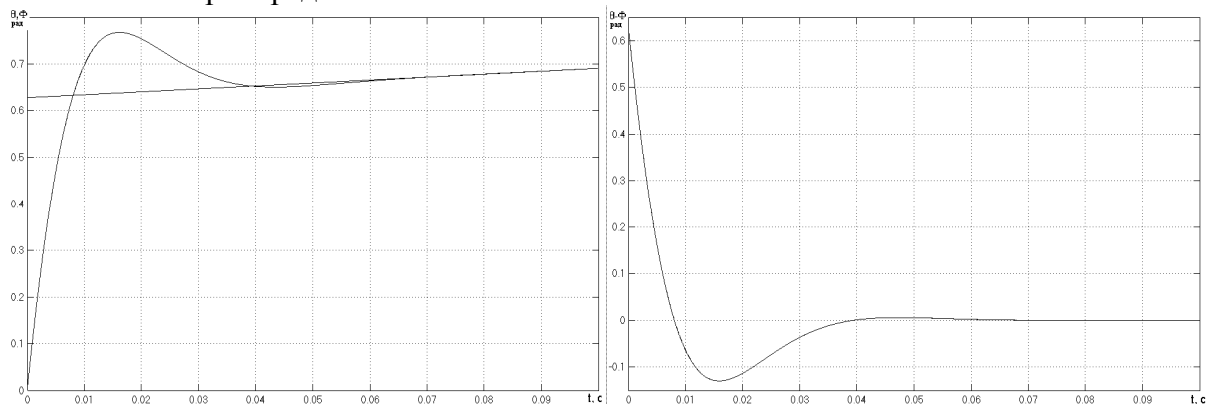


Рис. 5. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при линейно изменяющемся угле поворота. Алгоритм с делением на  $\sin(\omega t)$

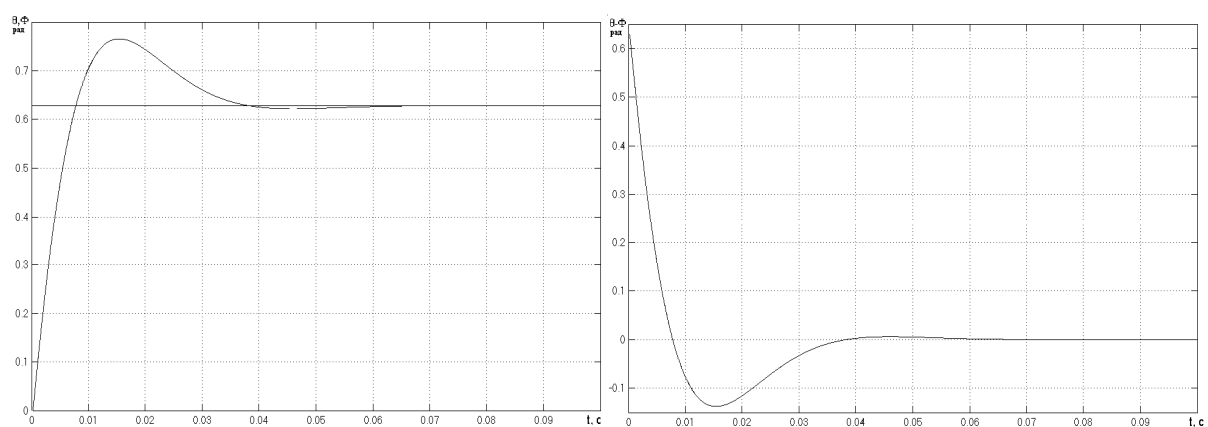


Рис. 6. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при неизменном угле поворота. Алгоритм при измерении сигнала в точках максимума  $\sin(\omega t)$

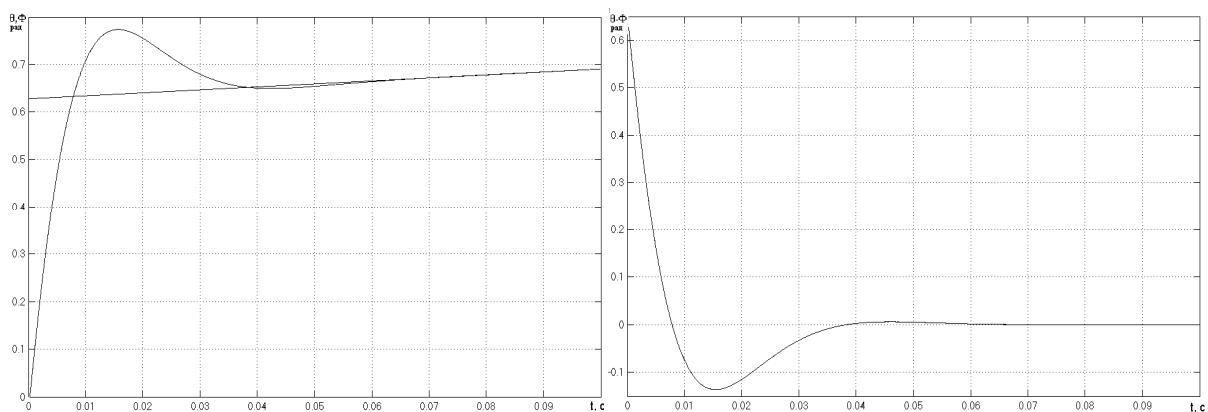


Рис. 7. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при линейно изменяющемся угле поворота. Алгоритм при измерении сигнала в точках максимума  $\sin(\omega t)$

При использовании алгоритма с делением на  $\sin(\omega t)$  ошибка определения угла при неподвижном вале составляет  $21''$ , при вращении с постоянной скоростью  $0.1$  об/сек составляет  $23'$ .

При алгоритме с измерением  $\sin(\omega t)$  в точках максимума ошибка составляет  $21''$ , при вращении с постоянной скоростью  $42'$ . При этом не учитывалось влияние шумов.

Однако, как видно из графиков, при использовании последнего алгоритма переходный процесс имеет практически в три раза меньшую длительность.

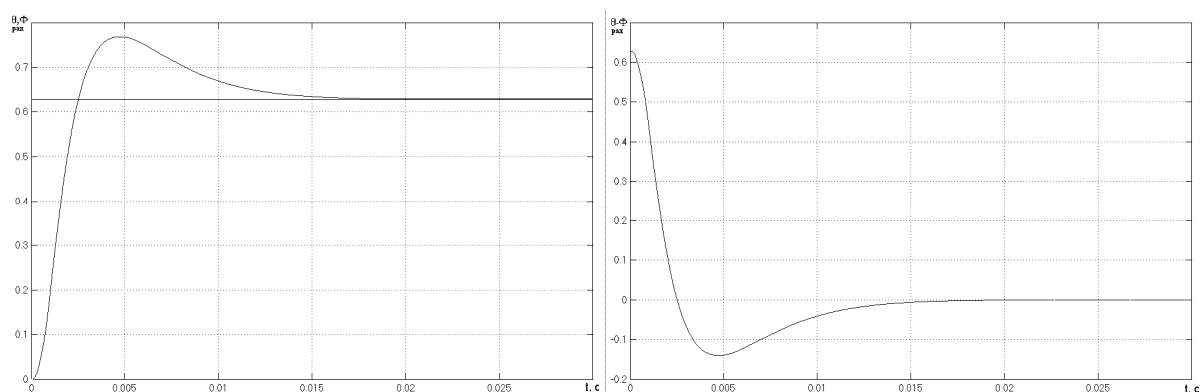


Рис. 8. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при неизменном угле поворота. Алгоритм при вычислении через среднее значение

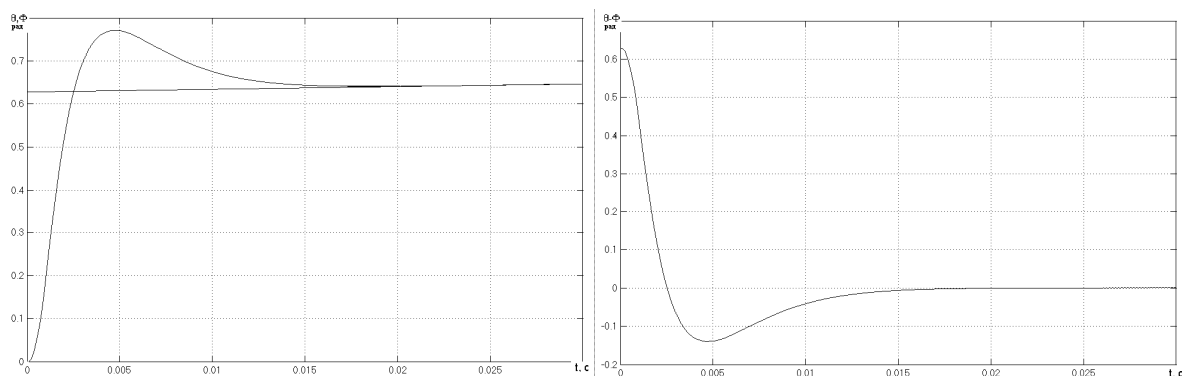


Рис. 9. Переходный процесс и ошибка вычисления  $\Phi$  при линейно изменяющемся угле поворота. Алгоритм при вычислении через среднее значение

С увеличением скорости вращения алгоритм с делением на  $\sin(\omega t)$  сохраняет прежнее значение ошибки, при алгоритме с вычислением через максимальные значения ошибка постепенно возрастает, а при алгоритме с вычислением через среднее значение ошибка практически не изменяется.

Следует отметить, что при повышении разрядности АЦП и вычислительного устройства точность системы значительно повышается.

## Литература

1. Ахметжанов А.А., Кочемасов А.В. Следящие системы и регуляторы: Учеб. Пособие для вызов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Дж. Вульвет. Датчики в цифровых системах. М.: Энергоиздат, 1981.
3. Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Жданов И.Н., Денисов К.М. Математическое описание микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ как датчика положения вала двигателя. // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Ч.III. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001.
5. Жданов И.Н. Моделирование микропроцессорной системы обработки сигналов СКВТ для прецизионного электропривода. // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов. Том 2. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004.
6. Р. Изерман. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984.

# ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА МАЯТНИК, ПРИ ДВИЖЕНИИ ЕГО В СРЕДЕ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ, ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ СКОРОСТИ

Д.В. Несмачный

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.А. Иванов

В данной работе строится точное аналитическое описание силы, действующей на маятник, при сопротивлении его движению, пропорциональном первой степени скорости, с помощью теории эллиптических функций.

## Введение

Движение маятника с трением в точке подвеса или в среде с сопротивлением, пропорциональным первой степени скорости, согласно монографиям [1] (стр.17), [2] (стр.377) описывается уравнением

$$A \frac{d^2\varphi}{dt^2} + B_1 \frac{d\varphi}{dt} + C \sin \varphi = \begin{cases} 0 \\ F(t) \end{cases} . \quad (1)$$

Решения такого уравнения при некоторых ограничениях (величина размаха) были впервые получены И. Ньютоном во II книге «Начал» [1]. О необходимости построения точного решения уравнения (1) писал Д.И. Менделеев в связи с задачами службы времени и измерением силы тяжести [2] (см. также [3]).

Точное аналитическое описание такого движения является также актуальным, поскольку трудно обозримое множество измерительных приборов, таких как магнитометры, гравиметры, акселерометры и тому подобное, имеет чувствительные элементы, движение которых описывается уравнением (1) [4].

Однако, несмотря на развитие методов анализа, в частности, теории эллиптических и абелевых функций, искомое описание строится исключительно посредством упрощений, которые можно подразделить на два класса:

- 1 – подстановка в уравнение (1) отрезков рядов Фурье,
- 2 – отбрасывание ввиду малости тех или иных слагаемых, входящих в уравнение, и замена функции  $\sin \varphi$  на угол  $\varphi$  [5,6].

Как правило, для построения решения используются оба класса упрощений.

В связи с тем, что упомянутые методы решения уравнения вида (1) не дают адекватного описания движения маятника с трением в точке подвеса [7], мы предприняли попытку определения закона изменения движущей силы как функции времени, опираясь на следующее из теории конических сечений и классической механики определение решения обыкновенного дифференциального уравнения:

*Определение I.*

Решением обыкновенного дифференциального уравнения порядка  $n$  является функция,  $n$ -я производная от которой даёт полное алгебраическое выражение данного дифференциального уравнения.

## Построение аналитического описания силы сопротивления

Как и в работе [7] \*, будем исходить из рассмотрения движения маятника по инерции, описывающегося уравнением

---

\* В работе [7] было проведено построение методом теории эллиптических функций аналитическое описание общей силы, пропорциональной скорости, препятствующей движению маятника, однако оно не было доведено до конца. Кроме того, в тексте был допущен ряд неточностей, и само изложение материала является, на наш взгляд, не самым удачным.

$$ml \frac{d^2\varphi}{dt^2} + mg \sin \varphi = 0, \quad (2)$$

определяющим строго периодическое движение с периодом

$$T = 4K \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3)$$

Решение уравнения (2) определено функцией [7]

$$\varphi = 2\arcsin[\varepsilon \operatorname{sn}(u, \varepsilon)], \quad (4)$$

где  $\operatorname{sn}(u)$  – эллиптическая функция Якоби, а  $\varepsilon$  – эксцентриситет кинематического эллипса, отображением на который движение маятника спрямляется последующим отображением на окружность. И это действительно так, поскольку оно полностью удовлетворяет *Определению I*

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varphi}{du^2} \left( \frac{du}{dt} \right)^2 &= \frac{1}{t^2} 2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u = -\frac{1}{t^2} 2\varepsilon \operatorname{cn} u \operatorname{dn} u = -\frac{1}{t^2} \sin[\arcsin(2\varepsilon \operatorname{sn} u \operatorname{cn} u)] = \\ &= -\frac{1}{t^2} \sin[2\arcsin(\varepsilon \operatorname{sn} u)] = -\frac{1}{t^2} \sin \varphi. \end{aligned}$$

При движении маятника по инерции (уравнение (2))  $\varepsilon$  есть величина постоянная, определённая равенством

$$\varepsilon = \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – начальный угол отклонения. Для построения аналитического описания поведения силы, действующей на маятник, при движении его в среде с сопротивлением, пропорциональным первой степени скорости, определим функцию (4) как функцию двух переменных – аргумента  $u(t)$  и эксцентриситета  $\varepsilon(t)$

$$\varphi = 2\arcsin[\varepsilon(t) \operatorname{sn}(u(t), \varepsilon(t))], \quad (4')$$

что предопределяет изменение размахов маятника. При таком определении функции  $\varphi$  её полная вторая производная по времени имеет вид

$$\frac{d^2\bar{\varphi}}{dt^2} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial u^2} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2\varphi}{\partial u \partial \varepsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) + \frac{\partial^2\varphi}{\partial \varepsilon^2} \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)^2 + \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon} \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \right). \quad (6)$$

Так как второе и четвёртое слагаемые определяют силу, пропорциональную скорости, то интересующее нас уравнение имеет вид

$$\frac{d^2\bar{\varphi}}{dt^2} = \frac{\partial^2\varphi}{\partial u^2} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2\varphi}{\partial u \partial \varepsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) + \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon} \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} \right), \quad (7)$$

где

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \varepsilon} = -\frac{1}{\varepsilon(1-\varepsilon^2)} [2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u + 2\varepsilon \operatorname{cn} u E(\varphi)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial u \partial \varepsilon} = \frac{2}{\varepsilon(1-\varepsilon^2)} [-2\varepsilon D_u^2 \operatorname{cn} u - 2\varepsilon^3 \operatorname{cn}^3 u - 2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u E(\varphi)] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \varepsilon^2} &= \frac{2}{\varepsilon^2(1-\varepsilon^2)} \left[ -(\varepsilon^2 + \varepsilon^2 \operatorname{cn}^2 u) 2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u + \varepsilon^2(1-\varepsilon^2) u 2\varepsilon \operatorname{cn} u - \right. \\ &\quad \left. - (2\varepsilon \operatorname{cn} u + 4\varepsilon^3 \operatorname{cn}^3 u) E(\varphi) - 2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u E^2(\varphi) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial u^2} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 = 2\varepsilon D_u \operatorname{cn} u, \quad (4)$$

(7)

а  $D_u = \frac{\partial}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t}$ ,  $D_u^2 = \frac{\partial^2}{\partial u^2} \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2$ ,  $\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{t}$ , а  $E(\varphi) = \int_0^u \varepsilon^2 \operatorname{cn}^2 u du = \frac{1}{4} \int_0^t \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 dt$  – эллиптический интеграл II рода, представляющий собой квазипериодическую функцию, определяющую необратимые изменения движения.

Подставив выражение этой производной в уравнение (2) и получив явные выражения всех слагаемых, мы получим в силу строения функции (4') дифференциальное уравнение, в котором неизвестной функцией является  $\varepsilon(t)$ , которое мы можем записать в виде

$$\frac{d^2 \bar{\varphi}}{dt^2} = \alpha \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \beta \frac{d\varepsilon}{dt} + C \sin \varphi. \quad (8)$$

В правой части последнего уравнения первые три слагаемых определяют явное выражение силы сопротивления, пропорциональной скорости движения маятника – силы трения.

Так как эксцентриситет эллипса  $\varepsilon$  естественно представим эллиптической функцией

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \operatorname{sn}(u), \quad (9)$$

(на самом деле закон изменения  $\varepsilon$  определён функцией, пропорциональной первой степени скорости), то подстановка его в дифференциальное уравнение (8) преобразует последнее в алгебраическое уравнение степени 4 относительно  $\varepsilon$  с изменяющимися во времени коэффициентами, которые мы можем записать, представив, что маятник остановлен внешним воздействием в момент времени, отличный от  $t_0$ , т.е. введя в уравнение мгновенное значение движущей силы и силы сопротивления  $F$  с обратным знаком

$$\alpha \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \beta \frac{d\varepsilon}{dt} + C \sin \varphi - F = 0, \quad (10)$$

в виде

$$\varepsilon^4 + \lambda_1 \varepsilon^3 + \lambda_2 \varepsilon^2 + \lambda_3 \varepsilon + \lambda_4 = 0. \quad (11)$$

Таким образом, мы представили силу, действующую на маятник, в виде уравнения четвёртой степени (11) от эксцентриситета, каковой в силу формулы (5) определяет отклонение маятника от положения равновесия.

Из уравнения (11) следует, что закон изменения силы, действующей на маятник, при движении его в среде с сопротивлением, пропорциональным первой степени скорости, является функцией не ниже четвёртого порядка (ввиду зависимости от времени коэффициентов  $\lambda_i$ , в которые, кроме периодических эллиптических функций Якоби – тригонометрических функций эллипса I рода, входят тригонометрические функции эллипса II рода, являющиеся квазипериодическими).

Таким образом, мы видим, что выбор аналитического выражения эксцентриситета  $\varepsilon$  в виде (9) согласуется с законом изменения во времени действующей на маятник силы, определённым уравнением (11), в виду того, что последнее приводится к виду

$$(1 - \bar{\varepsilon}^2)(1 - k^2 \bar{\varepsilon}^2) = 0, \quad (12)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  есть корень уравнения (12), которое есть результат преобразования уравнения (11), а  $k^2$  есть модуль, или эксцентриситет, эллиптической функции, выраженный через коэффициенты уравнения (11).

Обращением же канонического якобиева интеграла вида

$$\bar{u} = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\sqrt{(1 - \bar{\varepsilon}^2)(1 - k^2 \bar{\varepsilon}^2)}} \quad (13)$$

является эллиптический синус  $\bar{\varepsilon} = \operatorname{sn}(\bar{u})$  [8].

Так как уравнение (11) имеет четыре корня, то в зависимости от знаков перед функцией  $E(\varphi)$ , содержащейся в коэффициентах  $\alpha$  и  $\beta$  в уравнении (8), корни уравнения (11) будут убывающими или возрастающими функциями времени, что, соответственно, предопределяет аналитическое поведение функции  $\varphi$  – решения уравнения (1).

## Заключение

В этой работе мы получили методами теории эллиптических функций аналитическое описание кривой, определяющей закон изменения величины силы, движущей маятник, колеблющийся под действием силы сопротивления, пропорциональной первой степени скорости, в предположении, что функция, представляющая собой решение дифференциального уравнения, описывающего это движение, есть функция от двух переменных.

Проведённый анализ подтвердил правильность выбора в качестве варьируемого параметра эксцентриситета кинематического конического сечения, отображением на который спрямляется движение маятника, и показал, что закон изменения движущей силы выражается функцией четвёртого порядка от этого эксцентриситета при сопротивлении трения, пропорциональном первой степени скорости маятника.

Эти результаты будут использоваться в дальнейшей работе над задачей точного аналитического описания закона движения маятника при сопротивлении трения в точке подвеса, пропорциональном первой степени его скорости, поскольку точное решение этой задачи даёт возможность производить расчёт компенсирующих сил во всех механических устройствах, содержащих вращающиеся с трением скольжения элементы – соприкасающиеся по двум цилиндрическим поверхностям поворотные механизмы, штурвалы, ручки управления и так далее.

## Литература

1. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. Собр. соч. А.Н. Крылова. М-Л.: ИАН СССР, т.7, 1936. С. 356-368, 392-421.
2. Менделеев Д.И. Подготовка к определению абсолютного напряжения тяжести. Сочинения, т. VII. Л.-М., ИАН СССР, 1946. С. 600-620.
3. Крылов А.Н. Качка корабля. Собр. трудов ак. А.Н. Крылова, т.XI. М-Л., ИАН СССР, 1951.
4. Бесекерский В.А., Иванов В.А., Самошкин Б.Б. Орбитальное гирокомпасирование. СПб, Политехника, 1993.
5. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М, ГИФМЛ, 1958.
6. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М. Мир, 1968.
7. Иванов В.А., Мануйлов К.В., Несмачный Д.В. Точное решение дифференциального уравнения, описывающего свободные и вынужденные колебания маятника с трением в точке подвеса. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ) №9. С-Пб, СПбГИТМО, 2003. С.99-104.
8. Ильина Л.П., Мануйлов К.В. Курс лекций по теории функций комплексной переменной и эллиптическим функциям. СПб: СПбГИТМО, 2000.

# SIMULINK-МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Е.В. Логовская, С.С. Резников, Чан Нгок Чау

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

На примере одной из простейших нелинейных механических систем рассматриваются возможности построения их моделей в среде MatLAB и анализируются результаты моделирования в контексте использования кинетических методов исследования подобных систем.

Компьютерная техника, применяемая для изучения нелинейных динамических систем, обуславливает идеи и методы изучения и интерпретации этих систем как на качественном, так и на вычислительном уровне. Использование компьютера как средства для понимания поведения динамических систем, кажется, теперь не вызывает вопросов. Многие явления были первоначально открыты при помощи компьютерного моделирования, а затем получили теоретическое объяснение.

Рассмотрим систему (рис. 1), представляющую собой маятник на основании, имеющим возможность горизонтального перемещения.

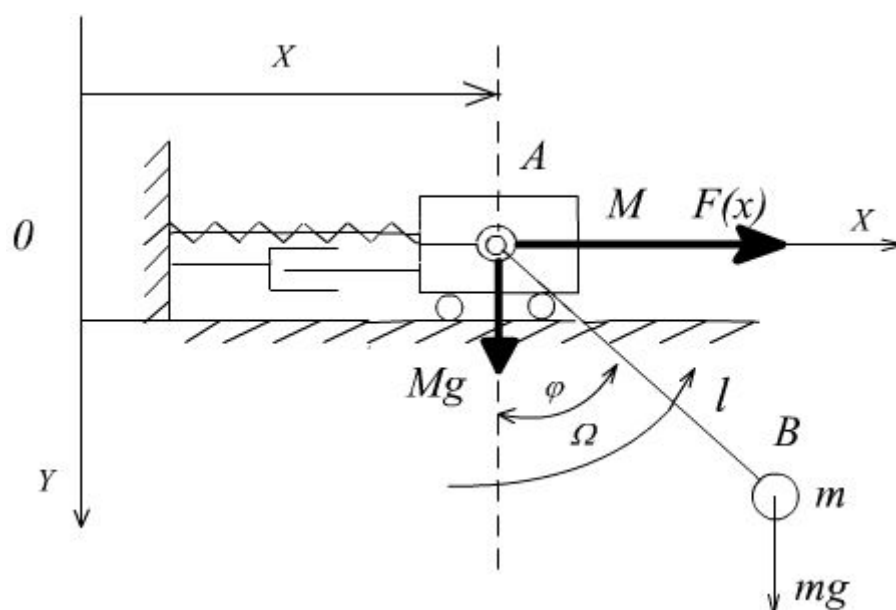


Рис. 1. Маятник на основании, имеющим возможность горизонтального перемещения

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $M$  – масса ползуна;  $m$  – масса маятника;  $l$  – длина маятника;  $g$  – ускорение свободного падения.

В данной работе мы будем рассматривать случай нелинейной упругой связи, соответствующей потенциалу, связанному с катастрофой сборки.

В качестве обобщённых координат примем:  $x$  – горизонтальное смещение центра тяжести ползуна относительно положения равновесия,  $\varphi$  – угол отклонения маятника от вертикальной оси. Тогда выражение для кинетической энергии данной системы будет иметь вид

$$T = \frac{1}{2}(M + m) \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} ml^2 \cdot \dot{\varphi}^2 + ml \cdot \dot{x} \cdot \dot{\varphi}. \quad (1)$$

Далее составляются уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i,$$

$$q_1 = x, q_2 = \varphi. \quad Q_1 = Q_x, Q_2 = Q_\varphi,$$

$$Q_x = F(x),$$

$$Q_\varphi = -mgl \cdot \sin \varphi ..$$

Пусть  $F(x) = -(Ax^3 + Bx)$ . Тогда получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} (M + m) \cdot \ddot{x} + ml\dot{\varphi} \cos \varphi - ml\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - (Ax^2 + Bx) = 0, \\ ml\ddot{\varphi} + m\ddot{x} \cos \varphi + mg \sin \varphi = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Выделяя в явном виде вторые производные, имеем:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + \frac{m^2 l \sin \varphi \cos \varphi}{l(Mm + m^2 \sin^2 \varphi)} \dot{\varphi}^2 + \frac{(M + m)mg \sin \varphi}{l(Mm + m^2 \sin^2 \varphi)} - \frac{(Ax^3 + Bx)m \cos \varphi}{l(Mm + m^2 \sin^2 \varphi)} = 0, \\ \ddot{x} - \frac{ml \sin \varphi}{M + m \sin^2 \varphi} \dot{\varphi}^2 - \frac{mg \sin \varphi \cos \varphi}{M + m \sin^2 \varphi} + \frac{(Ax^3 + Bx)}{M + m \sin^2 \varphi} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Данную систему будем визуализировать при помощи приложения Simulink программного пакета MatLab.

Принимаем  $M = m = 1 \text{ кг}$ ,  $l = 1 \text{ м}$ ,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ,  $A = 3$ ,  $B = -2$ . После подстановки численных значений система уравнений принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} \dot{\varphi}^2 + \frac{19.6 \sin \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} - \frac{(3x^3 - 2x) \cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} = 0, \\ \ddot{x} - \frac{\sin \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} \dot{\varphi}^2 - \frac{9.8 \sin \varphi \cos \varphi}{1 + \sin^2 \varphi} + \frac{(3x^3 - 2x)}{1 + \sin^2 \varphi} = 0. \end{cases}$$

На рис. 2 представлена расчётная схема.

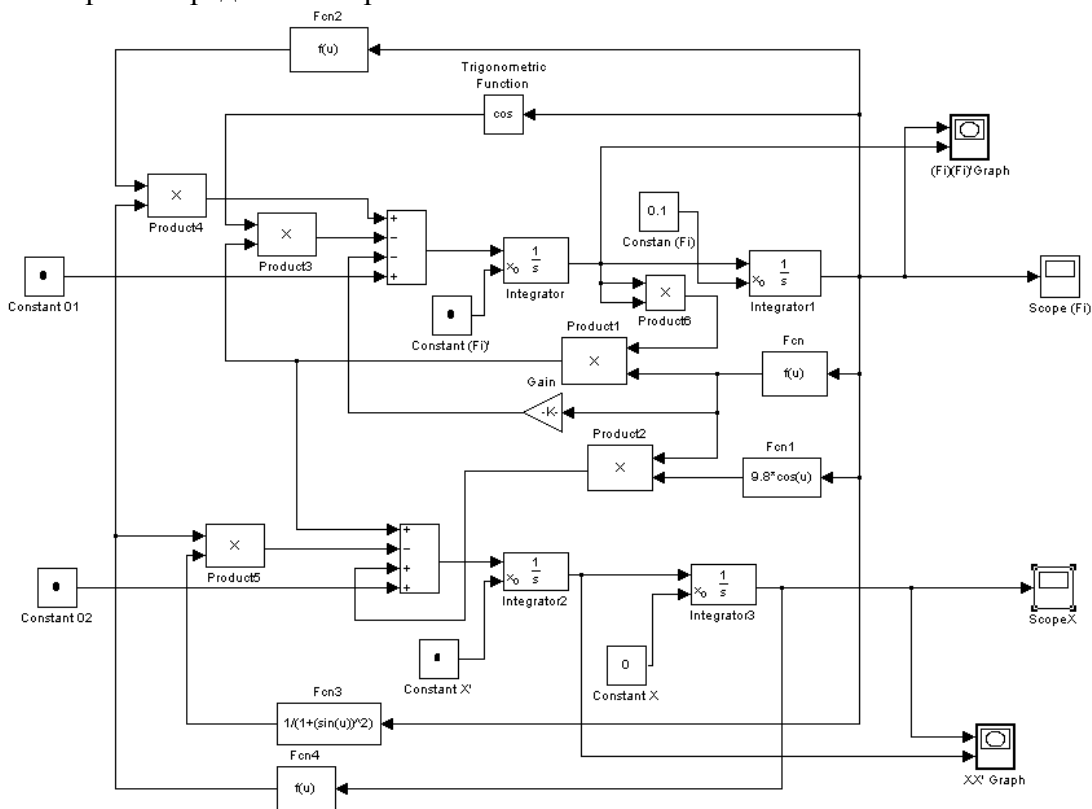
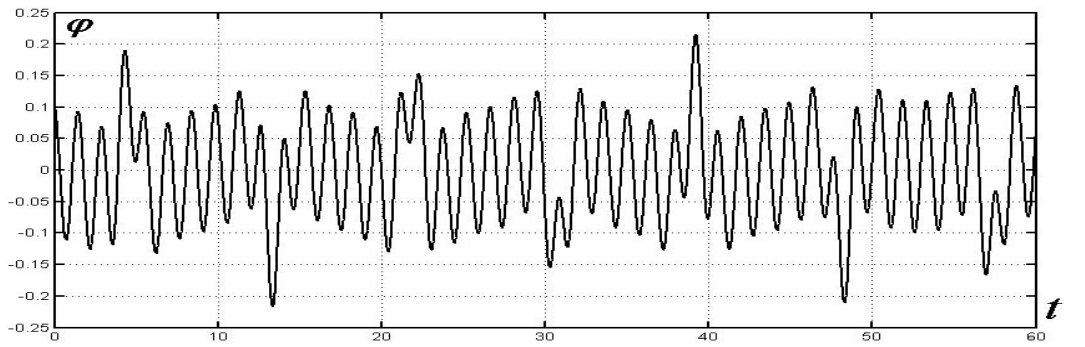


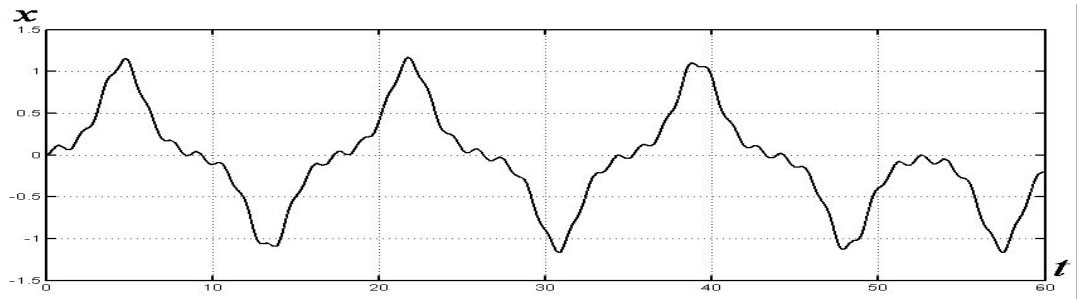
Рис. 2 Расчётная схема

На рис. 3–4 представлены результаты моделирования.



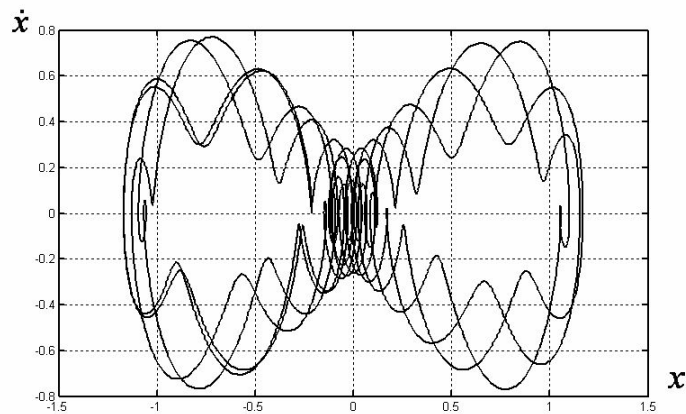


а

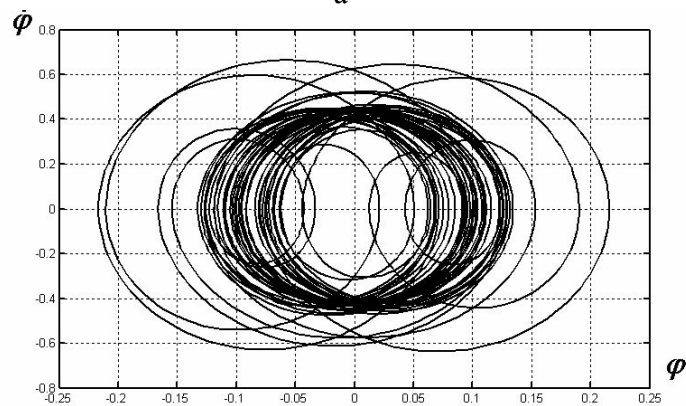


б

Рис. 3. Результаты моделирования – законы изменения  $x(t)$ ,  $\varphi(t)$



а



б

Рис. 4. Результаты моделирования – фазовые портреты  $\dot{x}(x)$  и  $\dot{\varphi}(\varphi)$

На рис. 3 представлены законы изменения  $x(t)$ ,  $\varphi(t)$ . Для зависимости  $\varphi(t)$  характерно наличие высоких частот, накладываемых на низкочастотную несущую. Это явление

ние не наблюдается для малых углов отклонения маятника  $\varphi \approx \sin \varphi$ . Характер изменения  $x(t)$  сопоставим с возникновением квазифрикционного взаимодействия, несмотря на то, что сама постановка задачи полностью исключает учёт трения.

На рис. 4 представлены фазовые портреты системы  $\dot{x}(x)$  и  $\dot{\varphi}(\varphi)$ . Характерным для обоих случаев является орбитальность приведённых зависимостей. Мы наблюдаем стохастический характер этих орбит. Поэтому в дальнейшем мы предусматриваем использование уравнений Колмогорова-Фокера-Планка в целях построения функций плотности вероятности для анализа этих орбитально-стохастических явлений.

## Литература

1. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике. / Под ред. Е.С. Пятницкого. 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 264с.
2. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс. – СПб: Питер, 2000. 432с.
3. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 368 с.
4. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
5. Мусалимов В.М. Аналитическая теория точности механических систем. / В кн. Фундаментальные проблемы теории точности. – СПб.: Наука, 2004.

# СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЗМУЩЕННОЙ СИСТЕМЫ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

И.В. Амоскин, А.А. Блинников, Н.А. Николаев  
Научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Бобцов

В работе представлены аналитические условия для решения задачи стабилизации нелинейной возмущенной системы с неизвестными параметрами линейной части, с неограниченной нелинейностью по измерениям выходной переменной системы. Предполагается, что относительная степень объекта управления известна и равна двум, а нелинейность ограничена функцией от выхода произвольной степени.

## Введение

Данная работа является развитием схем управления нелинейными системами, представляющими собой композицию линейного динамического и нелинейного статического звеньев [1–8]. Как и в статьях [1–8], в предлагаемой работе будут рассматриваться нелинейные системы, в которых нарушены условия согласования нелинейных блоков и управляющего сигнала. В отличие от работ [1–4], в данной работе предполагается, что на объект управления действует возмущающее воздействие. В данной работе, как и в работах [6, 7], предполагается, что относительная степень передаточной функции линейной части равна двум. В развитие результатов, предложенных в работах [6, 7], в данной работе, как и в работе [8], предполагается, что нелинейность ограничивается зависимостью относительно выхода системы произвольной степени. В отличие от работы [8], предполагается, что измерениям доступна только выходная переменная объекта управления, но не ее производные или вектор состояния объекта.

В работе предлагается схема управления, обеспечивающая сходимость выходной траектории нелинейной системы в некоторую область, определяемую разработчиком системы. Регулятор использует информацию о выходной переменной (без измерения производных).

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим нелинейный объект управления вида

$$y = \frac{b(p)}{a(p)}u + \frac{d(p)}{a(p)}\varphi(y) + \frac{f(p)}{a(p)}w(t), \quad (1)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $b(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0$  – гурвицев полином степени  $m$ , коэффициент  $b_m > 0$ ;  $a(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$  – полином степени  $n$  (может быть неустойчивым);  $d(p) = p^r + d_{r-1} p^{r-1} + \dots + d_1 p + d_0$  – полином степени  $r$ ,  $r \leq n$  (может быть неустойчивым);  $f(p) = p^q + f_{q-1} p^{q-1} + \dots + f_1 p + f_0$  – полином степени  $q$ ,  $q \leq n$  (может быть неустойчивым); относительная степень передаточной функции  $\frac{b(p)}{a(p)}$   $\rho = n - m = 2$ ; коэффициенты  $b_i, a_i, d_i, f_i$  предполагаются неизвестными;  $w(t)$  – неизвестное, ограниченное возмущение;  $\varphi(y)$  – неизвестная функция такая, что

$$\varphi(0) = 0,$$

$$0 \leq \frac{|\varphi(y)|}{|y|^\tau} \leq C_0 \text{ или } 0 \leq |\varphi(y)| \leq C_0 |y|^\tau \text{ для всех } y \neq 0,$$

где  $C_0 > 0$  – положительное число, предполагается известным;  $\tau > 0$  – положительное целое число, предполагается известным.

Цель управления: используя измерения только выходной переменной модели (1), найти закон управления, обеспечивающий сходимость выходной траектории нелинейной системы в некоторую область  $\varepsilon_0$ , границы которой могут быть уменьшены за счет соответствующего выбора коэффициентов регулятора.

$$|y(t)| \leq \varepsilon_0 \text{ для некоторого } t \geq t_1. \quad (2)$$

Выдвинем следующие допущения, при которых цель управления будет выполнена.

*Допущение 1.* Измеряется только выходная переменная  $y(t)$ , но не ее производные или вектор состояния системы.

*Допущение 2.* Относительная степень передаточной функции  $\frac{b(p)}{a(p)}$   $\rho = n - m = 2$ .

*Допущение 3.* Будем полагать, что возмущающее воздействие  $w(t)$  и его первая и вторая производные ограничены.

## 2. Синтез алгоритма управления

Выберем закон управления вида

$$u = -\chi(p)(\mu + k)\hat{v}, \quad (3)$$

где коэффициент  $\mu$  (принимает в общем случае достаточно большое значение) и полином  $\chi(p)$  выбираются таким образом, чтобы полином  $\gamma(p) = a(p) + \mu b(p)\chi(p)$  был гурвицевым; функция  $\hat{v}$  формируется алгоритмом оценки вида

$$\dot{\xi} = \sigma(v - \xi), \quad (4)$$

$$\hat{v} = \xi, \quad (5)$$

где функция  $v = y + C_0^2 y^{2\tau-1}$ , а параметр  $k$  и функция  $\sigma$  выбираются в соответствии с требованиями, представленными ниже.

Подставляя (3) в уравнение (1), получаем

$$\begin{aligned} y &= \frac{b(p)}{a(p)}[-\chi(p)(\mu + k)\hat{v}] + \frac{d(p)}{a(p)}\varphi(y) + \frac{f(p)}{a(p)}w(t) = \\ &= \frac{b(p)}{a(p)}[-\chi(p)(\mu + k)v + \chi(p)(\mu + k)\eta] + \frac{d(p)}{a(p)}\varphi(y) + \frac{f(p)}{a(p)}w(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\eta = v - \hat{v}$  – функция отклонения (невязка).

Проводя несложные преобразования, для модели (6) имеем

$$\begin{aligned} a(p)y + \mu\chi(p)b(p)y &= b(p)\chi(p)[(\mu + k)\eta - ky - (\mu + k)C_0^2 y^{2\tau-1}] + \\ &+ d(p)\varphi(y) + f(p)w(t). \end{aligned}$$

Принимая обозначения  $\gamma(p) = a(p) + \mu\chi(p)b(p)$  и  $\beta(p) = \chi(p)b(p)$ , для системы (6) получаем

$$y = \frac{\beta(p)}{\gamma(p)}[-ky - (\mu + k)C_0^2 y^{2\tau-1} + (\mu + k)\eta] + \frac{d(p)}{\gamma(p)}\varphi(y) + \frac{f(p)}{\gamma(p)}w(t). \quad (7)$$

Преобразуем уравнение (7) следующим образом

$$y = \frac{\beta(p)}{\gamma(p)}[-ky - (\mu + k)C_0^2 y^{2\tau-1} + (\mu + k)\eta + \bar{w}(t)] + \frac{d(p)}{\gamma(p)}\varphi(y), \quad (8)$$

где функция  $\bar{w}(t) = \frac{f(p)}{\beta(p)}w(t)$  является гладкой и ограниченной, в силу допущения 3 на сигнал  $w(t)$ .

Представим модель вход-выход (8) в виде модели вход-состояние-выход

$$\dot{x} = Ax + b(-ky - (\mu + k)C_0^2 y^{2\tau-1} + (\mu + k)\eta + \bar{w}(t)) + q\varphi(y), \quad (9)$$

$$y = c^T x, \quad (10)$$

где  $x \in R^n$  – вектор переменных состояния модели (9);  $A$ ,  $b$ ,  $q$  и  $c$  – соответствующие матрицы перехода от модели вход-выход (8) к модели вход-состояние-выход (9), причем в силу гурвицевости полинома  $\gamma(p)$  и строгой минимальной фазовости модели (8), можно указать симметрическую положительно определенную матрицу  $P$ , удовлетворяющую двум следующим матричным уравнениям [9]:

$$A^T P + PA = -Q_1, \quad Pb = c, \quad (11)$$

где  $Q_1 = Q_1^T > 0$ , причем значения матрицы  $Q_1$  зависят от параметра  $\mu$  и не зависят от параметра  $k$ .

Рассмотрим производную от функции отклонений  $\eta$

$$\dot{\eta} = \dot{v} - \sigma(v - \xi). \quad (12)$$

Учитывая, что  $\xi = \hat{v}$  и  $v = y + C_0^2 y^{2\tau-1}$ , для (12) получаем

$$\dot{\eta} = \dot{y} + (2\tau - 1)C_0^2 y^{2\tau-2} \dot{y} - \sigma\eta = -\sigma\eta + \Omega\dot{y}, \quad (13)$$

где  $\Omega = 1 + (2\tau - 1)C_0^2 y^{2\tau-2}$ .

Сформулируем теорему, в которой будут указаны условия на расчет параметра  $k$  и функции  $\sigma$ , обеспечивающих выполнение цели управления (2).

**Теорема.** Существует параметр  $k$  и функция  $\sigma$  такие, что все траектории системы (9), (10), (13) могут быть сведены в любую малую область за счет увеличения параметра  $k$ .

**Доказательство.** Рассмотрим функцию Ляпунова вида

$$V = V_1 + V_2, \quad (14)$$

где

$$V_1 = x^T P x, \quad (15)$$

$$V_2 = \eta^2. \quad (16)$$

Дифференцируя (15) по времени с учетом уравнений (9), (10), получаем

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & x^T (A^T P + PA)x + 2(\mu + k)x^T P b \eta - 2kx^T P b y - 2(\mu + k)C_0^2 x^T P b y^{2\tau-1} + \\ & + 2x^T P b \bar{w} + 2x^T P q \varphi(y), \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя в (17) уравнения (11), а также принимая во внимание соотношения

$$-2kx^T P b y = -2ky^2,$$

$$2(\mu + k)x^T P b \eta = 2(\mu + k)y\eta \leq y^2 + (\mu + k)^2 \eta^2,$$

$$2x^T P q \varphi(y) \leq \delta x^T P q q^T P x + \delta^{-1} [\varphi(y)]^2,$$

$$2x^T P b \bar{w} = 2y\bar{w} \leq ky^2 + \frac{1}{k} \bar{w}^2,$$

для производной от функции Ляпунова (15) получаем

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & x^T (-Q_1 + \delta P q q^T P)x - (k - 1)y^2 + (\mu + k)^2 \eta^2 - \\ & - 2(\mu + k)C_0^2 y^{2\tau} + \delta^{-1} [\varphi(y)]^2 + \frac{1}{k} \bar{w}^2, \end{aligned} \quad (18)$$

где малое число  $\delta > 0$ .

Дифференцируя (16) по времени с учетом уравнений (9), (10) и (13), получаем

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & 2\eta(-\sigma\eta + \Omega\dot{y}) = \\ = & -2\sigma\eta^2 + 2\Omega\eta c^T A x - 2k\Omega\eta c^T b y - 2(\mu + k)\Omega\eta c^T b C_0^2 y^{2\tau-1} + 2(\mu + k)\Omega c^T b \eta^2 + \end{aligned}$$

$$+ 2\eta\Omega c^T b\bar{w} + 2\Omega\eta c^T q\varphi(y), \quad (19)$$

где вместо составляющей  $\dot{y}$  в уравнении (19) было использовано слагаемое

$$\dot{y} = c^T (Ax - kby - (\mu + k)bC_0^2 y^{2\tau-1} + (\mu + k)b\eta + b\bar{w} + q\varphi(y)).$$

Принимая во внимание соотношения

$$\begin{aligned} 2\Omega\eta c^T Ax &\leq \delta^{-1} c^T AA^T c \Omega^2 \eta^2 + \delta x^T x, \\ -2k\Omega\eta c^T by &\leq k^2 (c^T b)^2 \Omega^2 \eta^2 + y^2, \\ 2\Omega\eta c^T q\varphi(y) &\leq k (c^T q)^2 \Omega^2 \eta^2 + k^{-1} [\varphi(y)]^2, \\ -2(\mu + k)\Omega\eta c^T bC_0^2 y^{2\tau-2} y &\leq (\mu + k)^2 (c^T b)^2 \Omega^2 C_0^4 y^{4\tau-4} \eta^2 + y^2, \\ 2\eta\Omega c^T b\bar{w} &\leq k (c^T b)^2 \Omega^2 \eta^2 + k^{-1} \bar{w}^2, \end{aligned}$$

для производной от функции (16) получаем

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -2\sigma\eta^2 + \delta^{-1} c^T AA^T c \Omega^2 \eta^2 + \delta x^T x + k^2 (c^T b)^2 \Omega^2 \eta^2 + y^2 + \\ &+ 2(\mu + k)\Omega c^T b\eta^2 + k (c^T q)^2 \Omega^2 \eta^2 + k^{-1} [\varphi(y)]^2 + \\ &+ (\mu + k)^2 (c^T b)^2 \Omega^2 C_0^4 y^{4\tau-4} \eta^2 + y^2 + k (c^T b)^2 \Omega^2 \eta^2 + k^{-1} \bar{w}^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда для производной от функции Ляпунова (14) получаем

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq x^T (-Q_1 + \delta Pqq^T P + \delta I)x - (k-3)y^2 - \\ &- 2(\mu + k)C_0^2 y^{2\tau} + \delta^{-1} [\varphi(y)]^2 + \frac{2}{k} \bar{w}^2 + \\ &+ (-2\sigma + (\mu + k)^2 + \delta^{-1} c^T AA^T c \Omega^2 + k^2 (c^T b)^2 \Omega^2 + 2(\mu + k)\Omega c^T b + \\ &+ k (c^T q)^2 \Omega^2 + (\mu + k)^2 (c^T b)^2 \Omega^2 C_0^4 y^{4\tau-4} + k (c^T b)^2 \Omega^2 \eta^2 + k^{-1} [\varphi(y)]^2. \end{aligned} \quad (21)$$

Выберем число  $\delta > 0$  таким образом, чтобы следующее неравенство было выполнено:

$$(-Q_1 + \delta Pqq^T P + \delta I) \leq -Q_2, \quad (22)$$

где  $Q_2 = Q_2^T$  – положительно определенная матрица.

Выберем функцию  $\sigma$  так, чтобы выполнялось соотношение

$$\begin{aligned} -2\sigma + (\mu + k)^2 + \delta^{-1} c^T AA^T c \Omega^2 + k^2 (c^T b)^2 \Omega^2 + 2(\mu + k)\Omega c^T b + \\ + k (c^T q)^2 \Omega^2 + (\mu + k)^2 (c^T b)^2 \Omega^2 C_0^4 y^{4\tau-4} + k (c^T b)^2 \Omega^2 \leq -\lambda, \end{aligned} \quad (23)$$

где число  $\lambda > 0$ .

Тогда для производной от функции Ляпунова (14), получаем

$$\dot{V} \leq -x^T Q_2 x - \lambda\eta^2 - (k-3)y^2 - 2(\mu + k)C_0^2 y^{2\tau} + \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{k}\right) \cdot [\varphi(y)]^2 + \frac{2}{k} \bar{w}^2. \quad (24)$$

Учитывая ограничения, налагаемые на нелинейность, для (24) получаем

$$\dot{V} \leq -x^T Q_2 x - \lambda\eta^2 - (k-3)y^2 - 2(\mu + k)C_0^2 y^{2\tau} + \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{k}\right) \cdot C_0^2 y^{2\tau} + \frac{2}{k} \bar{w}^2. \quad (25)$$

Выбирая число  $k$  следующим образом:

$$\begin{cases} k > 3 \\ 2(\mu + k) > \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{k}\right), \end{cases} \quad (26)$$

получаем

$$\dot{V} \leq -x^T Q_2 x - \lambda\eta^2 + \frac{2}{k} \bar{w}^2, \quad (27)$$

Из неравенства (27), в силу ограниченности возмущения  $|w(t)| \leq w_0 < \infty$ , следует, что существует такое число  $k > 3$ , что траектории системы (9), (10), (13) могут быть сведены в некоторую область  $\varepsilon_0$ , что и требовалось доказать.

### 3. Пример

Пусть задан объект управления

$$y = \frac{p+1}{p^3}u + \frac{p+1}{p^3}\varphi(y) + \frac{p^2+p+1}{p^3}w(t), \quad (28)$$

где полиномы  $a(p) = p^3$ ,  $b(p) = p+1$ ,  $d(p) = p+1$  и  $f(p) = p^2 + p + 1$ ; неизвестная нелинейность  $\varphi(y) = y^3 \sin y$ ; ограниченное возмущение  $w(t) = 5 \sin 2t$ .

Результат моделирования объекта управления (28) приведен на рис. 1.

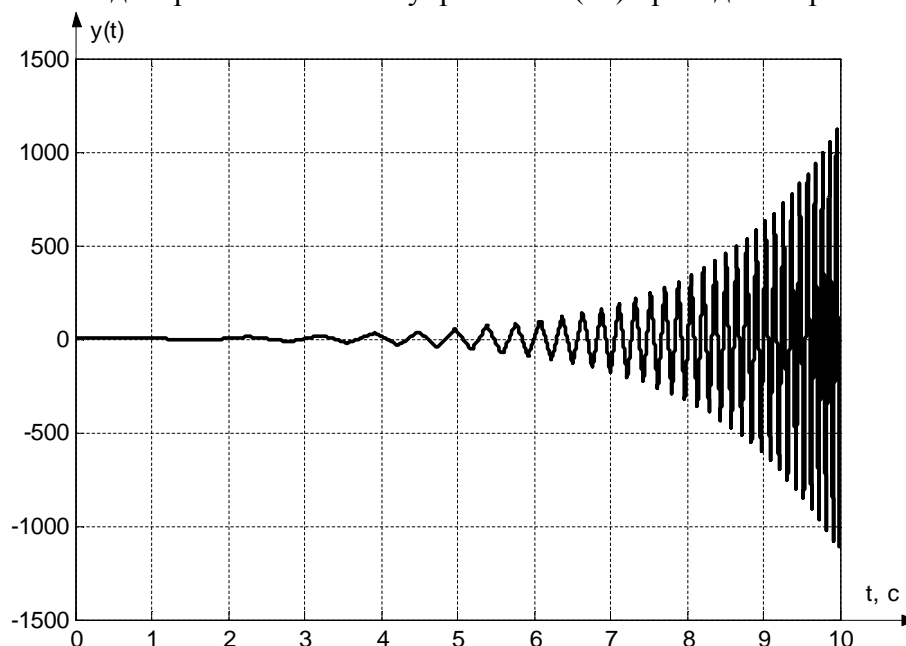


Рис. 1. Переходный процесс в системе (28) при  $y(0) = 1$

Из результата моделирования видно, что система (28) является неустойчивой. Для стабилизации системы воспользуемся предложенным в работе алгоритмом управления (3). Выбирая полином  $\chi(p) = p + 1$ , получаем

$$u = -(p+1)(\mu+k)\hat{v} = -(\mu+k)(\hat{v} + \dot{\hat{v}}), \quad (29)$$

где функция  $\hat{v}$  формируется алгоритмом оценки вида

$$\dot{\xi} = \sigma(v - \xi), \quad (30)$$

$$\hat{v} = \xi, \quad (31)$$

где  $v = y + y^5$ .

Функция  $\sigma$  выбирается, чтобы выполнялось соотношение (23). Выберем функцию  $\sigma$  следующим образом

$$\sigma = (\mu+k)^2 + \left(1 + 2k + k^2 + (\mu+k)^2 y^{4\tau-4}\right)\Omega^2 + 2(\mu+k)\Omega, \quad (32)$$

где  $\Omega = 1 + (2\tau-1)y^{2\tau-2}$ .

Учитывая, что нелинейность ограничена функцией выхода, возведенной в третью степень  $\varphi(y) \leq y^3$ , для (32) получаем

$$\sigma = (\mu + k)^2 + (1 + 2k + k^2 + (\mu + k)^2 y^8) \Omega^2 + 2(\mu + k)\Omega, \quad (33)$$

где  $\Omega = 1 + 5y^4$ .

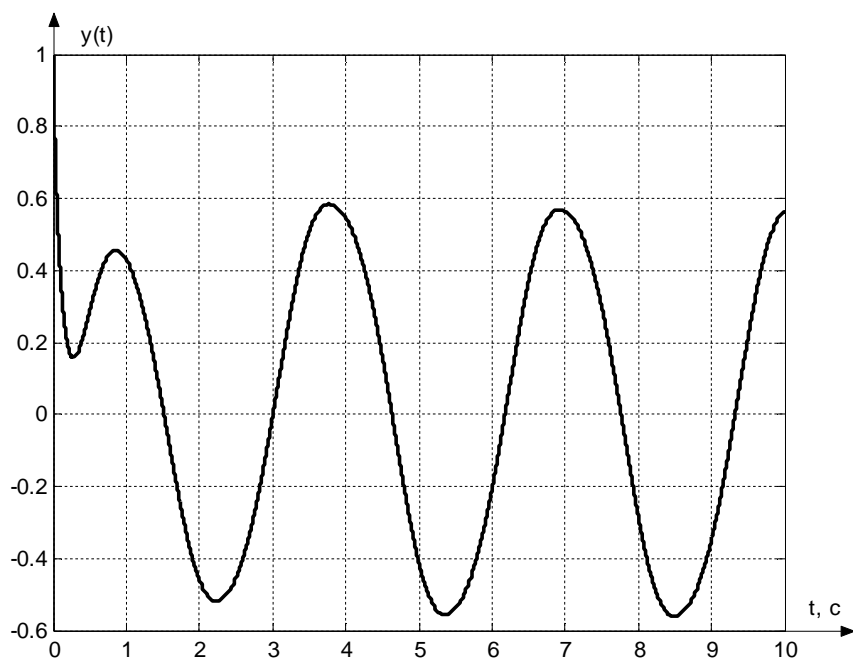


Рис. 2. Переходный процесс в системе (28)-(31), (33) по выходной переменной  $y(t)$  при  $k = 5$  и  $y(0) = 1$

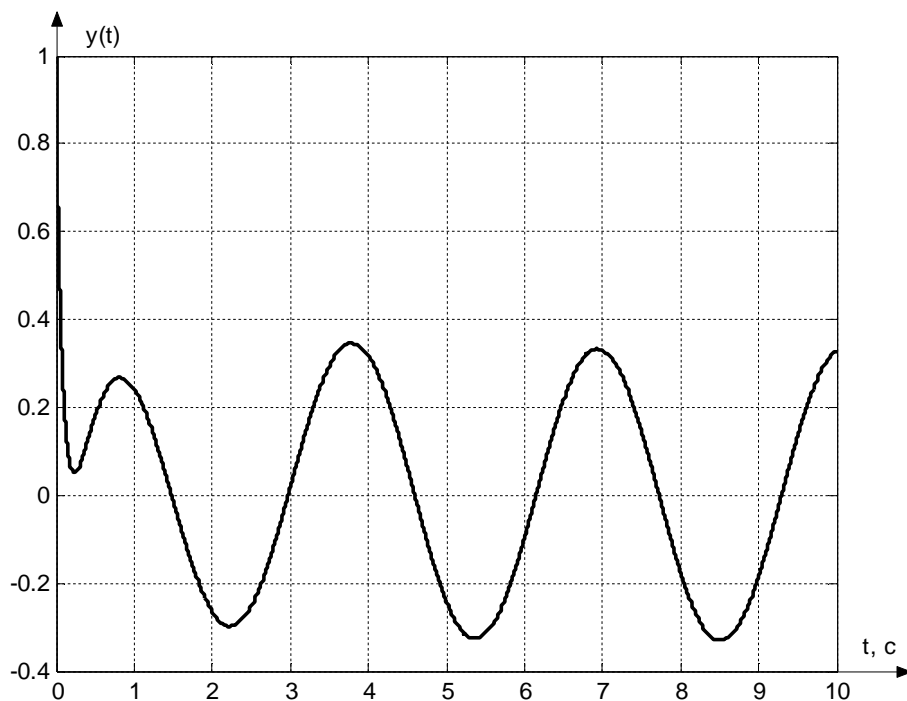


Рис. 3. Переходный процесс в системе (28)-(31), (33) по выходной переменной  $y(t)$  при  $k = 10$  и  $y(0) = 1$



Выберем параметр  $\mu = 2$  и промоделируем систему управления (28)-(31), (33) для различных значений параметра  $k$ . Результаты переходных процессов при ненулевых начальных условиях ( $y(0) = 1$ ) для значений параметров  $k = 5$ ,  $k = 10$ , и  $k = 20$  представлены соответственно на рис. 2-4.

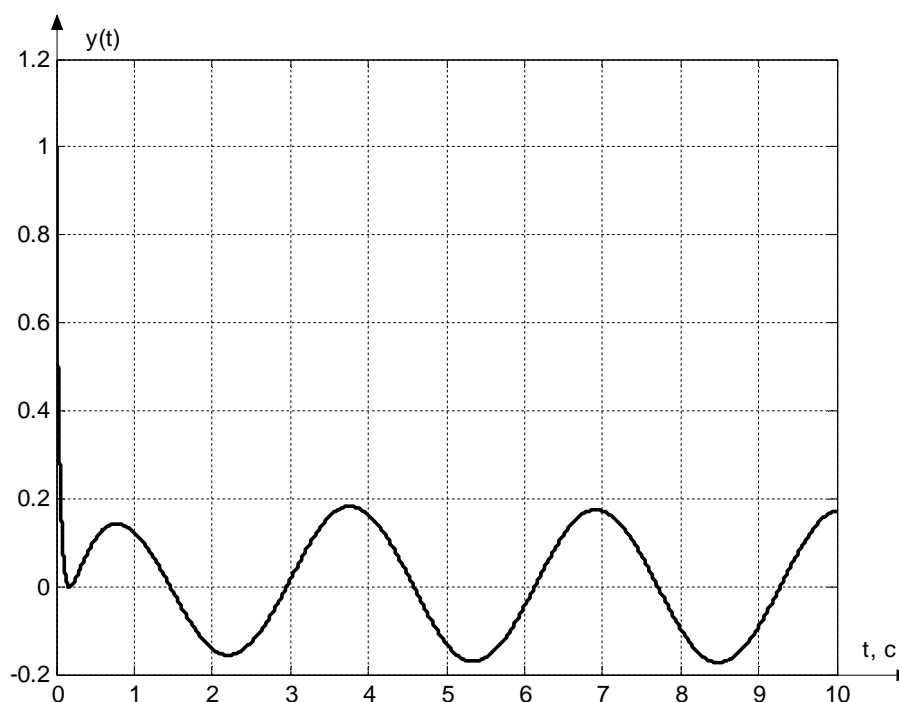


Рис. 4. Переходный процесс в системе (28)-(31), (33) по выходной переменной  $y(t)$  при  $k = 20$  и  $y(0) = 1$

Временные диаграммы иллюстрируют работоспособность предложенного в работе алгоритма управления. Из временных диаграмм видно, что выходная траектория  $y(t)$  системы (28)–(31), (33) ограничена некоторой областью  $\varepsilon_0$ , величина которой, в свою очередь, уменьшается с увеличением параметра регулятора  $k$ .

### Заключение

В работе предложен алгоритм управления нелинейной системой, представляющей собой композицию линейного динамического и нелинейного статического звеньев, в которой нарушены условия согласования нелинейности и управляющего сигнала. Предполагается, что на систему воздействует неизвестное ограниченное возмущение, относительная степень передаточной функции линейной части известна и равна двум, а нелинейность ограничена функцией выхода, возведенной в степень, например,  $\varphi(y) = y^2$ ,  $\varphi(y) = y^3$  и т.д.

В данной работе предлагается схема управления, обеспечивающая сходимость выходной траектории нелинейной системы в некоторую область, границы которой могут быть уменьшены соответствующим выбором параметров регулятора. Регулятор использует информацию о выходной переменной (без измерения производных выходной переменной или вектора состояния объекта управления).

## Литература

1. Arcak M., Kokotovic P. Feasibility conditions for circle criterion design // *Systems and Control Letters*. 2001. V. 42, №. 5. P. 405–412.
2. Arcak M., Larsen M., Kokotovic P. Circle and Popov criteria as tools for nonlinear feedback design. 15th Triennial World Congress of the IFAC. Barcelona. Spain. 2002.
3. Arcak M., Larsen M., Kokotovic P. Circle and Popov criteria as tools for nonlinear feedback design. // *Automatica*. 2003. V.39. №. 4. P. 643–650.
4. Бобцов А.А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // *Автоматика и телемеханика*. 2002. №11. С. 108–117.
5. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Адаптивная стабилизация нелинейной системы с ограниченными функциональными неопределенностями // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. №7. С.5–11.
6. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление неопределенной системой типа лурье с примером стабилизации модели Дуффинга // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. №11. С.2–6.
7. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Стабилизация нелинейной неопределенной системы типа Лурье с минимально-фазовой линейной частью. // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2004.
8. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Адаптивное управление нелинейной системой типа Лурье с неограниченной нелинейностью // *Современные технологии: Сборник научных статей / под. Ред. С.А. Козлова*. СПб: СПбГУ ИТМО.
9. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.

# ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА КОММУТАЦИИ ПОТОКА ЗАЯВОК (ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ИХ МОДЕЛИРОВАНИИ) ПО ВХОДАМ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЕ ВЫРОЖДЕНИЯ

Н.А. Дударенко

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Ушаков

Рассматривается проблема влияния фактора коммутации потока заявок (при гармоническом их моделировании) по входам сложной системы на возможность ее вырождения. Поставленная задача решается с помощью критериальных матриц отношения вход-выход, сконструированных на основе решения матричного уравнения Сильвестра. Для количественной оценки системы используются функционалы вырождения.

## Введение

Теория и практика сложных динамических систем, задействованных в обслуживании заявок, формируемых средой намерений, имеет хорошо зарекомендовавшее себя структурное решение в виде модели Трапезникова В.А. В соответствии с этой моделью сепаратные каналы, образующие сложную систему, должны характеризоваться полосами пропускания, которые по мере перемещения от верхнего канального уровня к нижнему изменяются с расширением их диапазонов. Одновременно межканальные связи должны существовать с соседними каналами. Сложная система, построенная по схеме Трапезникова В.А., функционирует без вырождения, если скорость ввода заявок на вход сепаратного канала согласована с полосой пропускания этого канала [1]. Однако, в реальных условиях, особенно в системах с функциональными антропокомпонентами, могут возникать эксклюзивные ситуации, когда заявка с нижнего уровня коммутируется для обслуживания на каналы верхних уровней. В этом случае ситуация характеризуется тем, что верхние уровни начинают обрабатывать заявки, поступающие на их входы с несвойственными для режима их нормального функционирования интенсивностями, и, если структурный форс-мажор становится нормой, то возникает опасность функционального разрушения системы, т.е. ее вырождения.

Этим проблемам посвящена предлагаемая вниманию научной общественности статья. При этом при моделировании входного потока различной интенсивности используется многочастотный векторный гармонический задающий сигнал.

Вырождение системы понимается в чисто математическом плане как сокращение ранга критериальной матрицы отношения вход-выход. Для плавного контроля изменения ранга используется аппарат сингулярных чисел и построенных на них сепаратных чисел обусловленности и также функционалов вырождения [2].

## Конструирование критериальных матриц отношения вход-выход сложной системы при моделировании потока заявок многочастотным векторным гармоническим воздействием

Конструирование критериальных матриц отношения вход-выход сложной системы будем осуществлять на примере непрерывной системы вида

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t); x(0); y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где  $x$ ,  $g$ ,  $y$  – векторы состояния, задающего воздействия и выхода соответственно:  $x \in R^n$ ;  $g, y \in R^m$ ;  $F, G, C$  – матрицы состояния системы, входа и выхода объекта управления (ОУ), согласованные по размерности с размерностью векторов  $x, g$ , и  $y$  так, что  $F \in R^{n \times n}$ ;  $G, C^T \in R^{n \times m}$ . Рассмотрим поведение системы (1) при конечномерном внешнем воздействии, частным случаем которого является гармоническое.

Источник внешнего конечномерного воздействия зададим в форме автономной непрерывной системы, характеризующейся минимальной реализацией и имеющей представление

$$\dot{z}(t) = Ez(t); z(0); g(t) = Pz(t), \quad (2)$$

где  $z \in R^l$ ,  $E \in R^{l \times l}$ ;  $P \in R^{m \times l}$ ;  $z$  – вектор состояния модели задающего воздействия (МЗВ),  $E$ ,  $P$  – матрицы состояния и выхода МЗВ соответственно, причем матрица  $P$  удовлетворяет условию:  $P \cdot P^T = I$ , где  $I$  – единичная матрица размерности  $m \times m$ . МЗВ выбирается минимальной размерности, но такой, чтобы её выход

$$g(t) = Pz(t), \text{ где } z(t) = e^{Et}z(0) \quad (3)$$

на множестве начальных состояний  $z(0)$  адекватно представлял весь класс конечномерных задающих воздействий системы (1). Для цели дальнейших исследований сформулируем следующие утверждения.

**Утверждение 1.** *Решение системы (1) для переменных состояния  $x(t)$  и выхода  $y(t)$  для случая задающего воздействия  $g(t)$  вида (3) может быть записано в форме:*

$$x(t) = e^{Ft}x(0) + [Te^{Et} - e^{Ft}T]z(0), \quad (4)$$

$$y(t) = Ce^{Ft}x(0) + C[Te^{Et} - e^{Ft}T]z(0), \quad (5)$$

где матрица  $T$  ищется из решения матричного уравнения Сильвестра [3,4]

$$TE - FT = GP. \quad (6)$$

□

**Доказательство** утверждения можно найти в работе [3]. ■

Ограничимся в решениях (4) и (5) вынужденными составляющими движения, которые имеют представления:

$$x(t) = [Te^{Et} - e^{Ft}T]z(0), \quad (7)$$

$$y(t) = C[Te^{Et} - e^{Ft}T]z(0). \quad (8)$$

Для раскрытия содержания использованного приёма оказывается полезным следующее утверждение.

**Утверждение 2.** *Матрица  $T$  решения уравнения Сильвестра (6) представляет собой матрицу подобия (в общем случае обособо), которое связывает установившуюся составляющую вектора  $x(t)$  и вектора  $z(t)$  векторно-матричным соотношением*

$$x(t) = Tz(t). \quad (9)$$

□

**Доказательство** утверждения использует соотношение (7), которое в установившемся режиме в случае гурвицевости матрицы  $F$  принимает вид

$$x(t) = Te^{Et}z(0). \quad (10)$$

Подстановка в (10) второго соотношения (3) приводит к (9). ■

Имеющаяся практика постановки подобных задач [5] показывает, что достаточно полное её решение может быть получено, если «смена» входных заданий с учётом фактора многомерности входа сложной системы моделируется векторным гармоническим воздействием со своими значениями частот  $\omega_j (j = \overline{1, m})$  гармонических воздействий для каждого входа системы. В связи с этим сформулируем следующее утверждение.

**Утверждение 3.** *Для случая многочастотного гармонического задающего воздействия  $g(t)$  описание движения системы (1) по выходу  $y(t)$  в установившемся режиме сводится к линейной алгебраической задаче, записываемой в форме*

$$y(t) = N_y(t, \Omega)z(0), \quad (11)$$

где

$$N_y = CT \text{diag} \left\{ e^{E_{jj}t} = \begin{bmatrix} \cos \omega_j t & \sin \omega_j t \\ -\sin \omega_j t & \cos \omega_j t \end{bmatrix}; j = \overline{1, m} \right\}, \quad (12)$$

$$\Omega = \text{col}(\omega_j, j = \overline{1, m}), \quad (13)$$

матрица  $T$  удовлетворяет уравнению Сильвестра (6). □

**Доказательство** утверждения опирается на соотношения (7), (8) для установившегося движения, а также на прямое вычисление в них матричной экспоненты  $e^{Et}$  для матрицы состояния  $E$  МЗВ (2), записываемой в случае многочастотного гармонического воздействия в форме

$$E = \text{diag} \left\{ E_{jj} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_j \\ -\omega_j & 0 \end{bmatrix}; j = \overline{1, m} \right\}, \quad (14)$$

$$P = I \otimes [1 \ 0],$$

так что  $e^{E_{jj}t} = \begin{bmatrix} \cos \omega_j t & \sin \omega_j t \\ -\sin \omega_j t & \cos \omega_j t \end{bmatrix}; j = \overline{1, m}.$  ■

Поставленная задача приобретает конструктивное решение, если воспользоваться явным решением для матрицы  $T$  уравнения Сильвестра (6). Представим вектор частот  $\Omega$  в форме

$$\Omega = \gamma \omega \quad (15)$$

где  $\gamma = \text{col}\{\gamma_j, j = \overline{1, m}\}$  – вектор фиксированных весовых коэффициентов распределения частот  $\omega_j$  по  $j$ -ым входам системы такой, что  $\omega_j = \gamma_j \omega$ , тогда для случая многомерного одночастотного воздействия частоты  $\omega$  матрица  $T$  приобретет вид:

$$T(\omega) = -[F^2 + \omega^2 I]^{-1} [F \ \omega I] G,$$

а для случая многомерного многочастотного воздействия [2, 5]

$$T(\Omega) = \text{row} \left\{ -[F^2 + \omega_j^2 I]^{-1} [F \ \omega_j I] G_j \right\}, \quad (16)$$

где  $\Omega = \text{col}\{\omega_j = \omega \gamma_j, j = \overline{1, m}\}$ ,  $\gamma_j$  –  $j$ -ый компонент вектора  $\gamma$  распределения частот многочастотного гармонического задающего воздействия по входам системы,  $0 \leq \gamma_j \leq 1$ , который фиксирован во всем диапазоне частоты  $0 \leq \omega \leq \infty$ .

### Технология контроля вырождения

Контроль вырождения сложной динамической системы будем осуществлять с помощью частотных сепаратных чисел обусловленности матрицы отношения вход-выход и функционалов вырождения [2].

**Утверждение 4.** Сепаратные числа обусловленности с индексом  $j$  матрицы отношения вход-выход  $N_y(\Omega)$  при многочастотном векторном задающем воздействии в установившемся режиме являются стационарными по времени и задаются соотношением

$$C_j \{N_y(t, \Omega)\} = C_j \{N_y(\Omega)\}; \quad (17)$$

где  $N_y(\Omega) = CT(\Omega).$  (18)

□

**Доказательство** утверждения использует определение сепаратных чисел обусловленности с индексом  $j$  и свойство сингулярных чисел не менять своего значения

при умножении произвольной матрицы слева или справа на ортогональную матрицу [6]. Такой ортогональной матрицей в выражении (18) для  $N_y(t, \Omega)$  является матрица

$$\text{diag} \left\{ e^{E_{jj}t} = \begin{bmatrix} \cos \omega_j t & \sin \omega_j t \\ -\sin \omega_j t & \cos \omega_j t \end{bmatrix}; j = \overline{1, m} \right\} \text{ так как } (e^{E_{jj}t}) \cdot (e^{E_{jj}t})^T = I \forall t.$$

Таким образом, контроль вырождения сложной системы будем осуществлять с помощью частотных сепаратных чисел обусловленности  $C_{F_j} \{N\}$  и функционалов вырождения  $J_{D_{F_v}} \{N\}$  [2] на классе сформированных параметров тройки матриц ( $G, F, C$ ) системы (1), множестве возможных реализаций вектора  $\gamma$  и значении частоты  $0 \leq \omega \leq \infty$ .

Решение поставленной задачи осуществляется путем фиксации превышения значений сепаратных частотных чисел обусловленности  $C_{F_j} \{N\}$  или функционалов вырождения  $J_{D_{F_v}} \{N\}$  некоторого допустимого уровня  $C_F \{N\}$  или  $J_{D_F} \{N\}$  соответственно. Линейная алгебраическая задача становится близкой к вырожденной, если  $C_{F_j} \{N\}$  превышает значение  $C_F \{N\} = 500 \div 1000$  или  $J_{D_{F_v}}$  превышает значение  $J_{D_F} = 0.001 \div 0.002$  [7].

Тогда контроль вырождения сложных динамических систем может быть произведен в соответствии со следующим **алгоритмом**:

1. Задать векторно-матричное описание сложной динамической системы в форме (1) и зафиксировать ее параметры.
2. Задать допустимый уровень  $C_{F_j} \{N_y(\Omega)\}$  сепаратных частотных чисел обусловленности матрицы  $N_y(\Omega)$  отношения вход-выход исследуемой системы и сконструировать на их основе функционалы вырождения.
3. Задать вектор  $\gamma = \text{col}(\gamma_j, j = \overline{1, m})$  распределения частот гармонического воздействия по входам системы (1).
4. Задать значение частоты  $\omega$ , порождающей вектор  $\Omega = \gamma\omega = \text{col}\{\omega_j = \gamma_j\omega, j = \overline{1, m}\}$  частот гармонического воздействия по входам системы (1).
5. По данным пункта (4) сформировать матрицу состояния  $E$  МЗВ (2).
6. Решить уравнение Сильвестра (6), записываемое в форме  $T(\Omega)E(\Omega) - FT(\Omega) = GP$
7. Вычислить значения сепаратных чисел обусловленности  $C_{F_j} = \{N_y(\Omega)\}$  и функционалов вырождения  $J_{D_{F_v}}$ .
8. Сравнить результат п.7 с заданием п.2 на предмет выполнения неравенства  $C_F \{N_y(\Omega)\} \geq C_{F_j} \{N_y(\Omega)\}$  или  $J_{D_F} \{N_y(\Omega)\} \leq J_{D_{F_v}} \{N_y(\Omega)\}$ . В случае его выполнения – переход к п.9, в противном случае – к п.4.
9. Зафиксировать результаты в виде вектора  $\gamma$  распределения частот по входам и значения частот  $\omega$ , при которых наступает вырождение данного индекса.

### Пример исследования системы с целью оценки фактора коммутации

Рассмотрим непрерывную систему вида

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t); x(0) = 0; y(t) = Cx(t),$$

где

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & -8 & -4 & -2.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 216 & 0 & 0 & -216 & -72 & -12 & -64.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 5832 & 0 & 0 & -5832 & -648 & -36 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 216 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5832 \end{bmatrix}, \quad C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Из приведенных матриц видно, что система имеет три входа и три выхода, каждый сепаратный канал имеет третий порядок, связь соседних каналов с выхода на вход характеризуется положительным знаком (сверху вниз), и отрицательным (снизу вверх), матрицы состояния сепаратных каналов характеризуются распределением мод Баттерворда с характеристическими частотами, соответственно равными  $w_{01} = 2 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_{02} = 6 \text{ с}^{-1}$ ,  $w_{03} = 18 \text{ с}^{-1}$ .

Для оценки влияния фактора коммутации введем в систему дополнительные связи с нижнего канального уровня на верхние, представив их соответствующими коэффициентами передачи  $k_{31}$  и  $k_{32}$ . Структурная схема исследуемой сложной системы приведена на рис. 1.

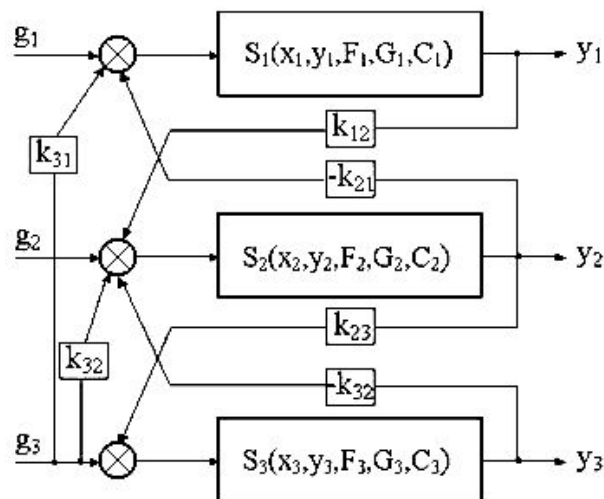


Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы

Проиллюстрируем предложенную технологию контроля вырождения сложной системы для случаев фиксированных параметров на примере векторного многочастотного гармонического воздействия  $g(t)$  с вектором распределения частот вида (15) по-

канально для случая реализации  $\gamma^T = [1 \ 1 \ 1]$  и различных комбинаций коэффициентов передачи межканальных связей. Результаты моделирования зависимостей функционала вырождения  $J_{Dv}$  ( $v=1$ ) от частоты представлены на рис. 2.

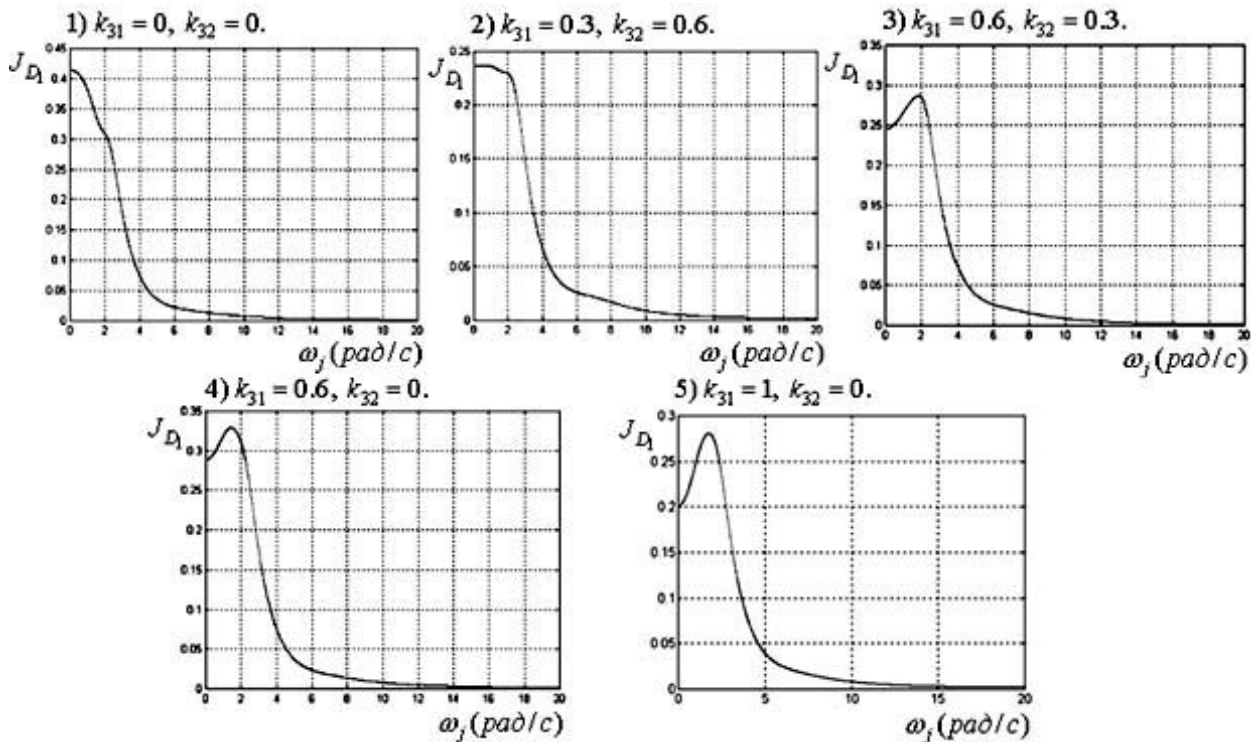


Рис. 2. Зависимости функционала вырождения от частоты для непрерывной системы при векторном многочастотном гармоническом воздействии для различных комбинаций коэффициентов передачи межканальных связей

В случае, когда заявка с нижнего уровня коммутируется для обслуживания на каналы верхних уровней ситуация складывается таким образом, что верхние уровни начинают обрабатывать заявки, поступающие на их входы, с несвойственными для режима их нормального функционирования интенсивностями, и появляется риск вырождения системы.

Полученные кривые дают богатую информацию для интерпретации результатов эксперимента. При фиксированных системных параметрах они позволяют указать рациональное распределение входного сигнала по отдельным входам, гарантирующее нормальное функционирование сложной системы.

## Заключение

Предложенные технологии контроля вырождения сложных динамических систем при гармоническом воздействии позволяют решить задачу не только рациональной загрузки каналов, но и в классе параметрических возможностей указать рациональное сочетание знаков и значений канальных параметров и межканальных связей.

## Литература

1. Dudarenko N. Degeneration control of complex dynamic systems. Preprints of 10th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad), St.-Petersburg, Russia, 2004, SPb: SPSUITMO, 2004.
2. Дударенко Н.А., Ушаков А.В. Технология контроля вырождения сложных динамических систем с помощью частотных отдельных чисел обусловленности.//Современные технологии: Сборник статей/Под ред. С.А. Козлова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2003. 298 с.
3. Уонем М. Линейные многомерные системы. Геометрический подход. М.: Наука, 1980.



4. Икрамов Х. Д. Численное решение матричных уравнений./Под ред. Д. К. Фадеева. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
5. Akunova A., Akunov T.A., Ushakov A.V. Degeneration of complex systems under multyfraquent input signal// Proceedings of Second International Conference «Control of oscillations and chaos» (COC' 2000). St. Petersburg, Russia. 2000.
6. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984.
7. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления./Пер. с англ. М.: Мир, 1999.

# СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХПРИВОДНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОХОЖДЕНИЯ «ВОРОТ»

А. В. Аржаник

Научный руководитель - к.т.н., доцент А. В. Лямин

Рассматривается проблема синтеза системы управления движением двухприводного мобильного робота, функционирующего в среде, оборудованной инфракрасными маяками. Решена задача траекторного управления, обеспечивающая желаемое движение робота вдоль заданной траектории. Разработан нелинейный регулятор на основе использования аппарата нечеткой логики, реализующий прохождение роботом «ворот», образованных двумя излучающими маяками.

## Введение

Данная статья посвящена описанию алгоритмов управления двухприводным мобильным роботом, предназначенным для функционирования в среде со световыми маяками. Использование активных маяков, включаемых по определенной программе, позволяет ставить перед роботом разнообразные задачи, сложность которых может варьироваться в широких пределах – от простого наведения на маяк до маневрирования между группой активных маяков [1]. Для решения поставленных задач применяются различные методы: рекуррентная фильтрация и слежение за фиктивным маяком, движущимся вдоль предварительно спланированной траектории; создание виртуального полигона, используемого для навигации робота и запоминания координат маяков; построение карт местности и др.[2]. Однако при движении робота в условиях неопределенности, вызванной нечеткостью поставленных перед ним задач, неоднозначностью интерпретирования текущей ситуации, уместно использование методов управления на основе нечеткой логики. Предлагаемая система управления включает алгоритм решения задачи обеспечения движения по заданной траектории и регулятор на основе применения теории нечеткой логики, реализующий планирование движением робота при прохождении «ворот», образованных двумя излучающими маяками.

## Структура системы управления

С подробным описанием конструкции и системы технического зрения рассматриваемого мобильного робота можно ознакомиться в [1, 3]. Структурная схема системы управления мобильным роботом представлена на рис. 1, где ОУ – объект управления, Р – регулятор, ЗУ – задающее устройство, СТЗ – система технического зрения мобильного робота,  $g_i$  – воздействия среды,  $\omega$  – угловая скорость робота,  $u_i$  – управляющее воздействие,  $\gamma_i$  – угол, под которым виден маяк,  $\rho_i$  – расстояние до маяка,  $\alpha^*$ ,  $\rho^*$  – параметры движения, определяемые ЗУ в зависимости от конкретной решаемой задачи.

Система технического зрения предоставляет параметры обнаруженных маяков –: расстояние до маяка  $\rho_i$  и угол, под которым виден маяк  $\gamma_i$ , определяемый как угол между продольной осью робота и направлением на маяк. В данной статье для упрощения предполагаем, что система действует в условиях отсутствия влияния внешней среды, т.е. полученные от СТЗ данные не искажены помехами.

Все задания для мобильного робота связаны с прохождением некоторой трассы, задаваемой маяками. Среди задач управления движением робота можно выделить две основные:

- движение в заданную точку, положение которой определяется установленным на полигоне излучающим маяком (наведение на маяк);
- движение вокруг маяка.

Любое упражнение можно представить комбинацией из этих задач.

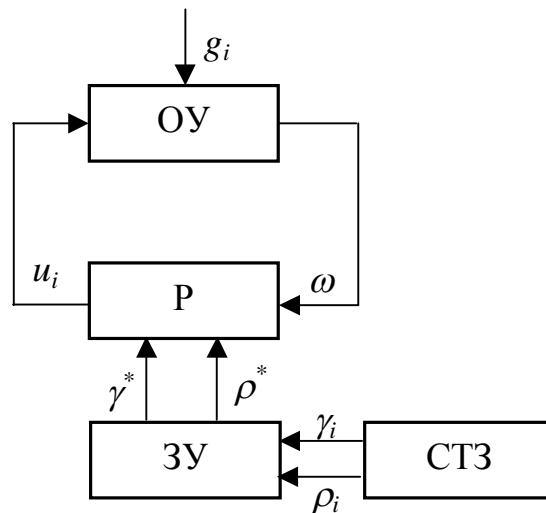


Рис. 1. Структурная схема системы управления робота

Регулятор вырабатывает управляющие воздействия, обеспечивающие перемещение робота в рабочем пространстве по заданной траектории: по прямой при движении на маяк или по окружности при движении вокруг маяка. Задающее устройство определяет тип текущей решаемой задачи и формирует соответствующую траекторию движения на основании данных, полученных от СТЗ. Далее задающее устройство передает регулятору необходимые значения параметров движения и тип решаемой задачи (движение на маяк или вокруг маяка).

Рассмотрим алгоритм планирования траектории движения мобильного робота при прохождении «ворот», образованных двумя активными маяками М1 и М2. Эта задача, очевидно, аналогична задаче движения на маяк, но двигаться роботу нужно по биссектрисе угла между маяками (рис. 2).

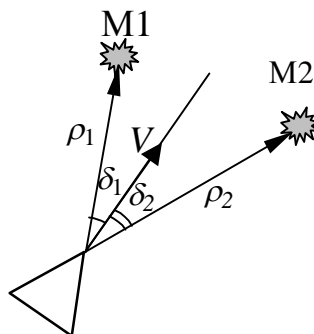


Рис. 2. Прохождение роботом «ворот»

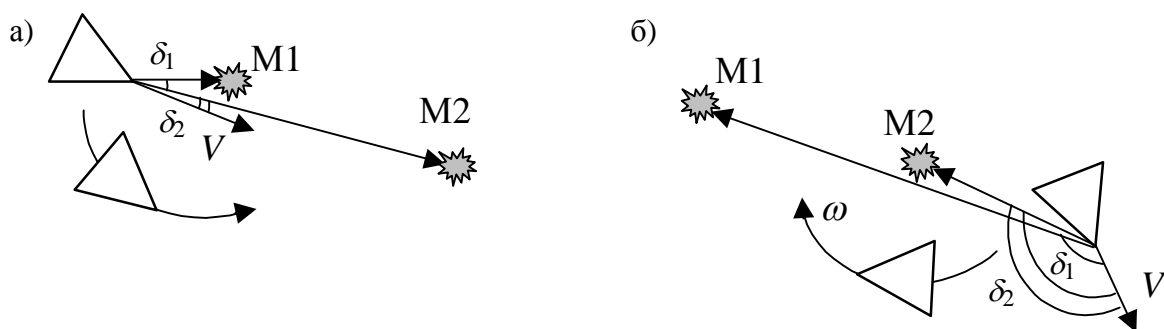


Рис. 3. Варианты движения робота при прохождении «ворот» в зависимости от начального положения

Однако возможны и такие начальные положения робота относительно «ворот», при которых траектория движения, построенная по указанному алгоритму, пройдет в непосредственной близости от одного из маяков (рис. 3), при этом существует большая вероятность, что маяк может быть сбит, а это при выполнении данного упражнения недопустимо. В таких случаях робот сначала совершает вращение вокруг ближайшего маяка, затем при достижении удобной позиции проходит «ворота».

### Управление траекторным движением

Основной задачей подвижных роботов является рассматриваемая здесь траекторная задача – перемещение в рабочем пространстве (плоскости) по предписанной траектории.

Кинематическая модель мобильного робота имеет следующий вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= T^T(\alpha)V, \\ \dot{\alpha} &= \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

$\alpha$  - угол, определяющий ориентацию робота в абсолютной системе координат,  $V = \text{col}(V_1, V_2)$  - вектор линейной скорости робота,  $\omega$  - угловая скорость (рис. 4),

$$T(\alpha) = \begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix} \quad \text{— ортогональная матрица, которая определяет базис}$$

$(\tau_1(\alpha), \tau_2(\alpha))$ , связанный с роботом, и удовлетворяющая дифференциальному уравнению

$$\dot{T}(\alpha) = \omega ET(\alpha), \quad (2)$$

где  $E = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$  - кососимметрическая матрица.

При рассмотрении движения без проскальзывания  $V_2 = 0$  модель (1) принимает вид более простой вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= V_1 \cos \alpha, \\ \dot{y}_2 &= V_1 \sin \alpha, \\ \dot{\alpha} &= \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

Связь между линейной скоростью робота, угловой скоростью вращения платформы и продольными скоростями колес  $V_1^j$  определяется выражениями

$$V_1 = \frac{1}{2}(V_1^1 + V_1^2), \quad (4)$$

$$\omega = -\frac{(V_1^1 - V_1^2)}{l}, \quad (5)$$

где  $l$  – расстояние между колесами робота.

Будем считать, что робот движется с постоянной линейной скоростью, а управление осуществляется только по каналу угловой скорости.

Перемещение робота в пространстве описывается непрерывной траекторией (трассой), которая может быть представлена в виде отрезков, каждый из которых является сегментом гладкой плоской кривой  $S$ . Определим на кривой  $S$  ортонормированный базис  $(\tau_1(\alpha^*), \tau_2(\alpha^*))$  (базис Френе [4]), как показано на рис. 5, где угол  $\alpha^*$  определяет желаемую ориентацию робота.

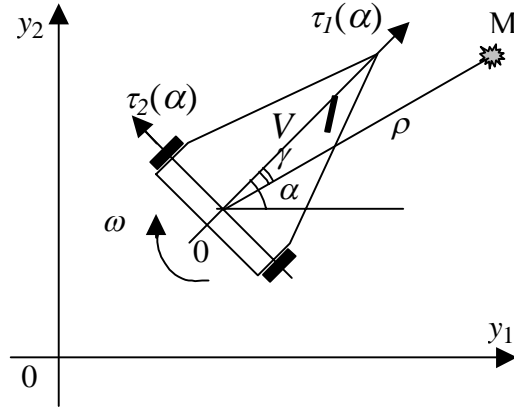


Рис. 4. Системы координат мобильного робота

Введем в рассмотрение следующие задачно-ориентированные переменные робота (рис. 5):

$s$  – криволинейная абсцисса, характеризует путь, пройденный роботом вдоль кривой;

$\varepsilon$  – поперечное отклонение от траектории (ошибка положения);

$\delta = \alpha - \alpha^*$  – угловое отклонение (ошибка угловой ориентации).

Векторы  $\tau_1(\alpha^*)$  и  $\tau_2(\alpha^*)$  формируют ортогональную матрицу

$$T(\alpha^*) = \begin{pmatrix} \tau_1^T(\alpha^*) \\ \tau_2^T(\alpha^*) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha^* & \sin \alpha^* \\ -\sin \alpha^* & \cos \alpha^* \end{pmatrix}, \quad (6)$$

которая удовлетворяет дифференциальному уравнению Френе [4, 5]

$$\dot{T}(\alpha^*) = \xi(s) \dot{s} E T(\alpha^*),$$

$\xi = \xi(s)$  – кривизна кривой  $S$ .

Уравнение (4) можно привести к простой скалярной форме [4]

$$\dot{\alpha}^* = \xi(s) \dot{s} \quad (7)$$

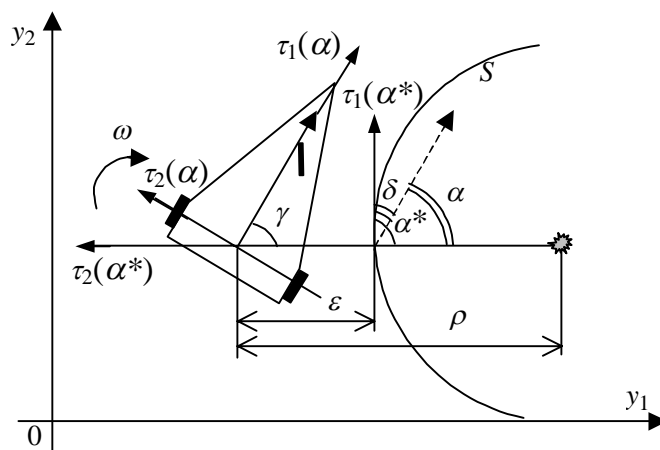


Рис. 5. Колесный робот и отрезок кривой  $S$

Задача управления траекторным движением формируется следующим образом. Требуется определить алгоритмы формирования управляющих воздействий, которые обеспечивают:

- компенсацию ошибок  $\varepsilon$ ,  $\delta$  и стабилизацию их нулевых значений;

- желаемый режим движения робота вдоль кривой, т.е. поддержание постоянной скорости движения  $\dot{s} = V_1^* = const$ .

Преобразуем модель (1) к задачно-ориентированной (траекторной) форме, в которой выходными переменными являются определенные выше переменные  $s, \varepsilon, \delta$ , а входными – специально выбранные управляющие воздействия, обеспечивающие поставленную задачу управления. Для этого необходимо продифференцировать по времени введенные задачно-ориентированные переменные. Из рис. 5 находим:

$$\dot{\varepsilon} = V_1 \cos \gamma \quad (8)$$

$$\gamma = 90^\circ - \delta; \Rightarrow \dot{\gamma} = -\dot{\delta} \quad (9)$$

Так как  $\delta = \alpha - \alpha^*$ , то, учитывая уравнения (3) и (7),

$$\dot{\delta} = \omega - \xi \dot{s} \Rightarrow \dot{\gamma} = \xi \dot{s} - \omega \quad (10)$$

При достаточно малых отклонениях робота от желаемой траектории движения  $S$  задачно-ориентированная модель робота принимает вид

$$\dot{s} = V_1^* = u_s, \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{s} \gamma, \quad (12)$$

$$\dot{\gamma} = \xi \dot{s} - \omega = \xi \dot{s} - u_\varepsilon, \quad (13)$$

где  $u_s$  и  $u_\varepsilon$  – продольное и относительное управления соответственно.

Уравнение (11) определяет продольную динамику робота, а уравнения (12) и (13) – поперечную и угловую динамику.

Задача организации движения мобильного робота по заданной траектории с постоянной скоростью  $V_1^* = const$  может быть решена за счет выбора следующих законов управления

$$u_s = V_1^*, \quad (14)$$

$$u_\varepsilon = -\xi u_s - \frac{k_\varepsilon}{V_1^*} \varepsilon - \frac{k_\gamma}{V_1^*} \gamma, \quad (15)$$

где  $k_\varepsilon$  и  $k_\gamma$  – положительные коэффициенты обратных связей.

Алгоритмы (14) и (15) обеспечивают движение с заданной продольной скоростью, а также асимптотическое стремление к нулю ошибки положения и угловой ориентации.

## Планирование движения мобильного робота

Рассмотрим формирование законов движения мобильного робота на основе использования нечеткой логики. Такой математический аппарат позволяет описывать и исследовать сложные, «плохо определенные системы». В таких системах наряду со строгими, объективными, количественными данными и результатами присутствуют неоднозначные, субъективные, качественные данные и результаты, что требует новых подходов. Нечеткая логика позволяет определять промежуточные значения между стандартными оценками *Да/Нет*, *Истина/Ложь* и т.д. Основная идея этого подхода состоит в использовании знаний экспертов об объекте управления, выраженных в виде некоторых правил, связывающих измерения и управления.

Основным понятием нечетких систем является нечеткое множество.

**Определение.** *Нечетким подмножеством*  $A$  множества  $U$  называется пара  $(U, \mu_A)$ , где  $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$  – функция, каждое значение которой  $\mu_A(x) \in [0, 1]$  интерпретируется как степень принадлежности точки  $x \in U$  множеству  $A$ . Функция  $\mu_A$  называется *функцией принадлежности* множества  $A$ .

Для обычного «четкого» множества  $B$  можно положить:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1, & x \in B \\ 0, & x \notin B \end{cases} \quad (16)$$

т.е. классическое понятие множества является частным случаем нечеткого.

Для представления экспертных данных в формализованном виде вводится понятие *нечеткой лингвистической переменной*. Для нечеткой лингвистической переменной  $L$  вводится набор значений  $T_k$ , называемых *термами* лингвистической переменной. Значение нечеткой лингвистической переменной (обозначается  $L = \{T_k / \mu_k^L, k = 1, \dots, p\}$ ) определяется по значению связанной с ней переменной  $x \in U$  через значения функций принадлежности в точке  $x$ :

$$L = \{T_k / \mu_k^L, k = 1, \dots, p\} : \mu_k^L = \mu_k(x) \quad (17)$$

Таким образом, при заданных термах значение нечеткой лингвистической переменной можно представить в виде набора чисел, каждое из которых соответствует одному терму и выражает степень уверенности в том, что текущее значение переменной  $x$  может быть описано этим термом.

Обратный переход от нечеткой лингвистической переменной к числовому значению может быть выполнен различными способами. Для целей управления чаще всего определяют центр тяжести нечеткого множества.

При построении нечеткого логического регулятора для выбранных входных  $y_i$  и выходных  $u_j$  переменных вводятся соответствующие лингвистические переменные  $Y_i$  и  $U_j$ . Для каждой лингвистической переменной экспертом должны быть заданы множество термов и функции принадлежности каждого терма. Функции принадлежности могут иметь произвольную форму, однако в практике построения нечетких логических регуляторов обычно используют кусочно-линейные функции принадлежности. По значениям входных переменных  $y_i$  через соотношения (17) определяются значения нечетких лингвистических переменных  $Y_i$  (процесс фаззификации).

Следующий этап связан с формированием таблицы экспертных правил, которые записываются в виде:  $\langle Y_1 = T_{k_1}^{Y_1} \text{ и } Y_2 = T_{k_2}^{Y_2} \text{ и } \dots \text{ и } Y_n = T_{k_n}^{Y_n} \rangle$ , то  $\langle U_1 = T_{k_1}^{U_1} \text{ и } U_2 = T_{k_2}^{U_2} \text{ и } \dots \text{ и } U_m = T_{k_m}^{U_m} \rangle$ . Правила могут быть сведены в таблицу соответствия, связывающую входные и выходные лингвистические переменные. Значения нечетких логических переменных, характеризующих управления, определяются из принципа обобщения.

Вычисляя степень принадлежности для всех термов каждой из выходных переменных, получают нечеткие лингвистические значения для всех переменных  $U_j$ . Далее осуществляется переход от нечетких лингвистических переменных  $U_j$  к четким числовым значениям  $u_j$ .

Перейдем к построению нечеткого логического регулятора, обеспечивающего прохождение роботом «ворот» независимо от его исходной ориентации и положения.

Согласно процедуре синтеза нечеткого регулятора [6] определим входные и выходные переменные и соответствующие им лингвистические переменные. В качестве входного множества примем информацию, поступающую с датчиков системы технического зрения, т.е. множество пар сигналов  $(\rho_i, \gamma_i)$  о положении маяков.

Лингвистическая переменная  $Y_1 = \text{РАССТОЯНИЕ ДО МАЯКОВ}$  может принимать значения БЛИЗКО, СРЕДНЕ и ДАЛЕКО.

При некоторых положениях робота сигналы, пришедшие с маяков, образующих «ворота», могут располагаться слишком близко или вообще сливаться. В таких случаях робот может, например, пару маяков принять за один. Поэтому при выполнении таких

задач как «ворота», «восьмерка» более существенной является не информация о каждом отдельном угле направления на маяк, а информация о разности этих углов  $\Delta = \gamma_1 - \gamma_2$ , которая позволяет судить о расстоянии между маяками, образующими «ворота». Примем в качестве второй входной лингвистической переменной  $Y_2 =$  РАЗНОСТЬ УГЛОВ НАПРАВЛЕНИЯ НА МАЯКИ с термами БОЛЬШАЯ, МАЛАЯ, НУЛЕВАЯ.

На выходе будем определять желаемое движение робота:  $U_1 =$  ЖЕЛАЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ РОБОТА, термы: ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК, ВРАЩЕНИЕ ВОКРУГ МАЯКА.

В простейшем случае желаемым движением робота можно управлять с помощью дискретной переменной, принимающей два значения: «0» соответствует движению на маяк, «1» - вращению вокруг маяка.

Функции принадлежности термов всех введенных лингвистических переменных приведены на рис. 6.

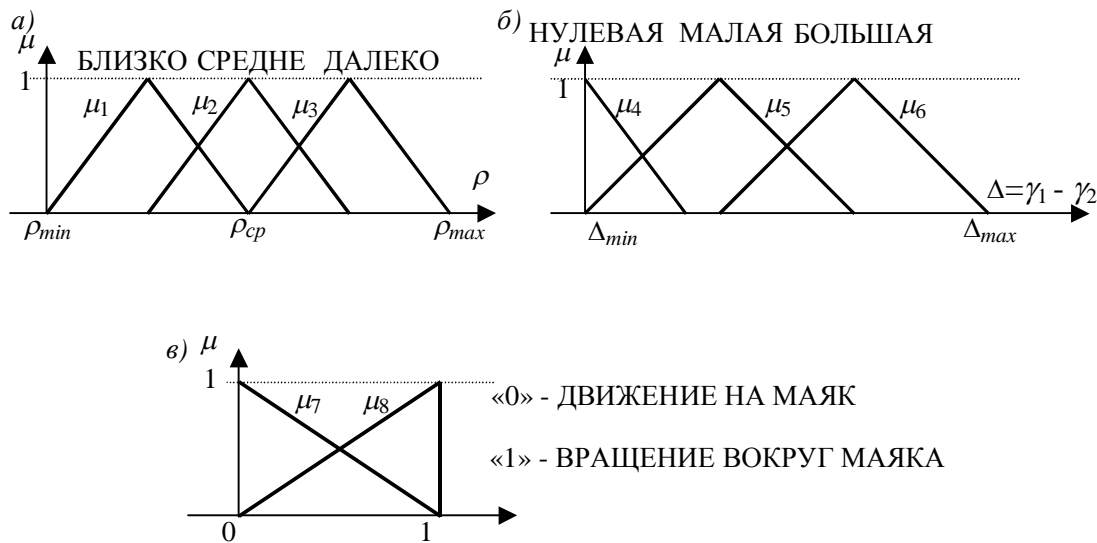


Рис. 6. Функции принадлежности термов для переменных а) - РАССТОЯНИЕ ДО МАЯКОВ; б) - РАЗНОСТЬ УГЛОВ НАПРАВЛЕНИЯ НА МАЯКИ; в) - ЖЕЛАЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ РОБОТА

Определим правила преобразования входного множества в выходное:  $(Y_1 = \text{«ДАЛЕКО» и } Y_2 = \text{«БОЛЬШАЯ» или } Y_2 = \text{«МАЛАЯ» или } Y_2 = \text{«НУЛЕВАЯ»}) \rightarrow U_1 = \text{«ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК»}$   
 $((Y_1 = \text{«БЛИЗКО» или } Y_1 = \text{«СРЕДНЕ»}) и (Y_2 = \text{«МАЛАЯ» или } Y_2 = \text{«НУЛЕВАЯ»})) \rightarrow U_1 = \text{«ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК»}$   
 $((Y_1 = \text{«БЛИЗКО» или } Y_1 = \text{«СРЕДНЕ»}) и Y_2 = \text{«БОЛЬШАЯ»}) \rightarrow U_1 = \text{«ВРАЩЕНИЕ ВОКРУГ МАЯКА»}$

В соответствии с введенными правилами, используя свойства операций над нечеткими множествами [6], запишем метод пересчета для функций принадлежности выходной переменной:

$$\mu_7 = \min(\mu_3, \max(\mu_4, \mu_5, \mu_6)) + \min(\max(\mu_1, \mu_2), \max(\mu_4, \mu_5))$$

$$\mu_8 = \min(\max(\mu_1, \mu_2), \mu_6)$$

Переход от нечеткой выходной лингвистической переменной к ее числовому значению осуществляется через определение арифметического средне взвешенного [6]:

$$U = \frac{\sum_{k=1}^p \mu_k^L \mu_k(x)}{\sum_{k=1}^p \mu_k^L} \quad (18)$$



В случае использования дискретного выхода формула (18) принимает вид

$$U = \frac{\mu_7 \cdot u_0 + \mu_8 \cdot u_1}{u_0 + u_1} = \mu_8 \quad (19)$$

Структурная схема нечеткого логического регулятора, реализующего алгоритм прохождения роботом «ворот», представлена на рис. 7.

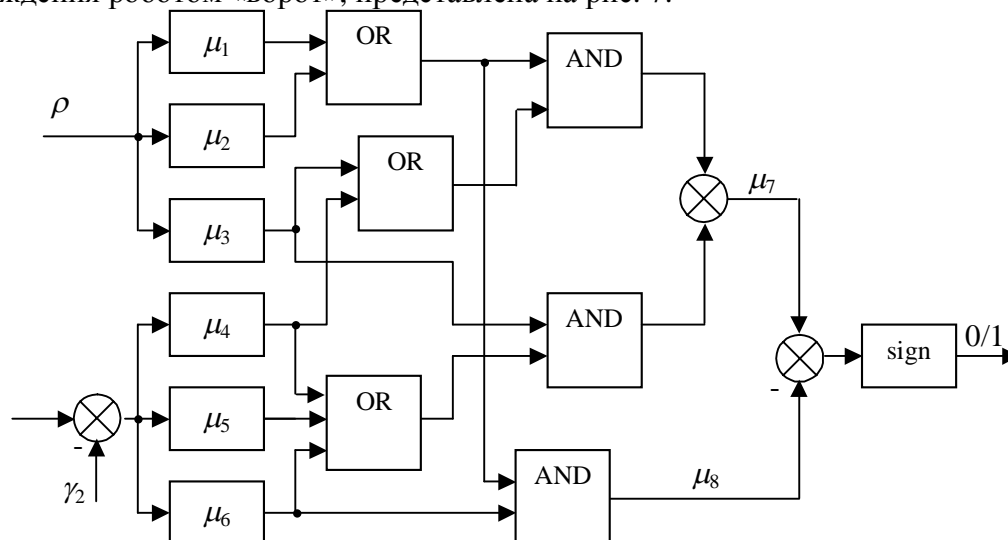


Рис. 7. Структура нечеткого логического регулятора

## Заключение

Описанная процедура построения системы управления двухприводным мобильным роботом включает следующие этапы: построение задачно-ориентированной модели робота, синтез алгоритмов, обеспечивающих стабилизацию робота относительно заданной траектории и поддержание требуемой скорости перемещения, а также разработка нелинейного регулятора с применением теории нечеткой логики, реализующего планирование движением робота при прохождении «ворот», образованных двумя инфракрасными маяками. Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики позволяет строить алгоритмы управления, обеспечивающие устойчивое и качественное управление сложными динамическими объектами.

## 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. Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы научной школы-конференции (Москва, 5 – 6 декабря 2000 г.). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – 288 с.
3. Аржаник А.В. Система технического зрения мобильного робота. // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – с. 97 – 102
4. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. – СПб.: Наука, 2001. – 227 с., ил. 91
5. Бобцов А.А., Дударенко Н.А., Лямин А.В. Траекторное управление двухприводным роботом с использованием методов адаптации и самообучения // Мобильные роботы и мехатронные системы: Доклады научной школы-конференции. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. - с. 114-126
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986

# СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХПРИВОДНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОХОЖДЕНИЯ «ВОРОТ»

А.В. Аржаник

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

Рассматривается проблема синтеза системы управления движением двухприводного мобильного робота, функционирующего в среде, оборудованной инфракрасными маяками. Решена задача траекторного управления, обеспечивающая желаемое движение робота вдоль заданной траектории. Разработан нелинейный регулятор на основе использования аппарата нечеткой логики, реализующий прохождение роботом «ворот», образованных двумя излучающими маяками.

## Введение

Данная статья посвящена описанию алгоритмов управления двухприводным мобильным роботом, предназначенным для функционирования в среде со световыми маяками. Использование активных маяков, включаемых по определенной программе, позволяет ставить перед роботом разнообразные задачи, сложность которых может варьироваться в широких пределах – от простого наведения на маяк до маневрирования между группой активных маяков [1]. Для решения поставленных задач применяются различные методы: рекуррентная фильтрация и слежение за фиктивным маяком, движущимся вдоль предварительно спланированной траектории; создание виртуального полигона, используемого для навигации робота и запоминания координат маяков; построение карт местности и др.[2]. Однако при движении робота в условиях неопределенности, вызванной нечеткостью поставленных перед ним задач, неоднозначностью интерпретирования текущей ситуации, уместно использование методов управления на основе нечеткой логики. Предлагаемая система управления включает алгоритм решения задачи обеспечения движения по заданной траектории и регулятор на основе применения теории нечеткой логики, реализующий планирование движением робота при прохождении «ворот», образованных двумя излучающими маяками.

## Структура системы управления

С подробным описанием конструкции и системы технического зрения рассматриваемого мобильного робота можно ознакомиться в [1, 3]. Структурная схема системы управления мобильным роботом представлена на рис. 1, где ОУ – объект управления, Р – регулятор, ЗУ – задающее устройство, СТЗ – система технического зрения мобильного робота,  $g_i$  – воздействия среды,  $\omega$  – угловая скорость робота,  $u_i$  – управляющее воздействие,  $\gamma_i$  – угол, под которым виден маяк,  $\rho_i$  – расстояние до маяка,  $\alpha^*$ ,  $\rho^*$  – параметры движения, определяемые ЗУ в зависимости от конкретной решаемой задачи.

Система технического зрения предоставляет параметры обнаруженных маяков – расстояние до маяка  $\rho_i$  и угол, под которым виден маяк  $\gamma_i$ , определяемый как угол между продольной осью робота и направлением на маяк. В данной статье для упрощения предполагаем, что система действует в условиях отсутствия влияния внешней среды, т.е. полученные от СТЗ данные не искажены помехами.

Все задания для мобильного робота связаны с прохождением некоторой трассы, задаваемой маяками. Среди задач управления движением робота можно выделить две основные:

- движение в заданную точку, положение которой определяется установленным на полигоне излучающим маяком (наведение на маяк);
- движение вокруг маяка.

Любое упражнение можно представить комбинацией из этих задач.

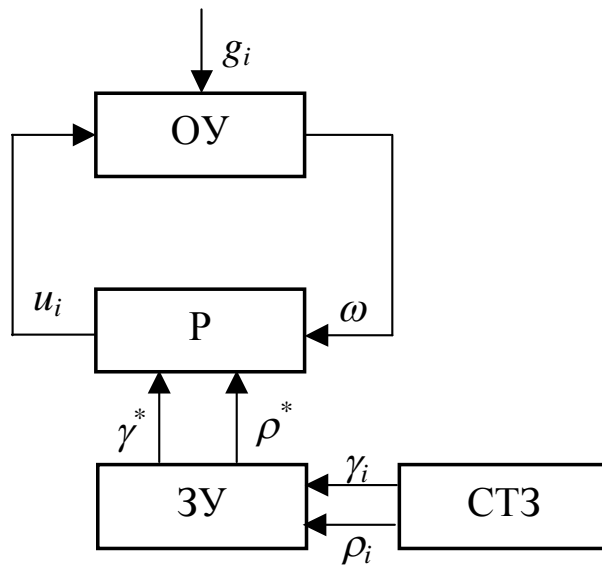


Рис. 1. Структурная схема системы управления робота

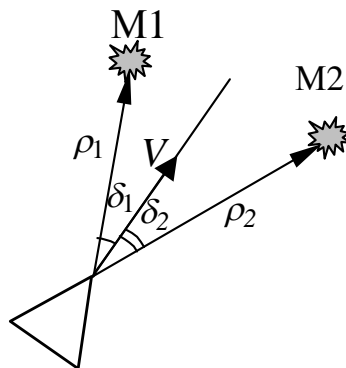


Рис. 2. Прохождение роботом «ворот»

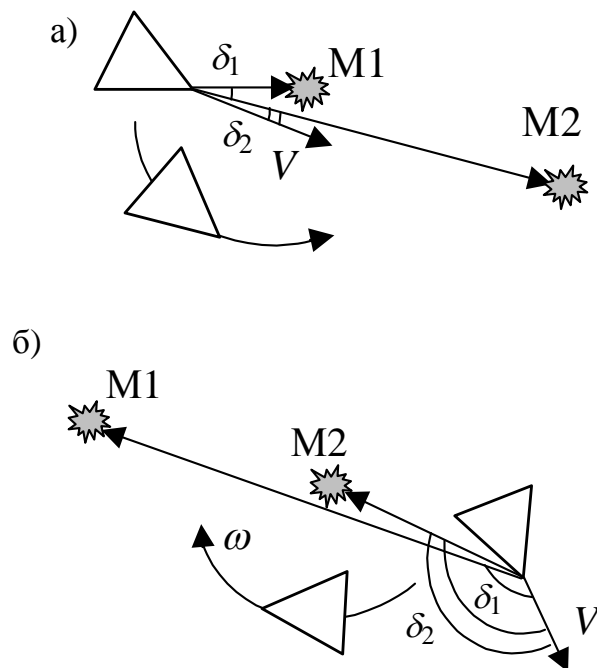


Рис. 3. Варианты движения робота при прохождении «ворот» в зависимости от начального положения

Регулятор вырабатывает управляющие воздействия, обеспечивающие перемещение робота в рабочем пространстве по заданной траектории – по прямой при движении на маяк или по окружности при движении вокруг маяка. Задающее устройство определяет тип текущей решаемой задачи и формирует соответствующую траекторию движения на основании данных, полученных от СТЗ. Далее задающее устройство передает регулятору необходимые значения параметров движения и тип решаемой задачи (движение на маяк или вокруг маяка).

Рассмотрим алгоритм планирования траектории движения мобильного робота при прохождении «ворот», образованных двумя активными маяками М1 и М2. Эта задача, очевидно, аналогична задаче движения на маяк, но двигаться роботу нужно по биссектрисе угла между маяками (рис. 2).

Однако возможны и такие начальные положения робота относительно «ворот», при которых траектория движения, построенная по указанному алгоритму, пройдет в непосредственной близости от одного из маяков (рис. 3), при этом существует большая вероятность, что маяк может быть сбит, а это при выполнении данного упражнения недопустимо. В таких случаях робот сначала совершает вращение вокруг ближайшего маяка, затем при достижении удобной позиции проходит «ворота».

### Управление траекторным движением

Основной задачей подвижных роботов является рассматриваемая здесь траекторная задача – перемещение в рабочем пространстве (плоскости) по предписанной траектории.

Кинематическая модель мобильного робота имеет следующий вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= T^T(\alpha)V, \\ \dot{\alpha} &= \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

$\alpha$  – угол, определяющий ориентацию робота в абсолютной системе координат,  $V = \text{col}(V_1, V_2)$  – вектор линейной скорости робота,  $\omega$  – угловая скорость (рис. 4),

$T(\alpha) = \begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$  – ортогональная матрица, которая определяет базис

$(\tau_1(\alpha), \tau_2(\alpha))$ , связанный с роботом, и удовлетворяющая дифференциальному уравнению

$$\dot{T}(\alpha) = \omega ET(\alpha), \quad (2)$$

где  $E = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$  – кососимметрическая матрица.

При рассмотрении движения без проскальзывания  $V_2 = 0$  модель (1) принимает более простой вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= V_1 \cos \alpha, \\ \dot{y}_2 &= V_1 \sin \alpha, \\ \dot{\alpha} &= \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

Связь между линейной скоростью робота, угловой скоростью вращения платформы и продольными скоростями колес  $V_1^j$  определяется выражениями

$$V_1 = \frac{1}{2}(V_1^1 + V_1^2), \quad (4)$$

$$\omega = -\frac{(V_1^1 - V_1^2)}{l}, \quad (5)$$

где  $l$  – расстояние между колесами робота.

Будем считать, что робот движется с постоянной линейной скоростью, а управление осуществляется только по каналу угловой скорости.

Перемещение робота в пространстве описывается непрерывной траекторией (трассой), которая может быть представлена в виде отрезков, каждый из которых является сегментом гладкой плоской кривой  $S$ . Определим на кривой  $S$  ортонормированный базис  $(\tau_1(\alpha^*), \tau_2(\alpha^*))$  (базис Френе [4]), как показано на рис. 5, где угол  $\alpha^*$  определяет желаемую ориентацию робота.

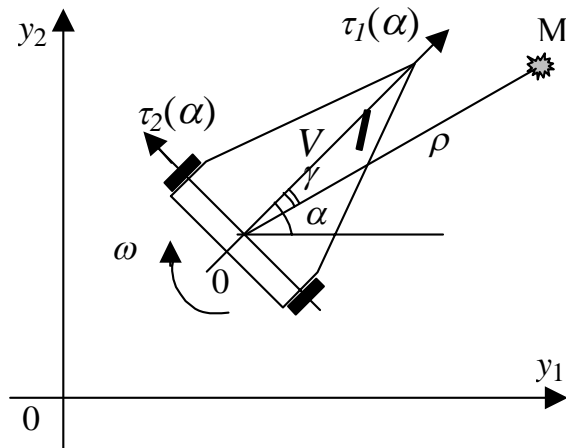


Рис. 4. Системы координат мобильного робота

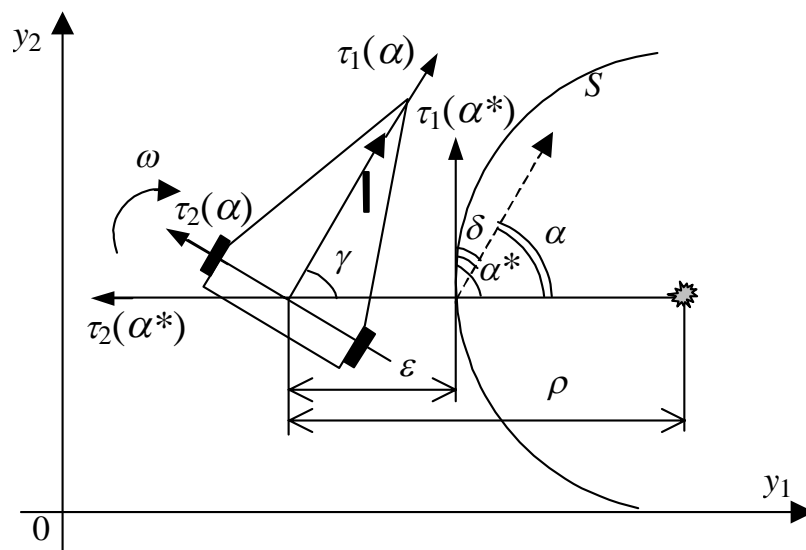


Рис. 5. Колесный робот и отрезок кривой  $S$

Введем в рассмотрение следующие задачно-ориентированные переменные робота (рис. 5):

$s$  – криволинейная абсцисса, которая характеризует путь, пройденный роботом вдоль кривой;

$\varepsilon$  – поперечное отклонение от траектории (ошибка положения);

$\delta = \alpha - \alpha^*$  – угловое отклонение (ошибка угловой ориентации).

Векторы  $\tau_1(\alpha^*)$  и  $\tau_2(\alpha^*)$  формируют ортогональную матрицу

$$T(\alpha^*) = \begin{vmatrix} \tau_1^T(\alpha^*) \\ \tau_2^T(\alpha^*) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \alpha^* & \sin \alpha^* \\ -\sin \alpha^* & \cos \alpha^* \end{vmatrix}, \quad (6)$$

которая удовлетворяет дифференциальному уравнению Френе [4, 5]

$$\dot{T}(\alpha^*) = \xi(s) \dot{s} E T(\alpha^*),$$

$\xi = \xi(s)$  – кривизна кривой  $S$ .

Уравнение (4) можно привести к простой скалярной форме [4]

$$\dot{\alpha}^* = \xi(s) \dot{s}. \quad (7)$$

Задача управления траекторным движением формируется следующим образом. Требуется определить алгоритмы формирования управляющих воздействий, которые обеспечивают:

- компенсацию ошибок  $\varepsilon$ ,  $\delta$  и стабилизацию их нулевых значений;
- желаемый режим движения робота вдоль кривой, т.е. поддержание постоянной скорости движения  $\dot{s} = V_1^* = const$ .

Преобразуем модель (1) к задачно-ориентированной (траекторной) форме, в которой выходными переменными являются определенные выше переменные  $s$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$ , а входными – специально выбранные управляющие воздействия, обеспечивающие поставленную задачу управления. Для этого необходимо продифференцировать по времени введенные задачно-ориентированные переменные. Из рис. 5 находим:

$$\dot{\varepsilon} = V_1 \cos \gamma, \quad (8)$$

$$\gamma = 90^\circ - \delta; \Rightarrow \dot{\gamma} = -\dot{\delta}. \quad (9)$$

Так как  $\delta = \alpha - \alpha^*$ , то, учитывая уравнения (3) и (7),

$$\dot{\delta} = \omega - \xi \dot{s} \Rightarrow \dot{\gamma} = \xi \dot{s} - \omega. \quad (10)$$

При достаточно малых отклонениях робота от желаемой траектории движения  $S$  задачно-ориентированная модель робота принимает вид

$$\dot{s} = V_1^* = u_s, \quad (11)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{s} \gamma, \quad (12)$$

$$\dot{\gamma} = \xi \dot{s} - \omega = \xi \dot{s} - u_\varepsilon, \quad (13)$$

где  $u_s$  и  $u_\varepsilon$  – продольное и относительное управления соответственно.

Уравнение (11) определяет продольную динамику робота, а уравнения (12) и (13) – поперечную и угловую динамику.

Задача организации движения мобильного робота по заданной траектории с постоянной скоростью  $V_1^* = const$  может быть решена за счет выбора следующих законов управления:

$$u_s = V_1^*, \quad (14)$$

$$u_\varepsilon = -\xi u_s - \frac{k_\varepsilon}{V_1^*} \varepsilon - \frac{k_\gamma}{V_1^*} \gamma, \quad (15)$$

где  $k_\varepsilon$  и  $k_\gamma$  – положительные коэффициенты обратных связей.

Алгоритмы (14) и (15) обеспечивают движение с заданной продольной скоростью, а также асимптотическое стремление к нулю ошибки положения и угловой ориентации.

## Планирование движения мобильного робота

Рассмотрим формирование законов движения мобильного робота на основе использования нечеткой логики. Такой математический аппарат позволяет описывать и исследовать сложные, «плохо определенные» системы. В таких системах наряду со

строгими, объективными, количественными данными и результатами присутствуют неоднозначные, субъективные, качественные данные и результаты, что требует новых подходов. Нечеткая логика позволяет определять промежуточные значения между стандартными оценками *Да/Нет*, *Истина/Ложь* и т.д. Основная идея этого подхода состоит в использовании знаний экспертов об объекте управления, выраженных в виде некоторых правил, связывающих измерения и управления.

Основным понятием нечетких систем является нечеткое множество.

**Определение.** *Нечетким подмножеством*  $A$  множества  $U$  называется пара  $(U, \mu_A)$ , где  $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$  – функция, каждое значение которой  $\mu_A(x) \in [0, 1]$  интерпретируется как степень принадлежности точки  $x \in U$  множеству  $A$ . Функция  $\mu_A$  называется *функцией принадлежности* множества  $A$ .

Для обычного «четкого» множества  $B$  можно положить:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1, & x \in B \\ 0, & x \notin B \end{cases}, \quad (16)$$

т.е. классическое понятие множества является частным случаем нечеткого.

Для представления экспертных данных в формализованном виде вводится понятие *нечеткой лингвистической переменной*. Для нечеткой лингвистической переменной  $L$  вводится набор значений  $T_k$ , называемых *термами* лингвистической переменной. Значение нечеткой лингвистической переменной (обозначается  $L = \{T_k / \mu_k^L, k = 1, \dots, p\}$ ) определяется по значению связанной с ней переменной  $x \in U$  через значения функций принадлежности в точке  $x$ :

$$L = \{T_k / \mu_k^L, k = 1, \dots, p\}; \mu_k^L = \mu_k(x). \quad (17)$$

Таким образом, при заданных термах значение нечеткой лингвистической переменной можно представить в виде набора чисел, каждое из которых соответствует одному терму и выражает степень уверенности в том, что текущее значение переменной  $x$  может быть описано этим термом.

Обратный переход от нечеткой лингвистической переменной к числовому значению может быть выполнен различными способами. Для целей управления чаще всего определяют центр тяжести нечеткого множества.

При построении нечеткого логического регулятора для выбранных входных  $y_i$  и выходных  $u_j$  переменных вводятся соответствующие лингвистические переменные  $Y_i$  и  $U_j$ . Для каждой лингвистической переменной экспертом должны быть заданы множество термов и функции принадлежности каждого терма. Функции принадлежности могут иметь произвольную форму, однако в практике построения нечетких логических регуляторов обычно используют кусочно-линейные функции принадлежности. По значениям входных переменных  $y_i$  через соотношения (17) определяются значения нечетких лингвистических переменных  $Y_i$  (процесс фаззификации).

Следующий этап связан с формированием таблицы экспертных правил, которые записываются в виде: если

$$\langle Y_1 = T_{k_1}^{Y_1} \checkmark Y_2 = T_{k_2}^{Y_2} \checkmark \dots \checkmark Y_n = T_{k_n}^{Y_n} \rangle,$$

то

$$\langle U_1 = T_{k_1}^{U_1} \checkmark U_2 = T_{k_2}^{U_2} \checkmark \dots \checkmark U_m = T_{k_m}^{U_m} \rangle.$$

Правила могут быть сведены в таблицу соответствия, связывающую входные и выходные лингвистические переменные. Значения нечетких логических переменных, характеризующих управления, определяются из принципа обобщения.

Вычисляя степень принадлежности для всех термов каждой из выходных переменных, получают нечеткие лингвистические значения для всех переменных  $U_j$ . Далее

осуществляется переход от нечетких лингвистических переменных  $U_j$  к четким числовым значениям  $u_j$ .

Перейдем к построению нечеткого логического регулятора, обеспечивающего прохождение роботом «ворот» независимо от его исходной ориентации и положения.

Согласно процедуре синтеза нечеткого регулятора [6], определим входные и выходные переменные и соответствующие им лингвистические переменные. В качестве входного множества примем информацию, поступающую с датчиков системы технического зрения, т.е. множество пар сигналов  $(\rho_i, \gamma_i)$  о положении маяков.

Лингвистическая переменная  $Y_1 = \text{РАССТОЯНИЕ ДО МАЯКОВ}$  может принимать значения БЛИЗКО, СРЕДНЕ и ДАЛЕКО.

При некоторых положениях робота сигналы, пришедшие с маяков, образующих «ворота», могут располагаться слишком близко или вообще сливаться. В таких случаях робот может, например, пару маяков принять за один. Поэтому при выполнении таких задач, как «ворота», «восьмерка», более существенной является не информация о каждом отдельном угле направления на маяк, а информация о разности этих углов  $\Delta = \gamma_1 - \gamma_2$ , которая позволяет судить о расстоянии между маяками, образующими «ворота». Примем в качестве второй входной лингвистической переменной  $Y_2 = \text{РАЗНОСТЬ УГЛОВ НАПРАВЛЕНИЯ НА МАЯКИ}$  с термами БОЛЬШАЯ, МАЛАЯ, НУЛЕВАЯ.

На выходе будем определять желаемое движение робота:  $U_1 = \text{ЖЕЛАЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ РОБОТА}$ , термы: ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК, ВРАЩЕНИЕ ВОКРУГ МАЯКА.

В простейшем случае желаемым движением робота можно управлять с помощью дискретной переменной, принимающей два значения: «0» соответствует движению на маяк, «1» – вращению вокруг маяка.

Функции принадлежности термов всех введенных лингвистических переменных приведены на рис. 6.

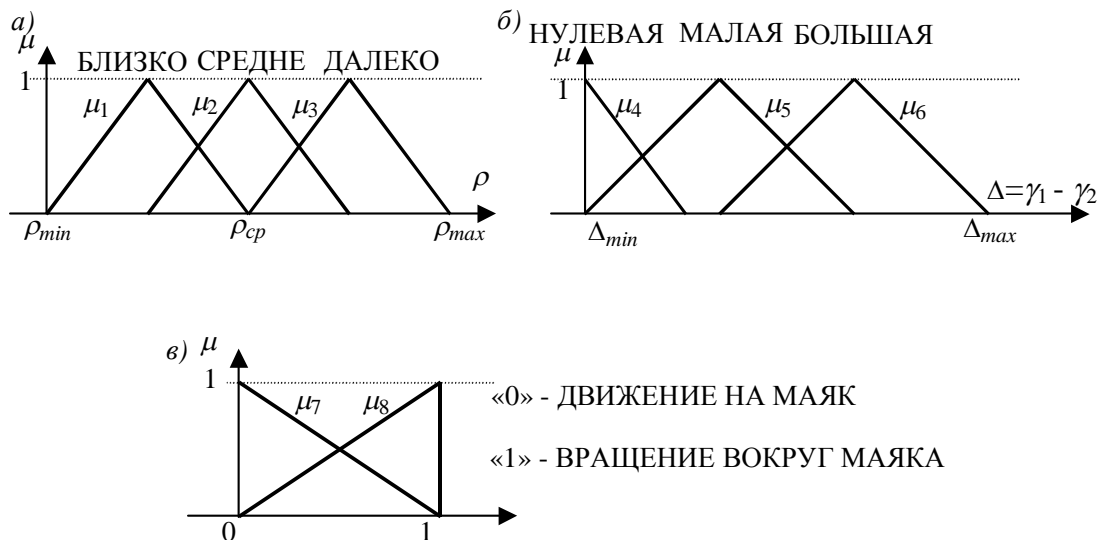


Рис. 6. Функции принадлежности термов для переменных а) – РАССТОЯНИЕ ДО МАЯКОВ; б) – РАЗНОСТЬ УГЛОВ НАПРАВЛЕНИЯ НА МАЯКИ; в) – ЖЕЛАЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ РОБОТА

Определим правила преобразования входного множества в выходное:  
 $(Y_1 = \text{«ДАЛЕКО»} \text{ и } Y_2 = \text{«БОЛЬШАЯ»} \text{ или } Y_2 = \text{«МАЛАЯ»} \text{ или } Y_2 = \text{«НУЛЕВАЯ»})) \rightarrow U_1 = \text{«ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК»};$   
 $((Y_1 = \text{«БЛИЗКО»} \text{ или } Y_1 = \text{«СРЕДНЕ»})) \text{ и } (Y_2 = \text{«МАЛАЯ»} \text{ или } Y_2 = \text{«НУЛЕВАЯ»})) \rightarrow U_1 = \text{«ДВИЖЕНИЕ НА МАЯК»};$



(( $Y_1 = \text{«БЛИЗКО»}$  или  $Y_1 = \text{«СРЕДНЕ»}$ ) и  $Y_2 = \text{«БОЛЬШАЯ»}$ )  $\rightarrow U_1 = \text{«ВРАЩЕНИЕ ВОКРУГ МАЯКА»}$ .

В соответствии с введенными правилами, используя свойства операций над нечеткими множествами [6], запишем метод пересчета для функций принадлежности выходной переменной:

$$\mu_7 = \min(\mu_3, \max(\mu_4, \mu_5, \mu_6)) + \min(\max(\mu_1, \mu_2), \max(\mu_4, \mu_5));$$

$$\mu_8 = \min(\max(\mu_1, \mu_2), \mu_6).$$

Переход от нечеткой выходной лингвистической переменной к ее числовому значению осуществляется через определение арифметического средневзвешенного [6]:

$$U = \frac{\sum_{k=1}^p \mu_k^L \mu_k(x)}{\sum_{k=1}^p \mu_k^L}. \quad (18)$$

В случае использования дискретного выхода формула (18) принимает вид

$$U = \frac{\mu_7 \cdot u_0 + \mu_8 \cdot u_1}{u_0 + u_1} = \mu_8. \quad (19)$$

Структурная схема нечеткого логического регулятора, реализующего алгоритм прохождения роботом «ворот», представлена на рис. 7.

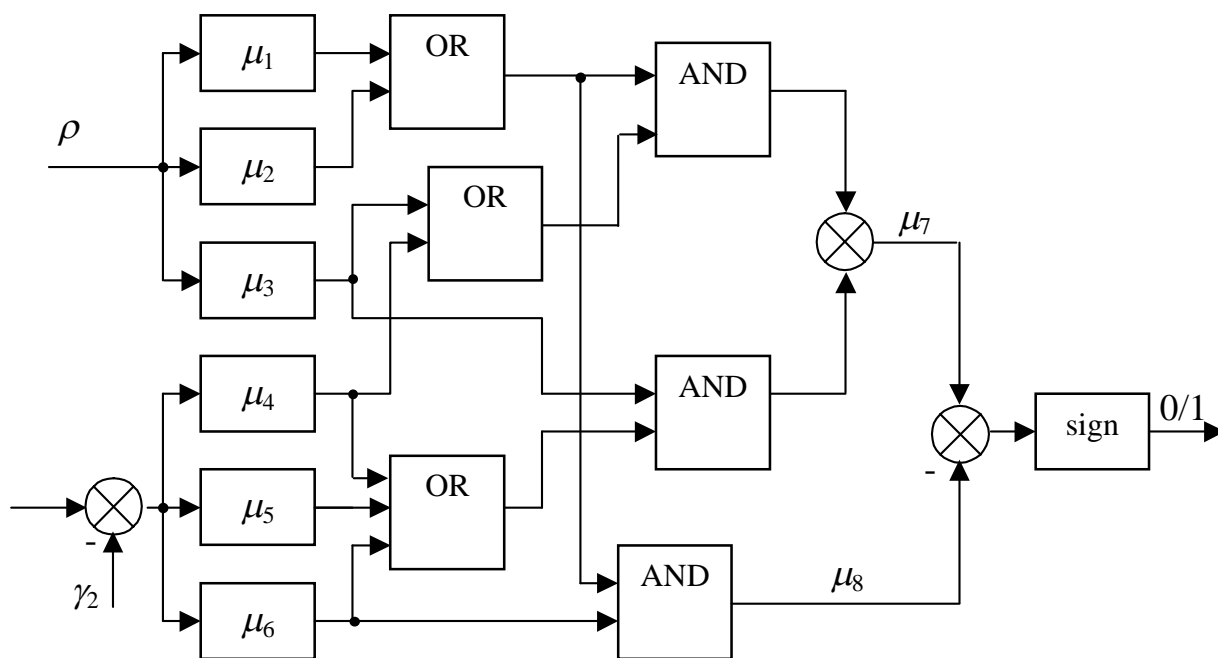


Рис. 7. Структура нечеткого логического регулятора

## Заключение

Описанная процедура построения системы управления двухприводным мобильным роботом включает следующие этапы: построение задачно-ориентированной модели робота, синтез алгоритмов, обеспечивающих стабилизацию робота относительно заданной траектории и поддержание требуемой скорости перемещения, а также разработка нелинейного регулятора с применением теории нечеткой логики, реализующего планирование движением робота при прохождении «ворот», образованных двумя инфракрасными маяками. Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики позволяет строить алгоритмы управления, обеспечивающие устойчивое и качественное управление сложными динамическими объектами.

## Литература

1. Аржаник А.В., Вашенков О.Е., Лямин А.В., Штефан В.И. Мобильный робот «Невская стрела» // Мехатроника, автоматизация, управление. // Новые технологии. 2004. №2. С. 23–26.
2. Мобильные роботы и мехатронные системы: Материалы научной школы-конференции (Москва, 5 – 6 декабря 2000 г.). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 288 с.
3. Аржаник А.В. Система технического зрения мобильного робота. // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 97–102
4. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб.: Наука, 2001. 227 с., ил. 91
5. 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. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 114–126
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д.А. Поспелова., М.: Наука, 1986

# ГРУППОВОЕ РАНЖИРОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЦ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

О.В. Слита

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Ушаков

В работе представлен алгоритм группового ранжирования неопределенных параметров матриц модельного представления объектов. Технология ранжирования основывается на использовании грамианов управляемости динамических каналов «параметрическое воздействие – выход системы».

## Введение

Одной из важных проблем, возникающих при решении задачи обеспечения параметрической инвариантности, является ранжирование модельных неопределенностей объекта управления по степени их влияния на выход системы. Решение этой проблемы необходимо для рационального распределения ресурсов управления, в особенности, если ранг матрицы управления меньше размерности вектора состояния объекта.

Групповое ранжирование позволяет выяснить, в какой строке матрицы состояния находятся неопределенные параметры, наиболее сильно влияющие на выход системы. Предлагаемая схема ранжирования является квазиаприорной потому, что ранжирование производится не на основе модели исходного объекта, а на основе системы с номинальными параметрами, спроектированной согласно заданным техническим требованиям, но без обеспечения параметрической инвариантности. Такой подход дает возможность предложить технологию ранжирования параметрических неопределенностей, основанную на использовании грамианов управляемости [1] динамического канала «параметрическое воздействие – выход системы». Алгоритмически номинальная система спроектирована так, что матрица замкнутой системы обладает желаемым спектром собственных значений, но система собственных векторов не контролируется.

## 1. Постановка задачи параметрической инвариантности

Рассматривается линейный непрерывный объект, неопределенность знания параметров структурных компонентов которого путем выбора соответствующего базиса [2, 3] представима неопределенностью задания его матрицы состояния так, что его уравнение динамики принимает вид:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + Bu(t); \quad x(0); \quad y(t) = Cx(t). \quad (1)$$

В выражении (1)  $x, u, y$  – соответственно векторы состояния, управления и выхода;  $x \in R^n$ ,  $u \in R^r$ ,  $y \in R^m$ ,  $A, B, C$  – соответственно номинальная компонента матрицы состояния объекта управления (ОУ), его матрицы управления и выхода, согласованные по размерности с векторными переменными:  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times r}$ ,  $C \in R^{m \times n}$ ,  $\Delta A$  – матричная вариация матрицы состояния.

Закон управления (ЗУ) синтезируется в виде прямой связи по внешнему задающему воздействию  $g(t)$  с матрицей  $K_g$  и обратной связи по состоянию объекта  $x(t)$  с матрицей  $K$ , образующих аддитивную композицию, в предположении полной их измеримости.

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t). \quad (2)$$

Структурное объединение ОУ (1) и ЗУ (2) образует систему с векторно-матричным представлением

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t) + \Delta Fx(t); \quad x(0); \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t); \quad \varepsilon(t) = g(t) - y(t). \quad (4)$$

В (3), (4)  $\varepsilon(t)$  – ошибка воспроизведения системой задающего воздействия, матрицы  $F$  и  $G$  имеют представление

$$F = A - BK, \quad G = BK_g, \quad (5)$$

$\Delta F$  – матричная вариация матрицы состояния системы, удовлетворяющая равенству

$$\Delta F = \Delta A. \quad (6)$$

Инвариантность выхода системы (а, следовательно, и ошибки) можно записать в форме

$$y(t, g(t), F, \Delta F = \Delta A \neq 0) = y(t, g(t), F, \Delta F = \Delta A \equiv 0). \quad (7)$$

Представим матричную вариацию  $\Delta F = \Delta A$  в аддитивной форме

$$\begin{aligned} \Delta A &= \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} & \dots & \Delta A_{1n} \\ \Delta A_{21} & \Delta A_{22} & \dots & \Delta A_{2n} \\ \vdots & & & \\ \Delta A_{n1} & \Delta A_{n2} & \dots & \Delta A_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} & \dots & \Delta A_{1n} \\ & & & \\ & & 0_{(n-1) \times n} & \\ & & & \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} & 0_{1 \times n} & & \\ \Delta A_{21} & \Delta A_{22} & \dots & \Delta A_{2n} \\ & & & \\ & & 0_{(n-2) \times n} & \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} & & & 0_{(n-1) \times n} \\ & & & \\ \Delta A_{n1} & \Delta A_{n2} & \dots & \Delta A_{nn} \\ & & & \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} & \dots & \Delta A_{1n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{21} & \Delta A_{22} & \dots & \Delta A_{2n} \end{bmatrix} + \dots \\ &\dots + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{n1} & \Delta A_{n2} & \dots & \Delta A_{nn} \end{bmatrix}. \quad (8) \end{aligned}$$

Мультипликативный компонент  $\Delta F x(t) = \Delta A x(t)$  в (3) представим в форме:

$$\begin{aligned} F x(t) = \Delta A x(t) &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} & \dots & \Delta A_{1n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{21} & \Delta A_{22} & \dots & \Delta A_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{n1} & \Delta A_{n2} & \dots & \Delta A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}. \quad (9) \end{aligned}$$

В формуле (9) первые сомножители слагаемых (матрицы-столбцы размерности  $(n \times 1)$ ) являются  $j$ -ми столбцами  $D_j$  матрицы  $D$  так, что она записывается в форме

$$D = \text{row}\{D_j, j=1, p\}. \quad (10)$$

Мультипликативная векторная структура

$$\begin{bmatrix} \Delta A_{j1} & \Delta A_{j2} & \dots & \Delta A_{jn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

представляет собой  $j$ -е компоненты  $\xi_j$  вектора «параметрического» воздействия  $\xi$ ,  $j=1, p$ , где  $p$  не превышает  $n$ :

$$\xi_j(t) = \text{row } \xi_j(t), j=1, p. \quad (12)$$

Объединение (11) и (12) позволяет представить векторно-матричный компонент  $\Delta F x(t) = \Delta A x(t)$  в форме:

$$\Delta A x(t) = \sum_{j=1}^p D_j \xi_j(t) = D \xi(t). \quad (13)$$

Подстановка (10) с учетом (9) в (3) позволяет записать:

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gg(t) + D\xi(t); y(t) = Cx(t). \quad (14)$$

Поставленная задача обеспечения параметрической инвариантности в форме (7) при использовании модели (14) принимает вид

$$y(t, F, g(t), \xi(t) \neq 0) = y(t, F, g(t), \xi(t) \equiv 0). \quad (15)$$

Соотношение (15) по существу содержит доказательство следующего утверждения [4].

Утверждение 1. Для того, чтобы система (9) обладала параметрической инвариантностью в смысле условия (15), т.е. чтобы передаточная функция (матрица) «параметрический вход  $\xi$  – выход системы  $y$ »  $\Phi_{y\xi}(s)$  была бы нулевой, а именно выполнялось равенство,

$$\Phi_{y\xi}(s) = C(sI - F)^{-1} D = 0. \quad (16)$$

достаточно, чтобы столбцы  $D_j$  матрицы  $D$  были бы собственными векторами матрицы  $F$ , при этом они принадлежали ядру матрицы  $C$ .  $\square$

Доказательство утверждения 1 приведено в [5].

Заметим, что в случае невыполнения условия (16), гарантирующего полную параметрическую инвариантность выхода, оно может быть заменено контролем близости передаточной функции к равенству ее нулю. Необходимо сказать, что контроль близости к нулю передаточной функции является сложной вычислительной проблемой. В этой связи возникшая трудность может быть преодолена, если перейти к аппарату грамианов, которые для устойчивых систем имеют стационарную реализацию, вычисляемую в силу решения уравнения типа Ляпунова [1, 4]. По существу, грамиан управляемости канала «параметрический вход – выход системы» представляет собой квадратичную норму передаточной функции этого канала, поэтому для того, чтобы система обладала параметрической инвариантностью, достаточно, чтобы сингулярные числа грамиана управляемости были бы нулевыми.

## 2. Групповое ранжирование неопределенных параметров

Форма учета неопределенностей в виде модельного представления (12) диктует необходимость решения задачи ранжирования в групповой постановке, где под группой бу-

дем понимать строку матрицы  $\Delta A$ , т.е. к задаче оценки влияния на выход системы факта принадлежности неопределенностей конкретным строкам. В силу того, что столбец  $D_j$  матрицы  $D$  однозначно связан с  $j$ -м компонентом  $\xi_j(t)$  параметрического входа, который, в свою очередь, определяется  $j$ -й строкой матричной вариации  $\Delta A$ , задача сводится к оценке норм грамианов, построенных на тройке матриц  $C$ ,  $F$  и  $D_j$ .

В соответствии с определением грамиана управляемости [1] запишем грамианы управляемости канала « $\xi_j(t) - y(t)$ », которые определяются в соответствии со следующими выражениями

$$FW_j + W_j F^T = -D_j D_j^T; \quad (17)$$

$$W_{y_j} = CW_j C^T, \quad (18)$$

где  $W_j$  – грамиан управляемости по состоянию.

Значение грамиана (18) сепаратного канала показывает, как влияет групповая неопределенность в этом канале на выход номинальной системы: чем больше значение грамиана, тем сильнее влияние неопределенности.

Если дополнить соотношения (17), (18) вычислением спектральной нормы грамиана управляемости, которая совпадает с максимальным сингулярным числом, то значение нормы при фиксированной норме  $\xi_j(t)$  может быть принято за функционал ранжирования

$$J_{Rj} = \alpha_M \{W_{y_j}\}. \quad (19)$$

Соотношения (17)-(19) позволяют предложить следующий алгоритм ранжирования:

- 1) Сформировать модельное представление исходного объекта, выбрав такой базис, в котором неопределенности находятся в матрице состояния;
- 2) Синтезировать закон управления вида (2), который доставляет номинальной версии системы требуемые динамические свойства без контроля структуры собственных векторов;
- 3) Получить матрицу замкнутой системы с номинальными параметрами;
- 4) Составить матрицу  $D$ ;
- 5) Вычислить грамианы управляемости каналов « $\xi_j(t) - y(t)$ »;
- 6) Вычислить спектральную норму грамиана управляемости канала;
- 7) Проранжировать неопределенности с помощью функционала ранжирования (19).

## Пример

Для иллюстрации предложенного способа группового ранжирования неопределенностей модельного представления рассмотрим объект, векторно-матричное описание которого  $\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu$ ;  $y = Cx$  имеет следующие компоненты:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -8 & 340 \\ 0 & 0 & -800 \end{bmatrix}, \Delta A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \Delta A_{22} & \Delta A_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Delta A_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Потребуем, чтобы система обладала динамическими свойствами, которые обеспечиваются следующими собственными значениями:  $\lambda_1 = -5$ ,  $\lambda_2 = -10$ ,  $\lambda_3 = -20$ , при этом не будем предъявлять требования к структуре собственных векторов. С помощью ме-

тодов модального управления получим матрицу замкнутой системы с номинальными параметрами  $F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -8 & 340 \\ -2,95 & -0,395 & -27 \end{bmatrix}$ . Матрица  $D$  имеет вид  $D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ .

Решение уравнений (17), (18) позволяет записать грамианы управляемости для системы с номинальными параметрами. Грамиан канала « $\xi_1(t) - y(t)$ » является скаляром и характеризуется значением  $W_{y_1} = 1,17 \cdot 10^{-3}$ . Грамиан управляемости канала « $\xi_2(t) - y(t)$ » также является скаляром и принимает значение  $W_{y_2} = 0,179$ . Т.к. в данном случае грамианы являются скалярами, то норма грамианов совпадает с их значением. Сравнивая полученные значения функционалов ранжирования  $J_{R1} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  и  $J_{R2} = 0,179$  двух каналов, делаем вывод, что доминирующими являются неопределенности матрицы  $A$ , образующие третью строку матричной вариации  $\Delta A$ .

## Заключение

Предложенный метод группового ранжирования неопределенностей матрицы состояния исходного ОУ является эффективным экспресс-методом, позволяющим сравнить по степени влияния на выход системы группы неопределенностей, входящие в различные строки матрицы состояния. Метод позволяет сравнивать базисы представления исходного объекта по степени группового влияния неопределенностей матриц модельного представления на выход системы.

## Литература

1. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем: Научное издание / СПб, 1998. 256 с.: ил.
2. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М. Наука, 1976.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М. Наука, 1987.
4. Никифоров В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
5. Слита О.В., научный руководитель Ушаков А.В. Фактор ранга матрицы управления динамического объекта в задаче достижения параметрической инвариантности. / Современные технологии: Сборник статей под ред. Козлова С. А. СПб: СПб ГУИТМО. 2003. С.253-259.
6. Ушаков А.В. Обобщенное модальное управление. // Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. 2000. Т.3, №3, стр. 8 – 15.

# УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ МАЯТНИКА КАПИЦЫ

Н.М. Одинец

Научный руководитель – д.т.н., профессор И.В. Мирошник

В работе рассматриваются проблемы управления колебаниями маятника Капицы. Использование наблюдателя, обеспечивающего получение оценки *медленной* составляющей колебаний, и концепции *виртуальной энергии* предоставляет возможность синтезировать алгоритмы управления энергетического типа, обеспечивающие желаемые колебания маятника относительно верхнего положения равновесия за счет вертикального перемещения точки подвеса.

## Введение

Задачи анализа нелинейных колебаний и управления маятниковыми системами вызывают неослабевающий интерес исследователей и являются объектом многочисленных публикаций прошедшего столетия. Имея, как правило, незначительное самостоятельное применения, такие задачи часто представляют собой прекрасный аналог для многих естественных, технологических и физических процессов – от биологических явлений до вибрационных технологий. Известные решения подобных задач сосредоточены вокруг проблем стабилизации перевернутых маятников, а также раскачивания и управления колебаниями периодических движений [1, 2, 5–8, 11–14] с использованием приемов энергетического управления [7, 12], метода скоростного градиента [1, 5, 6, 8, 13, 14] и дифференциально-геометрического подхода [2, 11].

Требуемая стабилизация положения либо желаемые колебательные движения маятниковых систем обычно обеспечиваются благодаря горизонтальному движению точки подвеса маятника. Тем не менее, задача управления периодическими движениями маятника в окрестности нижнего положения может быть также решена и за счет вертикальных перемещений подвеса [6, 12]. Более того, при соответствующем высокочастотном возбуждении подвеса наблюдаются сложные периодические движения маятника в окрестности верхнего положения равновесия. Такое явление, получившее название *индуцированной, или вибрационной, стабилизации*, рассматривалось в большом числе научных публикаций, начиная с известной работы Стефенсона (1908) и включая работы П. Л. Капицы, Н.Н. Боголюбова и др. (см. [3, 9, 15–17]).

В настоящей работе<sup>1</sup> предпринята попытка решения задачи стабилизацию заданных периодических движений свободного маятника вокруг верхнего положения за счет вертикальных вибраций подвеса и дополнительного управляющего воздействия. Задача сводится к стабилизации так называемой *виртуальной энергии* системы – энергии перевернутого маятника с противоположным направлением ускорения силы тяжести – и решается на основе управлений энергетического типа хорошо развитых для обычных маятников с вертикальным перемещением подвеса [6, 12].

## Управление колебаниями с использованием энергетического управления

Модель маятника с подвижным подвесом описывается уравнением Лагранжа

$$J\ddot{q} + \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{q}} = G(q, \alpha)u, \quad (1)$$

где  $q$  – угол поворота,  $u$  – управляющее воздействие,  $J=ml^2$ ,  $\Pi(q)$  – потенциальная энергия,  $G(q)$  – функция определяемая текущей ориентацией опоры  $\alpha$  (см. рис. 1).

Общая энергия (функция Гамильтона) свободного маятника определяется как

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант 02–01–01164) и Комплексной программы 17 Президиума РАН (раздел 1.4).



$$E(p, q) = \Pi(q) + T(p) = \Pi(q) + \frac{p^2}{2J}, \quad (2)$$

где  $T(p)$  – кинетическая энергия,  $p = J\dot{q}$  – момент. Уравнение (1) можно переписать в гамильтоновой форме

$$J\dot{q} = p, \quad \dot{p} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q} + G(q, \alpha)u. \quad (3)$$

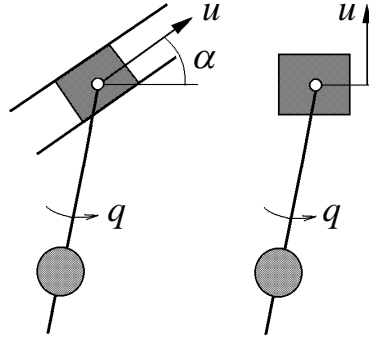


Рис. 1. Маятники с подвижным основанием

Рассмотрим задачу управления колебаниями системы, связанную с поддержанием требуемого режима недемпфированных периодических движений маятника. Принимая во внимание, что модель колебаний связана с определенным уровнем внутренней энергии маятника [1, 5, 6], можно заключить, что задача сводится к стабилизации энергии, т.е. к стандартной задаче *частичной* стабилизации динамической системы (или стабилизации по функции  $E=E(q,p)$ ) [6].

Зададим желаемый уровень энергии  $E^*$  и введем в рассмотрение ошибку стабилизации энергии (отклонение)

$$\xi = E(p, q) - E^*. \quad (4)$$

После элементарных преобразований получим модель ошибки

$$\dot{\xi} = \frac{pG(q, \alpha)u}{J}. \quad (5)$$

Устойчивое решение задачи обеспечивается различными алгоритмами управления вида

$$u = -kJU(p, G)\xi, \quad (6)$$

где  $k > 0$  – коэффициент обратной связи.

Подставив (6) в (5), получим

$$\dot{\xi} = -pGU(p, G)k\xi. \quad (7)$$

Можно заключить, что система обладает свойством асимптотической устойчивости по отношению к частичному положению равновесия  $E=E^*$ , когда функция  $U(p, g)$  для всех  $t > 0$  удовлетворяет неравенству

$$\int_0^t pG(q, \alpha)U(p, G) d\tau \geq \lambda t, \quad (8)$$

где  $\lambda > 0$ .

Легко показать, что задача решается с помощью алгоритмов управления

$$u = -J \operatorname{sgn}(pG)k\xi$$

$$u = -JpGk\xi$$

Теперь рассмотрим случай, когда опора маятниковой системы осуществляет вертикальные движения (см. рис. 1). Здесь

$$\Pi(q) = mgl(1 - \cos q),$$

$$G = -ml \sin q,$$

и уравнение (3) принимает вид

$$J\dot{q} = p, \quad \dot{p} = mgl \sin q - ml \sin q u. \quad (9)$$

Важно отметить, что невозмущенная маятниковая система (9) имеет два положения равновесия. Первое из них  $(q, p) = (0, 0)$  соответствует нижнему положению маятника и асимптотически устойчиво. Второе положение равновесия  $(q, p) = (\pi, 0)$  связано с верхним положением, не устойчиво и в рассматриваемом случае не может быть стабилизировано стандартными методами теории управления.

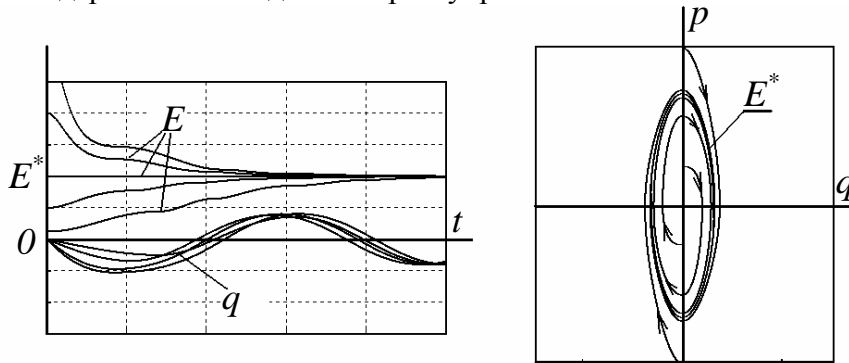


Рис. 2. Стабилизация колебаний в нижнем положении

Все вышесказанное относится также к возможности организации периодических колебаний маятниковой системы. Алгоритм управление энергией (7), или частный алгоритм

$$u = -\text{sgn}(p \sin q)k\xi$$

обеспечивает устойчивые колебания относительно нижней точки с энергией

$$E^* < E_m = 2mgl$$

(см. рис. 2). Если  $E^* > E_m$ , маятник демонстрирует равномерное вращение вокруг точки подвеса. Колебания же маятника относительно верхнего положения оказываются невозможны без специального возбуждения подвеса.

### Стабилизация колебаний возбужденной маятниковой системы

Высокочастотные вертикальные вибрации основания маятника (см. рис.2) кардинально изменяют свойства маятниковой системы [3, 9, 15–17]. При соответствующих условиях разомкнутая маятниковая система становится устойчивой (либо асимптотически устойчивой) по отношению к верхнему положению равновесия  $(q, p) = (\pi, 0)$ . Это свойство является отправной точкой для управления колебаниями маятника в верхнем положении.

Сначала рассмотрим маятник, подверженный высокочастотным вибрациям подвеса в отсутствии дополнительных управляющих воздействий. Пусть вибрационное движение основания описывается уравнением

$$\ddot{s} + \omega^2 s = 0, \quad (10)$$

где  $s$  – координата подвеса,  $\omega$  – частота вибраций.

Если  $s(0) = 0$ ,  $\dot{s}(0) = A\omega$ , то

$$s(t) = A \sin \omega t.$$

Полагая в модели (9)  $u = \omega^2 s$ , находим

$$J\dot{q} = p, \quad \dot{p} = -ml(g + \omega^2 s) \sin q. \quad (11)$$

Если частота  $\omega$  достаточно велика, решение системы (11) может быть приближенно представлено двухчастотным сигналом вида [17]

$$q \cong \bar{q} + \tilde{q} \sin \bar{q},$$

где

$$\tilde{q}(t) = \Delta s(t), \quad \Delta = const,$$

– быстрая составляющая колебаний, а  $\bar{q}$  – медленная компонента, являющаяся решением уравнения

$$J\dot{\bar{q}} = \bar{p}, \quad \dot{\bar{p}} = -0.5m(2gl + \theta\omega^2 A^2) \sin \bar{q}. \quad (12)$$

и  $\theta = 1$  если  $\bar{q} < \pi/2$ ,  $\theta = -1$  если  $\pi/2 < \bar{q} < 3\pi/2$ .

При условии, что

$$\omega^2 A^2 > 2gl, \quad (13)$$

уравнение медленного движения (12) может быть записано в виде

$$J\dot{\bar{q}} = \bar{p}, \quad \dot{\bar{p}} = -\theta J \bar{\omega}^2 \sin \bar{q}, \quad (14)$$

где

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{2g\theta l + \omega^2 A^2}{2l^2}} \quad (15)$$

или

$$\ddot{\bar{q}} + \theta \bar{\omega}^2 \sin \bar{q} = 0, \quad (16)$$

где  $\theta = \pm 1$ . Последнее выражение показывает, что система приобретает два устойчивых положения равновесия  $(q,p)=(0,0)$  и  $(q,p)=(\pi,0)$ , а маятник может осциллировать вокруг как нижнего, так и верхнего положения (см. рис. 3).

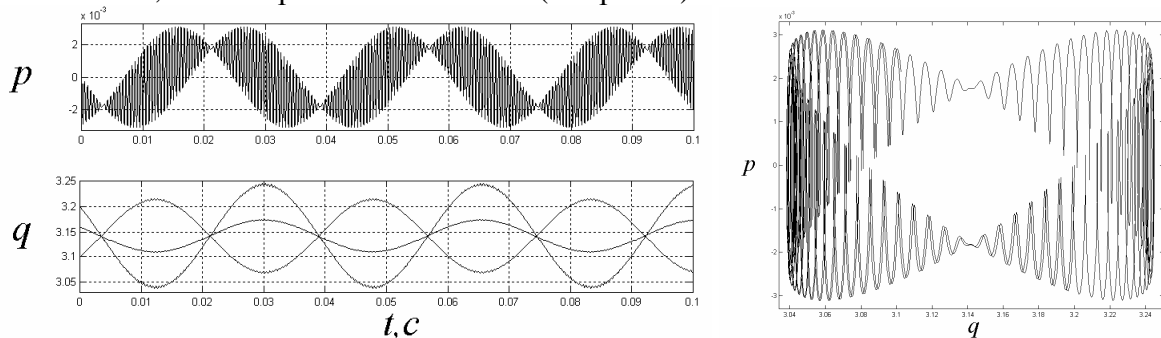


Рис. 3. Свободные колебания вокруг верхнего положения

Таким образом, при высокочастотном возбуждении подвеса оба положения равновесия маятниковой системы становятся устойчивыми, что предоставляет возможность с помощью соответствующих управляющих воздействий обеспечить требуемую устойчивость медленных движений маятника относительно верхнего положения.

Рассмотрим управляемые движения маятника по отношению к верхнему положению, полагая, что выполняется условие (13).

Выберем управление

$$u = \omega^2 s + \bar{u},$$

где  $\bar{u}$  – стабилизирующее воздействие.

Модель медленного движения маятниковой системы в окрестности верхнего положения  $\pi/2 < \bar{q} < 3\pi/2$  принимает вид

$$J\dot{\bar{q}} = \bar{p}, \quad \dot{\bar{p}} = m l \bar{g} \sin \bar{q} - m l \sin \bar{q} \bar{u}, \quad (17)$$

где положительная постоянная

$$\bar{g} = \frac{\omega^2 A^2}{2l} - g > 0$$

является *виртуальным ускорением свободного падения*, направленным в противоположном направлении по отношению к силе тяжести.

Введем в рассмотрение *виртуальную энергию* медленного движения

$$\bar{E}(\bar{p}\bar{q}) = \bar{\Pi}(\bar{q}) + \frac{1}{2J} \bar{p}^2, \quad (18)$$

где

$$\bar{\Pi}(\bar{q}) = m\bar{g}l(1 + \cos \bar{q}). \quad (19)$$

Отметим, что в окрестности верхнего положения справедливо

$$\bar{\Pi}(\pi) = 0 \text{ и } \bar{\Pi}(\pi) \geq 0.$$

Тогда модель маятниковой системы (17) можно записать в виде

$$J\dot{\bar{q}} = \bar{p}, \quad \dot{\bar{p}} = -\frac{\partial \bar{\Pi}}{\partial \bar{q}} + G(\bar{q})\bar{u}, \quad (20)$$

где  $G(\bar{q}) = -ml \sin \bar{q}$ .

Так как необходимый режим колебаний маятника связан с определенным уровнем его виртуальной энергии, то проблема управления сводится к рассмотренной ранее (см. п. 2) задаче к стабилизации энергии.

Чтобы получить оценку текущего значения *виртуальной энергии* необходимо выделить *медленную* составляющую колебаний маятника из измеряемого двухчастотного сигнала  $q$ . Для этого используется нелинейный наблюдатель, структура которого имеет следующий вид [18]:

$$J\dot{\bar{q}}_e = \bar{p}_e + u_{e1}, \quad \dot{\bar{p}}_e = -\frac{\partial \bar{\Pi}}{\partial \bar{q}_e} + u_{e2}, \quad q_e = \bar{q}_e - \tilde{q} \sin \bar{q}_e, \quad (21)$$

где  $\bar{q}_e, \bar{p}_e, q_e$  – оценки переменных,  $u_{e1}, u_{e2}$  – сигналы обратных связей наблюдателя.

Введем ошибки наблюдения:

$$\tilde{q}_e = q - \bar{q}_e, \quad \tilde{p}_e = \bar{p} - \bar{p}_e, \quad \tilde{q}_e = q - q_e, \quad (22)$$

и заметим, что ошибка  $\tilde{q}_e$  может быть измерена и используется для определения обратных связей. При достаточно малых ошибках наблюдения можно получить линеаризованную модель ошибок:

$$J\dot{\tilde{q}}_e = \tilde{p}_e - u_{e1}, \quad \dot{\tilde{p}}_e = -\alpha(\bar{q}_e)\tilde{q}_e - u_{e2}, \quad \tilde{q}_e = \bar{q}_e - \tilde{q} \sin \bar{q}_e, \quad (23)$$

где

$$\alpha(\bar{q}_e) = \frac{\partial^2 \bar{\Pi}}{\partial \bar{q}_e^2}.$$

Тогда, приняв во внимание, что при малых  $A$ ,  $|\tilde{q}| < 1$ , выберем обратные связи следующего вида:

$$u_{e1} = J \frac{k_1}{1 - \tilde{q}} \tilde{q}_e, \quad u_{e2} = -\alpha(\bar{q}_e)\tilde{q}_e + J \frac{k_2}{1 - \tilde{q}} \tilde{q}_e, \quad (24)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты обратных связей. Легко показать, что такой выбор обратных связей приводит к следующей линейной модели ошибок:

$$\tilde{q}_e = q - \bar{q}_e, \quad \tilde{p}_e = \bar{p} - \bar{p}_e, \quad \tilde{q}_e = q - q_e, \quad (22)$$

Видно, что  $\bar{q}_e \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$  и, таким образом, обеспечивает асимптотическую сходимость оценок переменных  $\bar{q}_e, \bar{p}_e$  к реальным значениям переменных  $q_e, p_e$ . Сходи-

мость переходных процессов оценки переменных  $\bar{q}_e, \bar{p}_e$  и энергии *медленных* колебаний маятника Капицы  $\bar{E}$  демонстрируется на рис. 4.

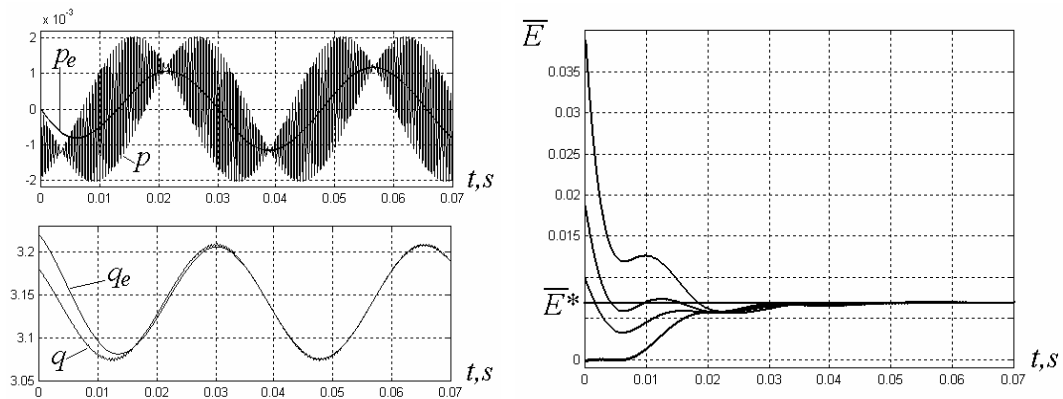


Рис. 4. Оценка *медленного* движения маятника Капицы

Определим заданный уровень энергии  $\bar{E}^*$ , введем ошибку (рассогласование виртуальной энергии)

$$\bar{\xi} = \bar{E}(p, q) - \bar{E}^* \quad (21)$$

и получим модель ошибки энергии

$$\dot{\bar{\xi}} = \frac{1}{J} \bar{p} G(\bar{q}) \bar{u} . \quad (21)$$

Устойчивое решение задачи дается алгоритмами управления вида

$$\bar{u} = J U(\bar{p}, G) k \bar{\xi} . \quad (21)$$

Система асимптотически устойчива по отношению к заданному значению  $\bar{E}^*$ , когда функция  $U$  для всех  $t > 0$  удовлетворяет неравенству (8).

Справедливость результатов подтверждается результатами моделирования. Рассмотрен маятник с параметрами  $m=0.01, l=0.1$  и вибрациями подвеса  $s=0.002\sin 2000t$ .

Алгоритм управления

$$\bar{u} = J \operatorname{sgn}(\bar{p} \sin \bar{q}) k \bar{\xi}$$

обеспечивает стабилизацию виртуальной энергии  $\bar{E}^*$  на уровне от 0 до 0.056, что соответствует устойчивым колебаниям маятника в верхнем положении с амплитудами до 1.2 рад. Рис. 5 демонстрирует сходимость процессов для случая  $E^*=0.025$ , когда амплитуда колебаний равна 0.45 рад.

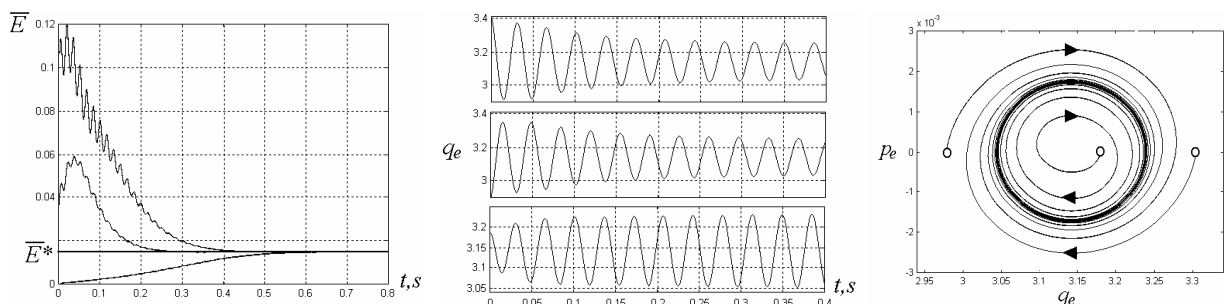


Рис. 5. Стабилизация колебаний в верхнем положении

## Литература

1. Андриевский Б.Р., Гузенко П.Ю., Фрадков А.Л. Управление колебаниями механических систем методом скоростного градиента. Автоматика и телемеханика, 1996, N 4. сс. 4–17.

2. Aracil J., Gordillo F., Acosta J.A. (2002). Stabilization of oscillations in the inverted pendulum. *15 IFAC World Congress*. Barselona.
3. Belman R.E., Bentsman J. and Meerkov S.M. (1986). Vibrational Control of a class of nonlinear systems: Vibrational Srabilization. *IEEE Trans. Aut.Control*, 32(8), 710–716.
4. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994.
5. Fradkov A.L. and Pogromsky A. (1998). Introduction to control of oscillations and chaos, World Scientific, Singapore.
6. Мирошник И.В., Фрадков А.Л., Никифоров В.О. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
7. Chung C.C, and Hauser J. (1995). Nonlinear control of a swinging pendulum. *Automatica*, 31, pp. 851–862.
8. Fradkov A.L. (1996). Swinging control of nonlinear oscillations. *International Journal of Control*, 64(6), pp. 1189–1202.
9. Капица П.Л. Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса // *ЖЕТФ*. 1951. Т.21, №5, сс. 588–607.
10. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
11. Miroshnik I. and Bobtsov A. (2000). Stabilization of motions of multipendulum systems. 2nd Int. Conf. on Control of oscillation and chaos. St.Petersburg. vol. 1, pp. 22–25.
12. Miroshnik I.V, Olkhovskaya E. (2003). Spatial problems of nonlinear dynamics. Motivation and analysis. Int. Conference Physics and Control (PhisCon 2003), St.Petersburg.
13. Shiriaev A.S., Egeland O. and Ludvigsen H. (1998). Global stabilization of unstable equilibrium point of pendulum. Proc. 37th CDC, Tampa, pp. 4584–4585.
14. Shiriaev A.S., Ludvigsen H., Egeland O., Fradkov A.L. (1999). Swinging Up of Non-affine in Control Pendulum. Proc. American Control Conference, San Diego, California.
15. Stephenson A. (1908). On induced stability. *Phil. Mag.* 15, 233–236.
16. Yabuno H., Goto K. and Aoshima N. (2002). Swing-up and Stabilization of an Inverted Pendulum without Feedback Control – Application of a Bifurcation Control to a Pendulum with Two Degrees of Rotational Freedom, SICE Annual Conference, TEA 09-3.
17. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. 2-е изд. М.: Физматгиз. 1962. 410с.
18. Odinets N. and Levidova N. (2004). Kapitza pendulum: Modelling and observing. In: Preprints of 10-th Baltic Olympiad on Automatic Control. pp. 22–28. SPbSU ITMO, St.Petersburg.

# РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ СНОСА ФАКЕЛА КОРОННОГО РАЗРЯДА

А.В. Кушнарев, Д.С. Орлов

Научные руководители – к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев,  
к.т.н., доцент А.Ю. Ощепков (ООО «НПП Системы контроля», г. Пермь)

## Введение

Измерение малых скоростей воздушного потока необходимо при создании систем вентиляции и кондиционирования жилых и производственных помещений, контроля состояния атмосферы на спортивных сооружениях при регистрации рекордов, а также при разработке метеостанций и метеозондов.

Наиболее распространенные в настоящее время методы измерения скорости воздушных потоков с использованием крыльчаток, флюгеров и термоанемометров не позволяют одновременно определять составляющие скорости воздушного потока с периодом измерения порядка долей секунд.

Ниже представлены результаты разработки датчика скорости воздушного потока в диапазоне скоростей 0–5 м/с, основанного на измерении величины сноса ионов измеряемым воздушным потоком.

## 1. Принцип действия ионного датчика скорости воздушного потока.

Рассмотрим принцип действия чувствительного элемента датчика на следующей модели (рис. 1.1).

Поток ионов воздуха в датчике генерируется коронным разрядом на острие иглы и движется к приемной матрице. Измеряемый воздушный поток сносит ионы в перпендикулярной к оси датчика плоскости и, следовательно, способствует тому, чтобы ионный пучок падал не в центр приемной матрицы, а в зону, отстоящую от этого центра на некоторые величины  $D_x$  и  $D_y$ . Эти величины (проекции смещения на оси координат) пропорциональны измеряемым составляющим скорости. Ось  $Z$  перпендикулярна скорости измеряемого воздушного потока.

Для регистрации величины сноса ионного пучка приемная матрица выполнена в виде круга разделенного на четыре равных сегмента.

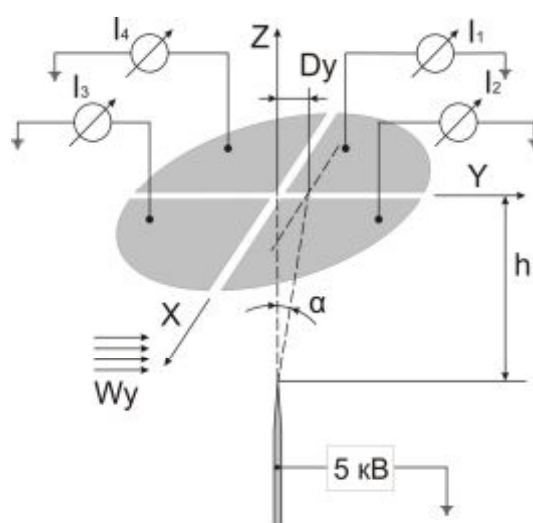


Рис. 1.1. Схема измерительного элемента ионного датчика скорости воздушного потока

Положительный потенциал от высоковольтного источника  $U = +5$  кВ подается на коронирующую иглу, а отрицательный – на сегменты приемной матрицы, расположенной параллельно набегающему воздушному потоку и отстоящей от иглы на расстояние

*h.* К каждому из четырех сегментов подключены измерители малых токов. Предположим, что при отсутствии измеряемого воздушного потока, т.е. когда  $\vec{W}(x, y) = 0$ , осесимметричный ионный пучок будет попадать на середину приемной матрицы, тогда все четыре тока будут равны. В случае, когда измеряемый поток будет иметь только одну компоненту, т.е. направлен только вдоль оси  $X$  или только вдоль оси  $Y$ , то соответствующие разности токов будут равны нулю, т.е.  $(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3) = 0$  или  $(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4) = 0$ .

Ионы воздуха, генерируемые коронным разрядом на острие иглы, под действием электростатического поля  $\vec{E}$  будут смещаться в сторону приемной матрицы, создавая вынужденное электроконвективное движение  $\vec{W}_i$ . Скорость такого движения линейно зависит от вынуждающей силы – напряженности электрического поля  $\vec{E}(z)$

$$\vec{W}_i(z) = \mu_0 \frac{\rho(P, T)}{\rho_0} \vec{E}(z), \quad (1)$$

где  $\mu_0$  и  $\rho_0$  – подвижность и плотность воздуха при нормальных условиях, а  $\rho(P, T)$  – плотность воздуха при атмосферном давлении  $P$  и температуре  $T$ . Оценки значений  $|\vec{W}_i|$  для характерных величин поля  $E$  и значений параметра  $\mu_0$  показывают, что в рассматриваемом случае  $|\vec{W}_i| \gg |\vec{W}|$  и углы отклонений ионного пучка от оси  $Z$  малы, т.е.  $\alpha \approx 0$ . Следовательно, справедливо допущение, что вертикальная составляющая скорости движения ионов близка к  $W_i$ , т.е.  $W_z \approx W_i$ .

Время перемещения иона от острия иглы до приемной матрицы на расстояние  $dz$  можно оценить по формуле

$$d\tau(z) = \frac{\rho_0 dz}{\mu_0 \rho E(z)}. \quad (2)$$

Если предположить что профиль измеряемого воздушного потока в пространстве между иглой и приемной матрицей автомоделен, т.е. задается произведением  $W_y \Psi(z)$ , где  $W_y$  –  $Y$ -составляющая измеряемого потока, то величина сноса ионов вдоль оси  $Y$  будет определяться выражением

$$D_y = W_{0y} \left\{ \frac{\rho_0}{\mu_0 \rho} \int_{-h}^0 \frac{\Psi(z)}{E(z)} dz \right\}. \quad (3)$$

Известно, что ионизация молекул воздуха в основном происходит только в тонком слое (этот светящийся слой и называется «коронной»), а падение потенциала в этой зоне равно напряжению «зажигания» короны,  $V_0 \approx 10^2$ . Тогда разность потенциалов, приводящих в движение ионы, в рабочем промежутке будет равна  $U - V_0$ , а модуль напряженности электрического поля может быть представлен в виде

$$E(z) = (U - V_0) f(z, \dots). \quad (4)$$

Здесь функция  $f(z, \dots)$  зависит только от координаты  $z$ , кривизны иглы и конфигурации других электродов.

Принимая во внимание выражение (4), интеграл в формуле (3) можно записать в следующем виде

$$\int_{-h}^0 \frac{\Psi(z)}{E(z)} dz = \frac{F(h, \dots)}{(U - V_0)}. \quad (5)$$



Здесь  $F(h, \dots)$  – геометрический фактор, зависящий только от конфигурации электродов внутри измерительной головки и не зависящий от скорости набегающего потока, разности потенциалов и плотности воздуха.

Поскольку, как уже упоминалось, отклонение оси ионного пучка, обусловленное сносом ионов измеряемым воздушным потоком, невелико, то разность токов  $\Delta I_y = (I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)$  в первом приближении будет пропорциональна величине суммарного тока  $I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$  и величине смещения оси пучка ионов  $D_y$ , т.е.

$$\Delta I_y = I_0 D_y. \quad (6)$$

Известно также, что вольтамперная характеристика коронного разряда хорошо аппроксимируется выражением

$$I_0 = \mu_0 \frac{\rho}{\rho_0} U(U - V_0) \chi(h, \dots), \quad (7)$$

где  $\chi(h, \dots)$  – геометрический фактор.

Подставив (7) в (6) и используя выражения (4) и (5), получаем

$$\Delta I_y = G(h, \dots) U W_y. \quad (8)$$

где  $G(h, \dots)$  – постоянная величина при неизменной конфигурации электродов. Аналогичные рассуждения можно провести для ортогональной координаты

$$\Delta I_x = G(h, \dots) U W_x. \quad (9)$$

Таким образом, при малых отклонениях оси ионного пучка величина, соответствующая разности токов, попадающих на сегменты приемной матрицы, прямо пропорциональна скорости измеряемого воздушного потока при стабильном потенциале на коронирующей игле и не зависит от давления и температуры воздуха в «метеорологических» пределах.

## 2. Описание конструкции ионного датчика

Датчик скорости воздушного потока представляет собой цилиндрическое тело диаметром 76 мм и высотой 500 мм (рис. 2.1). В верхней части датчика расположена измерительная головка (1). В средней части расположены высоковольтный блок (2), генерирующий стабилизированное напряжение 5 кВ, электронный блок (3) и блок питания (4). В нижней части датчика находится электрический разъем (5) и присоединительный фланец. Питание датчика 24 В. Выходной сигнал генерируется в виде постоянного напряжения в диапазоне  $\pm 10$  В и в цифровом виде через интерфейс RS 485.

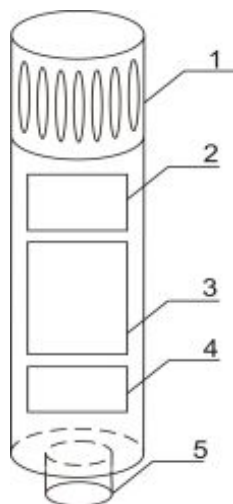


Рис. 2.1. Схематическое изображение датчика

При измерении плоского воздушного потока ось датчика располагается перпендикулярно направлению скорости потока  $\vec{W}$ . В случае метеорологических измерений ось датчика располагается вертикально.

На рис 2.2 представлено сечение измерительной головки. Измеряемый воздушный поток попадает в рабочую полость (1) через 36 вертикальных щелевых отверстий (2) и обдувает коронирующую иглу (3). Держатель иглы (4) выполнен из композитного фторопласта, наполненного стеклом.

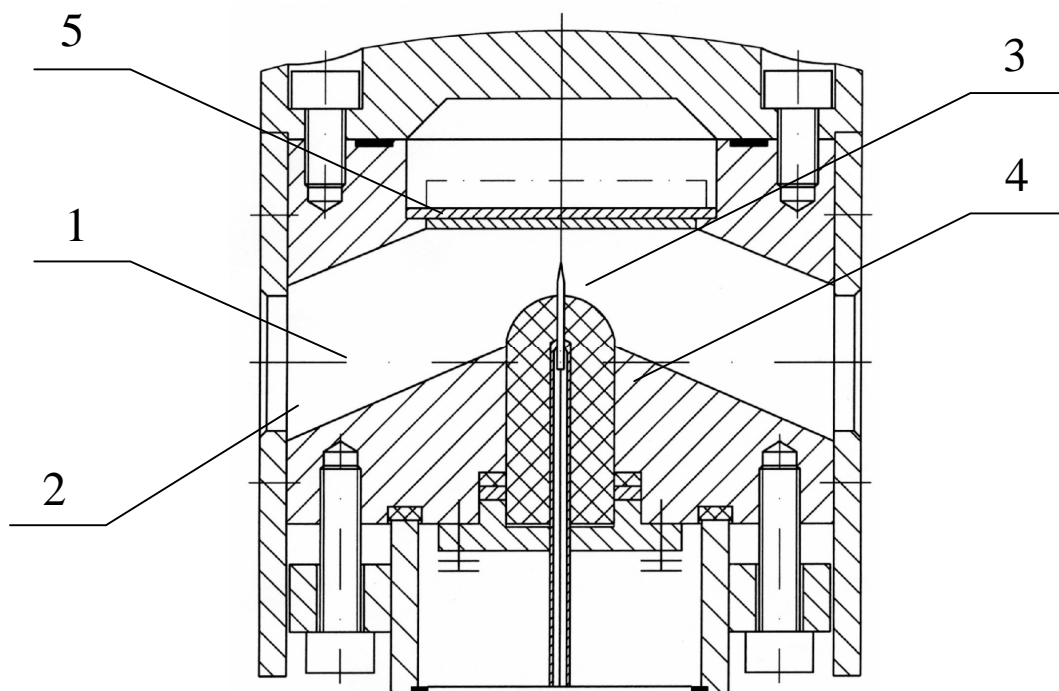


Рис. 2.2. Конструкция измерительной головки

Приемная матрица (5) выполнена в виде диска диаметром 40 мм из фольгированного текстолита с антикоррозийным покрытием, разделенного на 4 равных сегмента (рис. 2.3). На верхней стороне приемной матрицы выполнена схема электроподогрева.

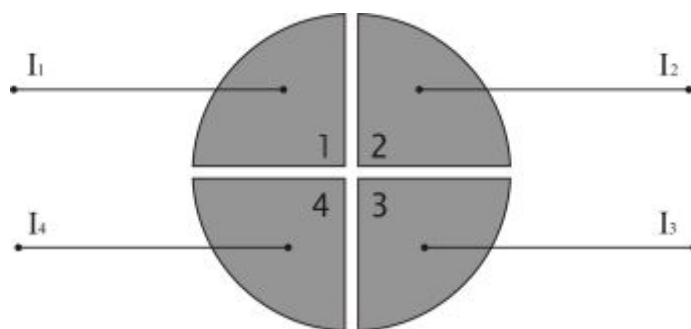


Рис. 2.3. Приемная матрица ионного датчика

### 3. Принципиальная схема датчика

На рис. 3.1 представлена блок-схема датчика [2]. Основной схемой является микроконтроллер. Задачей контроллера является обработка сигналов, поступающих с датчиков, и формирование выходных сигналов прибора. Микроконтроллер осуществляет прием данных с аналого-цифрового преобразователя и организует связь с компьютером, управляет мультиплексором и высоковольтным источником питания.

Постоянный ток, обусловленный падением ионов воздуха на сегменты матрицы, поступает на вход преобразователей ток-напряжение. С преобразователей ток-напряжение сигналы подаются на четыре входа аналогового мультиплексора. Входы мультиплексора переключаются микроконтроллером, и далее сигналы поступают на вход АЦП.

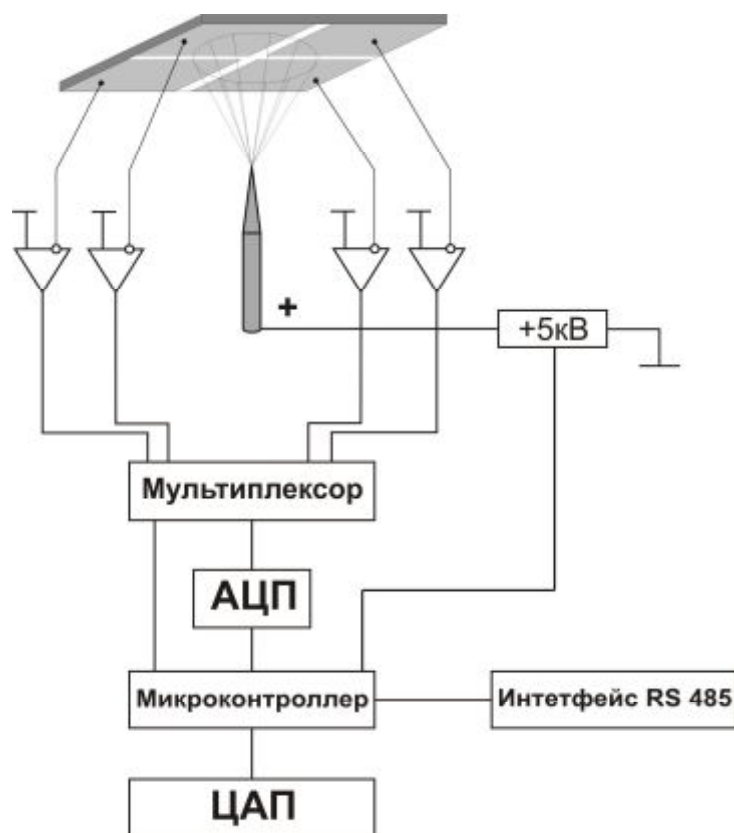


Рис. 3.1. Блок-схема прибора

Микроконтроллер производит обработку полученных данных и формирует аналоговые и цифровые выходные сигналы.

#### 4. Результаты испытаний ионного датчика скорости воздушного потока

Для создания воздушного потока использовалась аэродинамическая труба диаметром около 400 мм и длиной 6 метров. Датчик располагался на расстоянии 1 метра от входного сопла трубы. На расстоянии 3 метров от входного сопла трубы располагался ламинаризатор, выполненный в виде плоской решетки длиной 700 мм и размером ячеек примерно 70 мм × 70 мм. Отверстия измерительной головки располагались в средней части трубы. Перед началом экспериментов были произведены тестовые измерения скорости воздушного потока в различных сечениях трубы. Неоднородность потока в плоскости, перпендикулярной воздушному потоку, не превышала  $\pm 0.1$  м/с.

Испытания датчика проводились в диапазоне скоростей от 0.1 м/с до 5 м/с. Измерение воздушного потока в аэродинамической трубе осуществлялось с помощью крыльчатого анемометра АСО-3 в диапазоне от 0.1 м/с до 1 м/с и чашечного анемометра МС-13 в диапазоне от 1 м/с до 5 м/с.

На рис. 4.1 и 4.2 представлены результаты измерения двух составляющих скорости при отсутствии воздушного потока. По истечении 300 секунд от начала эксперимента был включен цифровой фильтр с постоянной времени 2,5 секунды. До включе-

ния фильтра среднее отклонение каждой из составляющих от нуля составляло  $\pm 0.05$  м/с, а после включения фильтра составило  $\pm 0.02$  м/с.

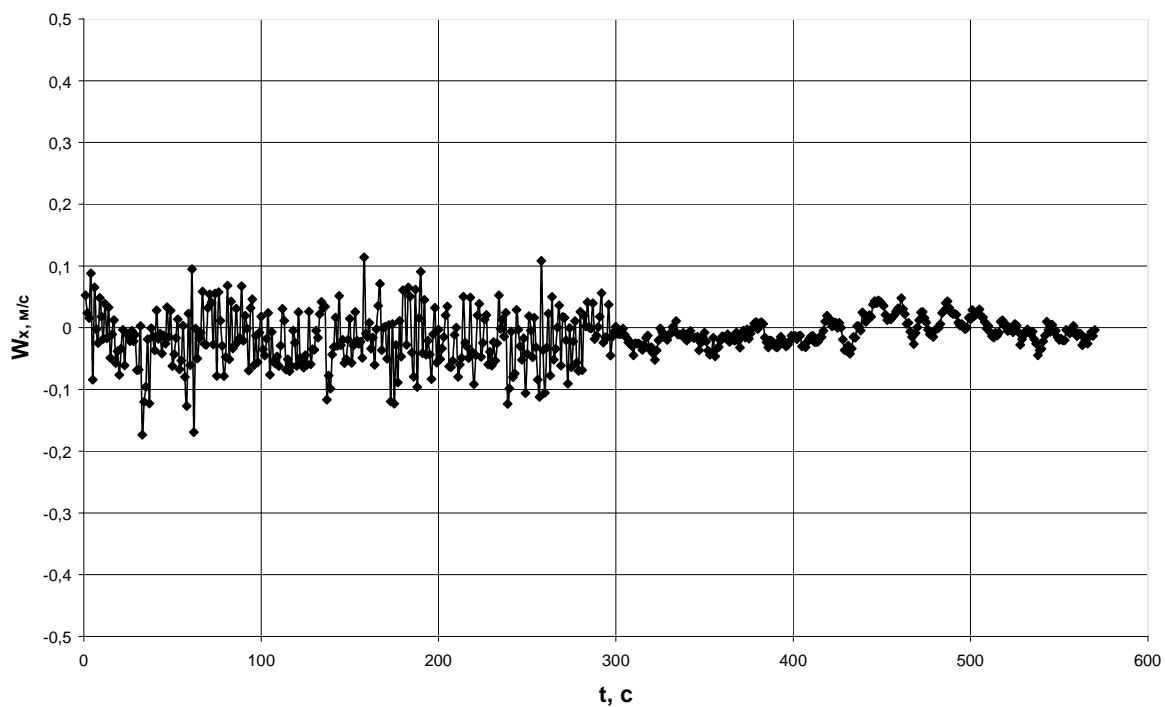


Рис. 4.1. Выходной сигнал  $W_x$  при отсутствии воздушного потока

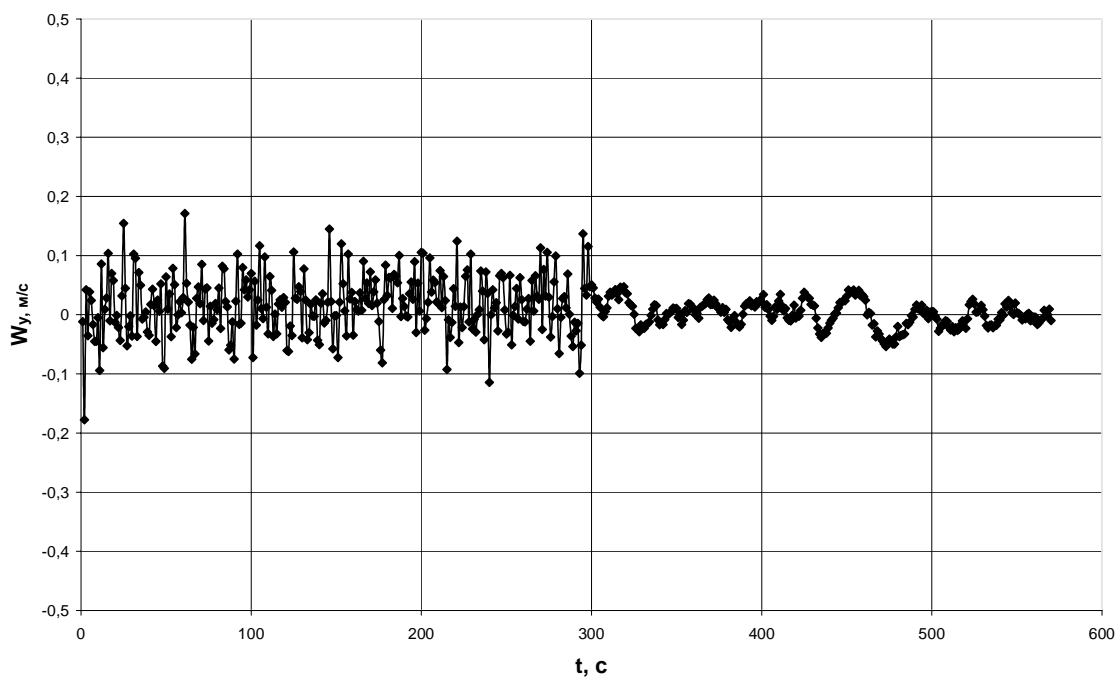


Рис. 4.2. Выходной сигнал  $W_y$  при отсутствии воздушного потока

Все измерения были произведены при скоростях воздушного потока от  $-5$  м/с до  $+5$  м/с. На рис. 4.3 и 4.4 представлены калибровочные характеристики для X и Y составляющих скорости воздушного потока.

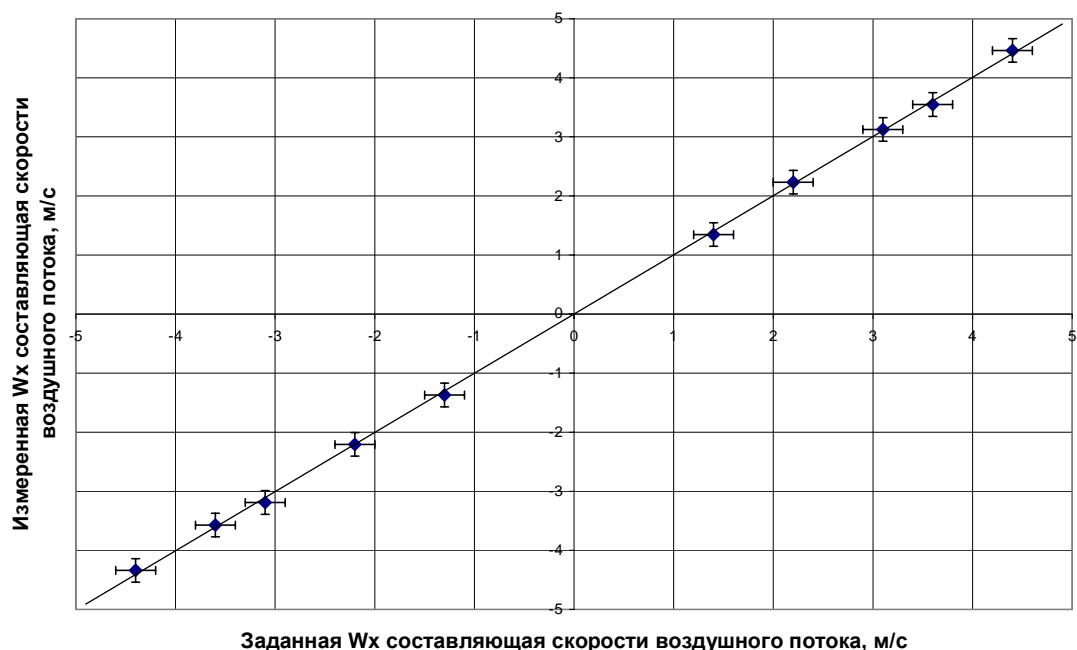


Рис. 4.3. Калибровочная характеристика X составляющей скорости воздушного потока

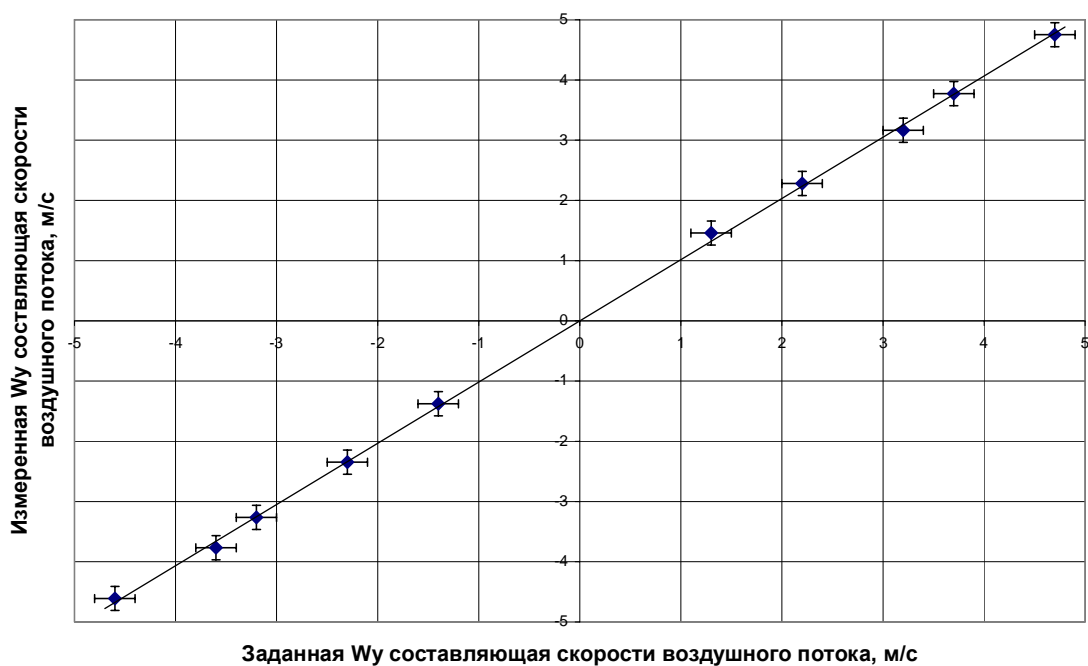


Рис. 4.4. Калибровочная характеристика Y составляющей скорости воздушного потока

В ходе испытаний была получена зависимость показаний ионного датчика от угла набегания воздушного потока. Для этого при фиксированной скорости воздушного потока 3.8 м/с датчик вращался вокруг оси симметрии, перпендикулярной воздушному потоку, с постоянной угловой скоростью 1 оборот за 360 секунд. Результаты измерений представлены на рис. 4.5.

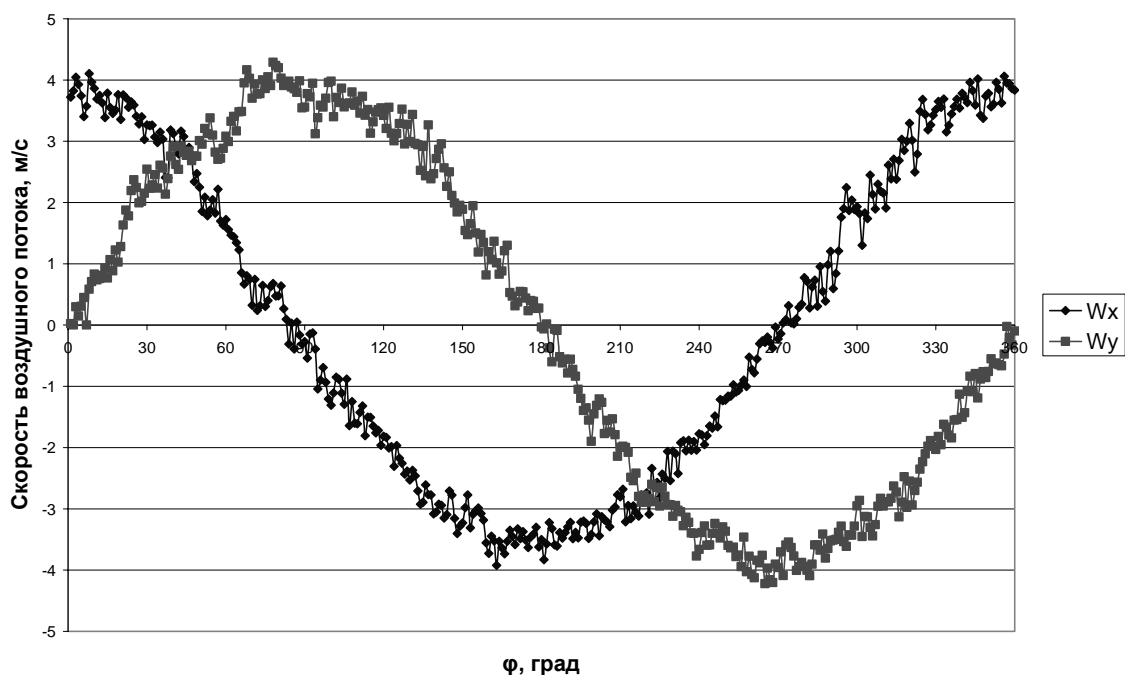


Рис. 4.5. Зависимость показаний ионного датчика от угла набегания воздушного потока

Погрешность измерения составляющих скорости складывается из погрешностей, связанных с турбулентностью воздушного потока внутри измерительной головки, неоднородностью ионного потока и погрешностей, вносимых отверстиями в измерительной головке ионного датчика. Используя полученные зависимости  $W_x$  и  $W_y$  от угла поворота  $\varphi$ , были вычислены углы набегания воздушного потока на датчик.



Рис. 4.6. Зависимость измеренного значения угла набегания воздушного потока от заданного значения

Результаты представлены на рис. 4.6. Погрешность определения угла составила  $\pm 3$  град. Результаты определения модуля скорости воздушного потока представлены на рис. 4.7. Как видно из графика, модуль скорости не зависит от угла поворота ионного датчика, а среднее значение измеренной скорости составило 3.8 м/с, что совпадает с заданным значением. Среднее отклонение составило  $\pm 0.25$  м/с.

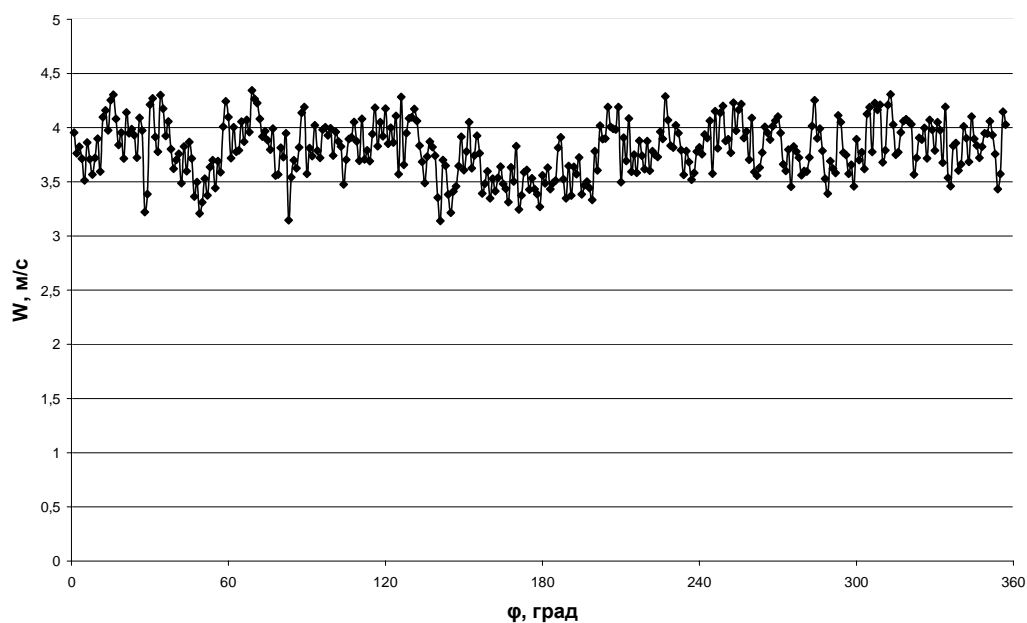


Рис. 4.7. Измеренные значения модуля скорости воздушного потока при различных углах ориентации датчика

### Заключение

Разработка датчика малых скоростей воздушного потока (0–5 м/с) на основе сноса факела коронного разряда позволяет одновременно определять две составляющих скорости плоского потока воздуха с погрешностью  $\pm 0.3$  м/с.

Датчик может быть использован в установках автоматизации систем вентиляции и кондиционирования, а также в качестве составных частей метеостанций и метеозондов.

### Литература

1. Измерения в промышленности: Справочное издание. В 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: / Пер. с нем. Под ред. П.Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 384 с.
2. Орлов Д.С., Саенко А.П. Разработка системы для измерения скорости ветра температуры воздуха и атмосферного давления / Тезисы проектов Всероссийского конкурса на лучшие научные работы студентов по техническим наукам. В 2-х томах. Том 2. М.: МИЭМ, 2004. С.362–365.

# РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

А.С. Агеев, Т.К. Агеева

Научные руководители – д.ф.-м.н., профессор М.А. Марценюк,  
к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев

## 1. Введение

В настоящее время для высокоточного регулирования температуры промышленных электропечей, обладающих тепловой инерцией, используются пропорционально–интегральные (ПИ) регуляторы. Настройка ПИ-регуляторов требует сложной математической обработки результатов специальных тестовых экспериментов и, в силу этого, может производиться только квалифицированным персоналом. При переносе регулятора на другой объект или в случае существенного изменения тепловых характеристик объекта процедуру настройки необходимо проводить заново.

Усложнение технологического оборудования и, вместе с тем, отсутствие квалифицированного персонала зачастую делает невозможным использование регулятора с ПИ-алгоритмом.

Таким образом, перед разработчиками и изготовителями терморегулирующих приборов встала задача создания «умных» приборов, работающих по принципу «включил и забыл», таких приборов, которые бы после включения находили бы сами оптимальное значение коэффициентов ПИ-алгоритма и использовали бы эти коэффициенты в последующем для терморегулирования.

Ниже приведены результаты разработки и проверки на реальных промышленных объектах алгоритма самонастройки пропорционально-интегрального регулятора температуры.

Серия экспериментов, проведенных на тепловых объектах, значительно различающихся по размерам и динамическим характеристикам (сушильная печь, муфельная печь и электроплита), показали высокое качество регулирования.

## 2. Структура алгоритма работы регулятора температуры

**2.1. ПИД-регуляторы.** В этом регуляторе величина теплового воздействия  $Q$  в долях от максимальной мощности определяется следующей интегрально–дифференциальной зависимостью от величины невязки

$$Q(t) = \frac{1}{K_P} (\Delta\Theta(t) + \frac{1}{K_I} \int_0^t \Delta\Theta(\tau) d\tau + K_D \frac{d\Theta(t)}{dt}) , \quad (2.1)$$

где  $\Delta\Theta$  – величина невязки. Здесь первое слагаемое соответствует пропорциональной, второе интегральной, а третье дифференциальной частям ПИД-алгоритма.

Соответственно, наличие в устройстве регулирования одного или более блоков, вырабатывающих управляющий сигнал, называют усеченные алгоритмы регулирования: П – пропорциональный; ПИ – пропорционально–интегральный и полный алгоритм ПИД когда «работают» все три слагаемых.

Отличительной особенностью промышленных объектов терморегулирования является их высокая термоинерционность по отношению к тепловым возмущающим факторам в сравнении с более низкой инерционностью к тепловым регулирующим воздействиям. Это обусловлено тем, что тепловое состояние промышленных объектов оберегают с помощью теплоизоляции, а нагреватели, напротив, с целью повышения эффективности их работы,



вводят во внутрь объекта. Это обстоятельство зачастую упрощает алгоритм терморегулирования, делая роль дифференциального слагаемого несущественной.

**2.2 Алгоритм самонастройки. ПИ-регулятора методом предварительной идентификации.** Пуск регулятора в эксплуатацию совместно с конкретным объектом регулирования начинается с предварительной идентификации объекта регулирования. На этом этапе производится регулирование температуры объекта в двухпозиционном режиме на отметке 0,5-0,7 от температуры «уставки». Снижение уровня регулирования выполняется с целью защиты объекта от перегрева во время переходного процесса. Далее, по динамике температуры и формулам (2.2), определяются коэффициенты ПИ-регулятора (рис. 1):

$$K_i = t_3 - t_1, \quad (2.2)$$

$$K_p = (t_3 - t_1)^2 \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{\text{остыв}} / (t_3 - t_2),$$

где  $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{\text{остыв}}$  – максимальное по абсолютной величине значение скорости убывания температуры объекта.

Алгоритм нахождения интегрального коэффициента  $K_i$  взят из [1]. Формула для нахождения пропорционального коэффициента найдена из анализа аналитической тепловой модели процесса регулирования.

После двух полных периодов колебания температурной кривой этап идентификации заканчивается и включается ПИ-регулятор с найденными коэффициентами.

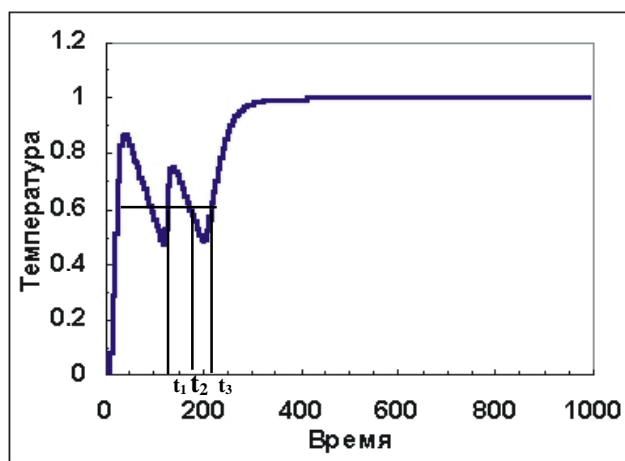


Рис.1. Динамика температуры на этапе идентификации

### 3. Проверка эффективности алгоритма самонастройки

#### 3.1. Описание экспериментальной установки

Разработанному регулятору температуры был присвоен индекс Термодат-19. В настоящее время прибор Термодат-19 выпускается на предприятии «Системы контроля», г. Пермь [2].

Прибор имеет четыре универсальных входа как для работы с термосопротивлениями, так и для работы с термопарами. Внутреннее разрешение составляет 0,1°C.

Отличительной особенностью данного прибора является наличие графического дисплея (разрешение 320×240 точек). В процессе работы на дисплей выводится график температуры в реальном времени по одному каналу или по всем четырем одновременно. Одним из преимуществ графического дисплея является возможность использовать полноценное меню, удобное для пользователя.

Четыре управляющих выхода могут быть выполнены в следующих модификациях:

- релейные, позволяющие управлять нагрузкой (8А, ~ 220В), либо управлять промежуточным пускателем;
- симисторные, для расщипки более мощного симистора;
- комбинированные релейно-симисторные выходы, позволяющие предотвратить образование искры при срабатывании реле;
- транзисторные, для плавного управления мощностью трехфазных или однофазных нагревателей с помощью силовых тиристорных блоков.

Также Термодат-19 имеет дополнительное реле (8А, ~ 220В), которое может использоваться для включения охлаждения, для сигнализации об аварийной ситуации, для сигнализации об окончании шага и всей программы регулирования.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Прибор выполнен на базе микроконтроллера ATMEGA128 с AVR RISC ядром. Быстродействие данного микроконтроллера почти в десять раз превышает быстродействие аналогичных микроконтроллеров с ядром MCS-51.

Для хранения графика температуры с привязкой по времени используется микросхема Flash-памяти размером 1 МБ и часы реального времени.

Прибор имеет интерфейс RS485 для связи с персональным компьютером. В ходе экспериментов данные об измеренной температуре поступали на компьютер и записывались в файл для дальнейшей обработки с помощью приложения MS Office Excel.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Мощность электронагревателей, установленных на объекте, управлялась регулятором температуры с помощью силового тиристорного блока, который подключался к сети 220 В. Измерение температуры объекта осуществлялось с помощью термопары ХА(К). Управление мощностью осуществлялось по методу распределенных сетевых периодов.

В методе равномерного распределения рабочих сетевых периодов нагрузка периодически включается на сетевой период (20 мсек). Выводимая мощность распределяется равномерно по 256 периодам. Другими словами, при 100% мощности нагреватель включен постоянно – все периоды рабочие, при 50% мощности нагрузка выключена каждый второй период и т.д. (рис. 3).

Программа, и, соответственно, меню прибора Термодат-19 содержит блок в виде подпрограммы – «Автонастройка».

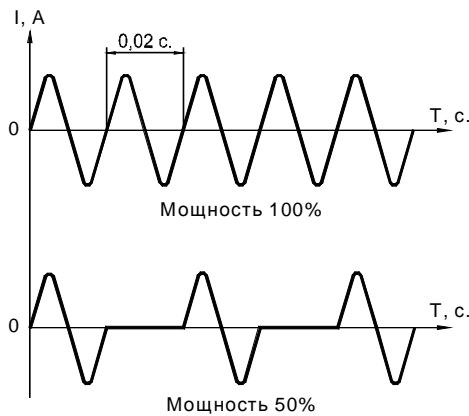


Рис. 3. Диаграмма зависимости силы тока от времени для метода распределенных сетевых периодов

После вызова подпрограммы «Автонастройка» блокируется возможность изменения «уставки». Далее подпрограмма определяет отклонение измеренного значения температуры в текущее время от значения «уставки». Если в момент включения подпрограммы измеренная температура выше температуры «уставки» или разница между ними меньше 10 градусов, то нагреватель не включается, ожидается, что произойдет естественное охлаждение объекта до необходимой температуры.

Если же после включения подпрограммы «Автонастройка» измеренная температура будет ниже, чем  $T_{уст} - 10$ , то вычисляется значение вспомогательной «уставки»  $T_{кол} = T_{старт} + (T_{уст} - T_{старт}) \cdot 0.7$  и включается нагреватель на 100%. Вследствие этого происходит повышение температуры до значения вспомогательной «уставки»  $T_{кол}$ . Алгоритм самонастройки разрешает регулирование в двухпозиционном режиме в течение двух релаксационных колебаний измеренной температуры. Первое колебание температуры носит обычно переходный характер с выраженным перерегулированием. Расчет коэффициентов ПИ-регулирования производился по анализу динамики температурной зависимости второго релаксационного колебания.

После нахождения коэффициентов ПИ-регулятора проводилась контрольная их проверка на «разумность» путем сравнения их с оценочными значениями, найденными по разгонной кривой (10–300 %). Значения коэффициентов, найденные по разгонной кривой, по порядку величины отражают динамическое поведение объекта регулирования, но обладают существенно меньшей «оптимальностью». В случае несоответствия параметров друг с другом алгоритм самонастройки выдает соответствующее сообщение. Дополнительная проверка осуществляется также на контроль времени выхода на температуру  $T_{кол}$ . Если мощности нагревателя не хватает для выхода на заданную температуру за контрольное время, то оптимальное регулирование невозможно, и пользователю об этом будет сообщено.

После нахождения и проверки ПИ-коэффициентов они записываются в память прибора, и автоматически включается ПИ-регулирование с найденными коэффициентами.

### 3.2. Тестирование алгоритма на тепловых объектах

После разработки алгоритма его эффективность была проверена на объектах, отличающихся друг от друга по размеру, массе, тепловой мощности нагревателя, полной теплоемкости, коэффициенту теплоотдачи.

Оценочная полная теплоемкость объекта  $G$ , или количество тепловой энергии, необходимой для повышения его температуры на 1 °С, оценивалась по формуле

$$G * \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q,$$

где  $Q$  – максимальная мощность нагревателя [Вт]. Оценочный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  находился из дифференциального уравнения, описывающего процесс остывания,

$$G * \frac{\partial(T - T_0)}{\partial \tau} = -\alpha * (T - T_0),$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды.

Постоянная времени остывания  $\tau^*$  объекта оценивалась как отношение теплоемкости объекта к коэффициенту теплоотдачи  $\tau^* = \frac{G}{\alpha}$ .

Работа регулятора с предварительной идентификацией проверялась на следующих объектах: сушильная печь, муфельная печь, электроплита.

Перечисленные выше характеристики всех объектов приведены в табл. 1.

|                   | Q, Вт | G, Дж/°С      | $\alpha$ , Вт/°С | $\tau^*$ , сек | $K_p$ , °С    | $K_i$ , с      | Q/G  |
|-------------------|-------|---------------|------------------|----------------|---------------|----------------|------|
| промышленная печь | 4400  | $110 * 10^3$  | 39,3             | $2,8 * 10^3$   | $5,2 \pm 0,7$ | $880 \pm 40$   | 0,04 |
| муфельная печь    | 880   | $22 * 10^3$   | 12,41            | $1,8 * 10^3$   | $3,0 \pm 0,5$ | $760 \pm 150$  | 0,04 |
| электроплита      | 1420  | $3,35 * 10^3$ | 1,4              | $2,4 * 10^3$   | $45 \pm 9$    | $1450 \pm 120$ | 0,65 |

Таблица 1. Характеристики объектов

Первым и наиболее практически значимым объектом для экспериментов по проверке эффективности алгоритма самонастройки, по нашему мнению, является сушильная печь. Печь использовалась в производстве для сушки окрашенных деталей и имела размеры  $2200 \times 2000 \times 1000$  мм и массу 400 кг. Электронагреватель печи имел максимальную мощность 4400 Вт. Серия из пяти экспериментов с использованием промышленной печи проводилась для различных начальных температур с одной и той же «уставкой»  $T_{уст} = 180^\circ\text{C}$ .

Каждый эксперимент состоял из двух этапов: определение коэффициентов ПИ регулирования при разных начальных температурах и повторный пуск «холодной» печи в режиме ПИ-регулирования с найденными коэффициентами для проверки эффективности регулирования. Ниже приведены результаты эксперимента для печи при начальной температуре  $T_{старт} = 47 \pm 3^\circ\text{C}$ . Зависимость температуры от времени, полученная в ходе эксперимента, приведена на рис. 4.

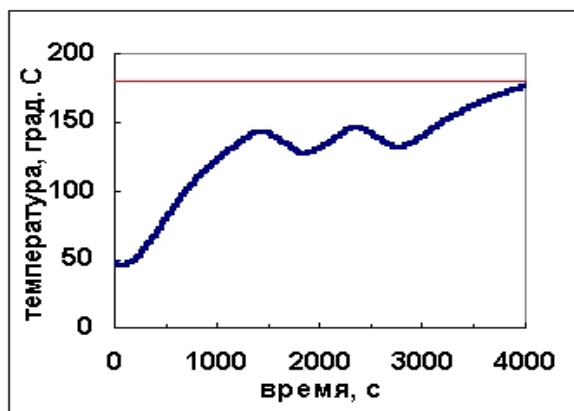


Рис. 4. Динамика температуры в эксперименте по определению параметров ПИ-регулирования. Этап идентификации и начало регулирования

По оси абсцисс отложено время в секундах, по оси ординат – измеренная температура печи в  $^\circ\text{C}$ . Первый участок графика соответствует нагреву в позиционном режиме регулирования до температуры  $T_{кол} = 0,7(T_{уст} - T_{старт})$ , в данном случае до  $T_{кол} = 140^\circ\text{C}$ . Температура дос-

стигает  $T_{\text{кол}}$  за 1400 с. Вблизи температуры  $T_{\text{кол}}$  регулирование осуществлялось по двухпозиционному закону на протяжении двух периодов или 1700 с. Используя результаты измерений, подпрограмма самонастройки производила вычисления ПИ-коэффициентов. Коэффициенты записывались в память прибора, и включался режим ПИ-регулирования с найденными ПИ-коэффициентами. Температура в режиме ПИ-регулирования достигает «уставки»  $T_{\text{уст}} = 180^\circ\text{C}$  ориентировочно за 1000 с.

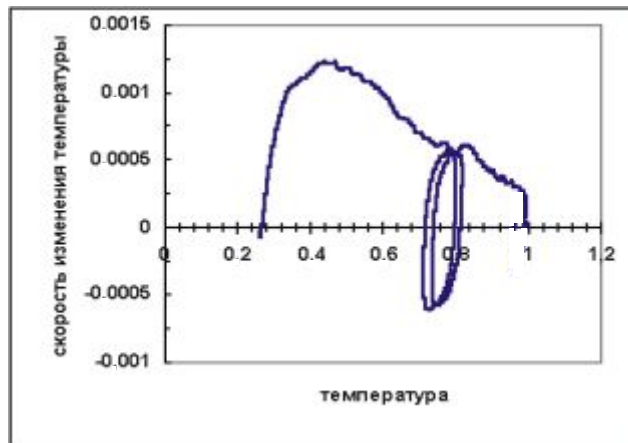


Рис. 5. Фазовая диаграмма процесса идентификации и начала регулирования

Этот же процесс отражен на фазовой диаграмме (рис. 5). По оси ординат отложена безразмерная температура  $t = T/T_{\text{уст}}$ , по оси абсцисс ее производная  $dt/dt$ .

На первом участке фазовой диаграммы наблюдается увеличение скорости роста температуры, на втором плавное снижение, затем, при достижении температурой  $t_{\text{кол}} = 0.7$ , наблюдаются два цикла колебаний и выход на полюс  $t_{\text{уст}} = 1.0$ ,  $dt/dt = 0$ .

В результате этого эксперимента подпрограмма насчитала и записала в память коэффициенты  $K_p = 5.8^\circ\text{C}$ ,  $K_i = 940$  с.

На втором этапе эксперимента осуществлялся повторный запуск «холодной» промышленной печи с коэффициентами, найденными на первом этапе. Разгонная кривая для этого процесса приведена на рис. 6.

В соответствии с алгоритмом регулирование до значения температуры  $0.8T_{\text{уст}}$  осуществлялось в пропорциональном режиме (работал только П-регулятор с  $K_p = 5.8^\circ\text{C}$ ), и только после достижения температурой этого значения включалась и интегральная составляющая (ПИ-регулятор с  $K_p = 5.8^\circ\text{C}$ ,  $K_i = 940$  с). Температура достигала уставки за 2800 с, далее следует незначительное перерегулирование -  $T_{\text{макс}} = 185 \pm 0.5^\circ\text{C}$  и быстрый выход на «уставку». Все время нагрева и выхода на «уставку» составляет 3500 с, и после этого прибор в режиме ПИ с найденными коэффициентами поддерживает высокое качество регулирования. Фазовая траектория для этого процесса отражена на рис. 7.

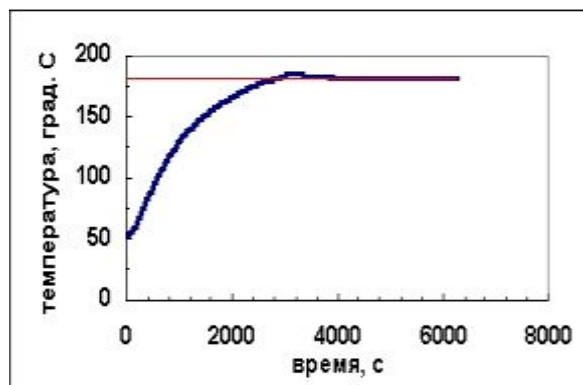


Рис. 6. Динамика температуры промышленной печи при повторном пуске с найденными параметрами ПИ- регулирования

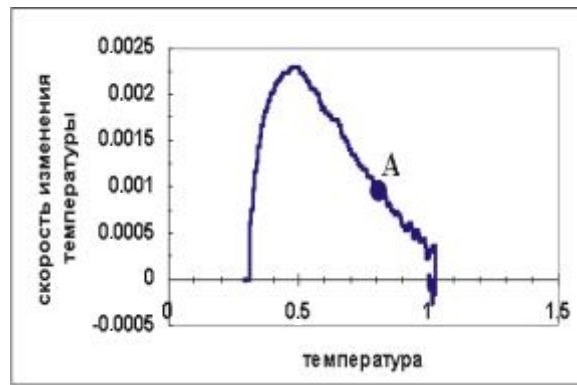


Рис. 7. Фазовая диаграмма процесса регулирования температуры промышленной печи с найденными параметрами ПИ-регулирования

Момент включения интегральной составляющей отмечен точкой А. После подключения интегральной части алгоритма фазовая траектория по почти оптимальной траектории стремится к полюсу, что, как мы считаем, соответствует практически оптимальному выбору ПИ-коэффициентов. Аналогично были проведены еще четыре эксперимента, данные по всем экспериментам приведены в табл. 2.

| $N$              | $T_{\text{старт}}, ^\circ\text{C}$ | $K_p, ^\circ\text{C}$ | $K_{\text{рсп}}-K_p$ | $K_i, \text{c}$ | $K_{\text{иср}}-K_i$ |
|------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| 1                | 47                                 | 6.3                   | -1.1                 | 830             | 51                   |
| 2                | 120                                | 4.6                   | 0.6                  | 860             | 23                   |
| 3                | 166                                | 4.5                   | 0.7                  | 860             | 17                   |
| 4                | 160                                | 4.9                   | 0.3                  | 920             | -40                  |
| 5                | 157                                | 5.8                   | -0.6                 | 930             | -55                  |
| Среднее значение | -                                  | 5.2                   | -                    | 880             | -                    |
| Отклонение       | -                                  | -                     | 0.7                  | -               | 40                   |

Таблица 2. Результаты экспериментов на промышленной печи

Зависимости пропорционального и интегрального коэффициентов от стартовой температуры приведены на рис. 8 и 9.

Анализ полученных данных показывает, что ПИ-алгоритм с найденными коэффициентами приводит к удовлетворительному качеству регулирования, а величина погрешности определения коэффициентов с помощью алгоритма самонастройки составляет 20%.

Эксперименты с другими объектами, обладающими высокой тепловой инерцией – муфельная печь (рис. 10) и электроплита (рис.11), также дали удовлетворительные результаты. По серии экспериментов для муфельной печи были насчитаны коэффициенты  $K_p = 3.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ,  $K_i = 760 \pm 150 \text{c}$ , для электроплиты были насчитаны коэффициенты  $K_p = 45 \pm 9^\circ\text{C}$ ,  $K_i = 1450 \pm 120 \text{c}$ .

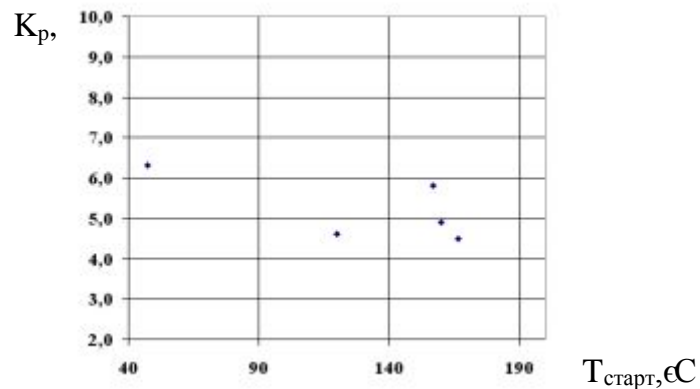


Рис. 8. Зависимость пропорционального коэффициента от стартовой температуры

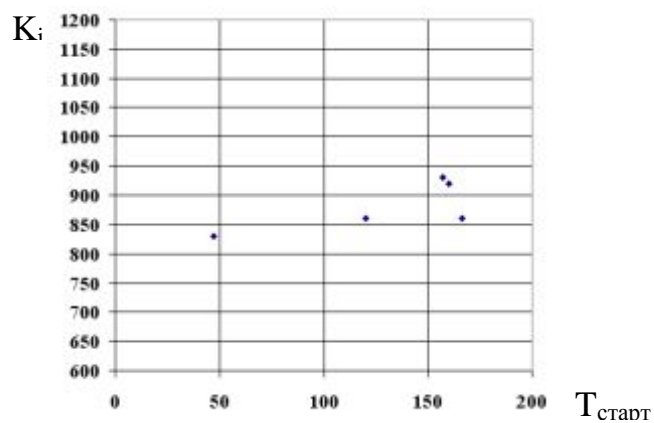


Рис. 9. Зависимость пропорционального коэффициента от стартовой температуры

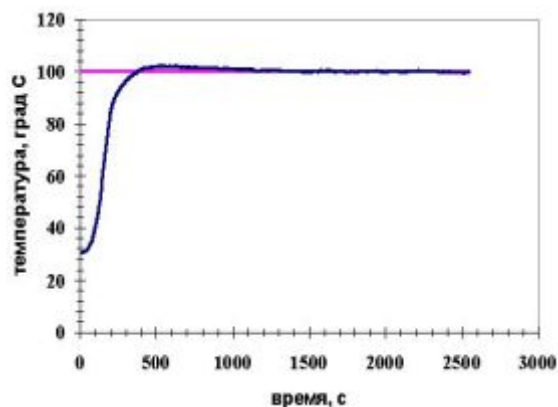


Рис. 10. Динамика температуры муфельной печи при повторном запуске с найденными параметрами ПИ-регулирования

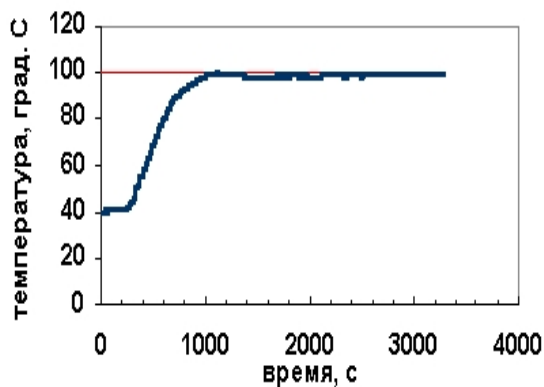


Рис. 11. Динамика температуры электроплиты при повторном запуске с найденными параметрами ПИ-регулирования

#### 4. Заключение

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследования эффективности регулятора температуры с алгоритмом самонастройки методом предварительной идентификации на промышленных электропечах, отличающихся друг от друга теплоемкостью, теплоотдачей, запасом мощности и геометрическими размерами.

Эксперименты подтвердили работоспособность алгоритма. Установлена независимость результатов нахождения ПИ-коэффициентов с помощью алгоритма самонастройки от начальной температуры, мощности электронагревателей объектов, размеров и тепловой инерции объектов.

Сравнение коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$  и основных тепловых характеристик как описанных выше объектов, так и других, позволило установить оценочную функциональную зависимость интегрального коэффициента от постоянной времени  $\tau_*$  и пропорционального коэффициента регулятора от параметра  $Q/G$ .

Указанные зависимости представлены на рис.12 и рис.13. Несмотря на большой разброс, прослеживается линейная зависимость между параметрами. В дальнейшем, при совершенствовании алгоритма самонастройки, будет рассмотрена возможность использования найденной зависимости для введения дополнительной внутренней проверки на согласованность результатов.

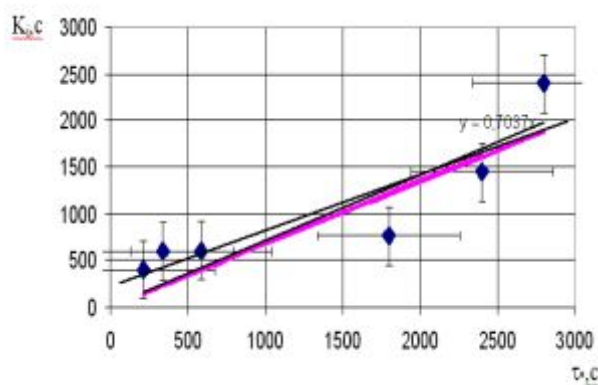


Рис.12. Зависимость интегрального коэффициента от постоянной времени объекта

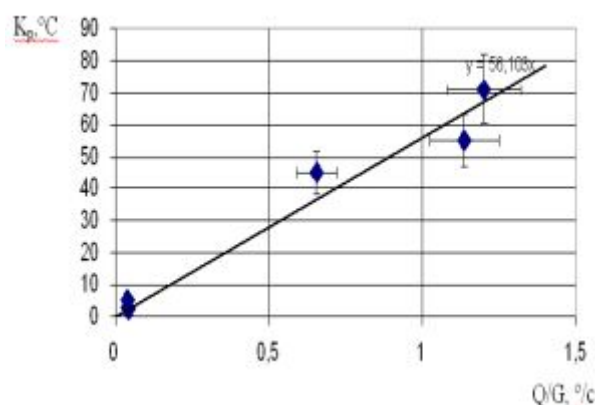


Рис.13. Зависимость пропорционального коэффициента от отношения мощности нагревателя к полной теплоемкости объекта

Самонастраивающийся терморегулятор работает по принципу «включил и забыл». Устройство в начале своей работы производит тестирование тепловых свойств объекта, определяет оптимальные параметры регулирования и непрерывно переходит к процессу регулирования.

Для решения поставленной проблемы были использованы новые концепция, технология и полученные на ее основе высокоэффективные алгоритмы управления. Эти алгоритмы имеют высокую точность и быстроедействие без значительного перерегулирования, помехозащищенность, слабую чувствительность к изменению параметров системы и возмущениям.



Полученный в соответствии с этой технологией новый алгоритм открывает возможности создания унифицированных модулей компьютерного управления, которые сменят широко используемые регуляторы, нуждающиеся в дальнейшем совершенствовании.

### **Литература**

1. Zigler J.C. and Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. // ASME Transactions. 1942. V.64. №8. 759 p.
2. Техническое описание приборов Термодат., [www.termodat.ru](http://www.termodat.ru).

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГИХ ПОДВЕСАХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

А.М. Лобачева

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

В статье последовательно рассмотрено два подхода к решению задач о прочности упругих элементов. Цель такого рассмотрения состоит в оценке возможностей этих подходов.

## Введение

В статье рассматривается задача о напряжениях в упругом подвесе микромеханического гироскопа (ММГ), выполненном в виде прямоугольного в сечении стержня. На рис.1 представлен схематически микромеханический гироскоп с четырьмя подвесами. Мы рассматриваем подвес, один конец которого соединен с возбужденным кольцом, а второй закреплен на платформе.

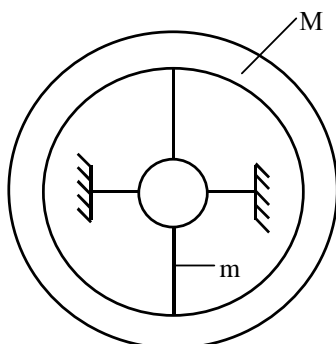


Рис. 1. Схема микромеханического гироскопа с четырьмя подвесами

Внешний момент определяет энергию, подводимую ко всей системе, включая кольцо и подвесы ММГ.

Обозначим  $M_B$  – внешний момент.  $m$  – масса упругого элемента;  $M$  – масса кольца ММГ,  $\gamma$  – отношение масс,  $M_{рез}$  – момент двигателя при резонансе. Кроме того, заданы геометрические и физико-механические параметры:  $h = 0.03 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 0.014 \cdot 10^{-3}$  м;  $l = 0.54 \cdot 10^{-3}$  м;  $E = 1.35 \cdot 10^5$  МПа;  $M_{рез} = 5.7 \cdot 10^{-6}$  Нм.

Расчетная схема подвеса изображена на рис. 2.

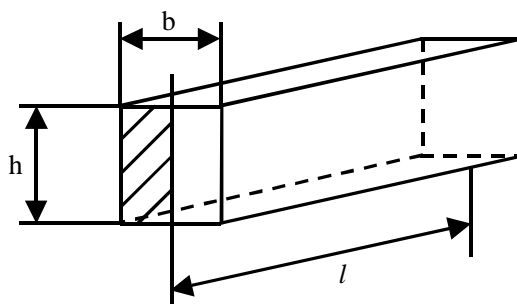


Рис. 2. Расчетная схема подвеса

## Линейные статически неопределимые системы

Определим максимальные изгибающие моменты и напряжения, соответствующие статической постановке статически неопределимой задачи.

Энергетические затраты в рассматриваемом случае прямо пропорциональны инерционным характеристикам, т.е. тензорам инерции [1], и, сравнивая их, получим

$$\gamma \sim \frac{m}{M}.$$

В формировании  $M_B$  участвует какая-то доля  $M_{рез}$ , т.е.

$$M_B = \gamma \cdot M_{рез}.$$

Таким образом, максимальное значение напряжений уменьшается на порядки, определяемые отношением масс  $\gamma$ .

Для нагружения:  $M_{max} = 7M_B$ ; так как  $\gamma \sim \frac{m}{M} \sim 10^{-2}$  (рис. 1), имеем:

$$M_B = 10^{-2} \cdot M_{рез},$$

$$\sigma_{max} = \frac{7M_B}{W} = 7 \cdot 30 = 210 \text{ МПа}.$$

Это напряжение приходится на 4 стержня. Поэтому парциальное напряжение

$$\sigma_{max}^* = \frac{210}{4} = 52.5 \text{ МПа}.$$

Окончательно:  $\sigma_{max}^* < [\sigma] = 700 \text{ МПа}$ .

Описанная расчетная схема была приспособлена под заданную силовую нагрузку  $M_{рез}$  (мягкое нагружение). На самом деле по своей природе возбуждение ММГ носит кинематический характер, т.е. мы имеем дело с жестким нагружением. Кроме того, система нелинейна в силу больших перемещений упругих элементов и в силу нелинейного характера упругих деформаций в сопряжениях упругих элементов с кольцом ММГ.

### Нелинейные задачи изгиба стержней. Консервативное нагружение

Рассмотрим нелинейную задачу изгиба стержня. Все задачи в этой теории – статически неопределимые. Во всех случаях наблюдается зависимость реакций в опорах (сил и моментов) от значений перемещений при изгибе [2].

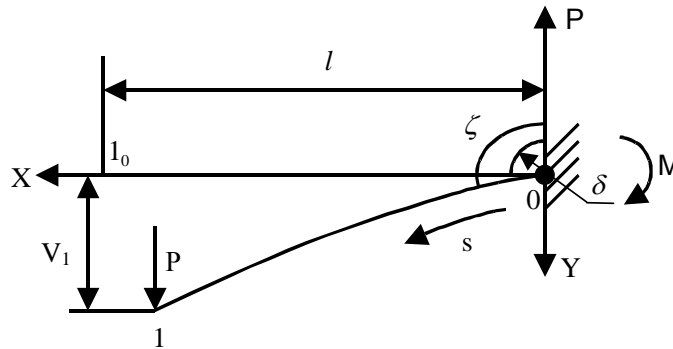


Рис. 3. Нелинейная задача изгиба стержня

При решении задачи мы используем математический аппарат эллиптических функций. Известны следующие величины:  $M_1 = 0$  – момент на конце стержня (граничные условия);  $\chi_0 = 0$  (начальная кривизна отсутствует);  $\vartheta_0 = 0$  – угол наклона касательной в начале упругой линии (относительно горизонтали);  $\delta = 90^\circ$ . Неизвестна форма упругой линии и напряжения.

А. Определим  $\beta$ ,  $\omega_1$ ,  $\zeta_0$ .

$$\beta = \sqrt{\frac{Pl^2}{H}}, \quad \omega_1 = 0 \left[ \omega_1 = \frac{M_1 + H(\chi_0)}{\sqrt{PH}} \text{ при } \chi_0 = 0 \right], \quad \zeta_0 = 90^\circ. \text{ Далее, } \chi_1 = \frac{M_1}{H} + \chi_0 =$$

0, так как  $M_1 = 0$  и  $\chi_0 = 0$  – в концевой точке 1 упругой линии кривизна  $\chi_1 = 0$ , т.е. эта точка является точкой перегиба упругой линии. Следовательно, в данной задаче упругая линия принимает форму перегибного рода.

Б. Перейдем к определению эллиптических параметров. Известны

$$F(\psi_1) - F(\psi_0) = \beta \Rightarrow F(\psi_1) - F(\psi_0) = \sqrt{\frac{Pl^2}{H}}, C = k^2, \sin\left(\frac{\zeta}{2}\right) = k \sin \psi, \zeta_0 = 90^\circ,$$

неизвестно  $\omega_0$ . Имеем:

$$\sin 45^\circ = k \sin \psi_0 \Rightarrow k \sin \psi_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \omega_1 = 0 = 2k \cos \psi_1 \Rightarrow \psi_1 = 90^\circ.$$

Таким образом, эллиптические параметры определены;  $\psi_0 \leq \psi \leq 90^\circ$  – изменение амплитуды. Определим усилия, вызвавшие угловое перемещение, и оценим максимальное напряжение в стержне (рис. 4).

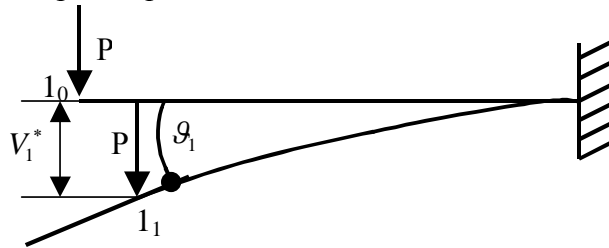


Рис. 4. Эллиптические параметры стержня

Пологая, что:  $M_1 = 0$ ;  $\chi_0 = 0$ ;  $\vartheta_0 = 0$ ;  $\delta = 90^\circ$  (эти значения соответствуют силовым и геометрическим условиям задачи), находим  $\omega_1 = 0$ ;  $\zeta_0 = 90^\circ$ ;  $\chi_1 = 0$ . При этом величина  $\beta$  остается неизвестной, так как неизвестно  $P$ , но дано  $\vartheta_1$  (пусть  $\vartheta_1 = 10^\circ$ ). Тогда, выполняя последовательные подстановки, имеем:

$$\vartheta_1 = \zeta_1 - 90^\circ, \zeta_1 = 2\alpha, \sin \psi_0 = \frac{\sqrt{2}}{2k};$$

$$10^\circ = 2\alpha - 90^\circ, \alpha = 50^\circ \Rightarrow k = 0.7660; F(k) - F(\varphi_0) = \beta \Rightarrow \beta = 0.5941;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{Pl^2}{H}} \Rightarrow \beta^2 = \frac{Pl^2}{H} \Rightarrow P = \frac{\beta^2 H}{l^2}, \text{ где } H = EI, \text{ или } P = \frac{0.5941^2 EI}{l^2}$$

$$\omega_0 = 2k \cos \psi_0 \text{ (перегибная форма);}$$

$$\sin \psi_0 = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot 0.7660} \Rightarrow \psi_0 \Rightarrow \omega_0 = 2 \cdot 0.7660 \cos \psi_0; M_0 = \omega_0 \sqrt{PEI}$$

$$\sigma_0 = \omega_0 \beta \frac{Eb}{2l} = 610 \text{ МПа, т.е. } \sigma_0 < [\sigma] = 700 \text{ МПа.}$$

## Заключение

В работе решена линейная и нелинейная задачи оценки напряженного состояния упругого подвеса ММГ. Разница в полученных оценках составляет один порядок, чтобы использовать результаты расчета, нужно перейти к динамической задаче оценке надежности систем и определению ресурса упругого подвеса ММГ, решение которой готовится к опубликованию.

## Литература

1. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1971. 488 с.
2. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. М.: Наука, 1986. 296 с.
3. Громова С.В., Ефстифеев М.И., Унтилов А.А. Определение ресурса упругого подвеса микромеханического гироскопа. // Труды пятой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем». / Под ред. д.т.н., проф. В.П. Булатова и д.т.н., проф. Л.В. Ефремова. СПб: ИПМаш РАН, 2002.

# ПРИБОР ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ ДВИЖЕНИЯ ПРОТИВОГРАДОВОЙ РАКЕТЫ С УЧЕТОМ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА

А.П. Саенко

Научные руководители – к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев,  
к.т.н. Х.-М.Х. Байсиев (ВГИ, г. Нальчик)

## Постановка задачи

Практика проведения работ по активным воздействиям на градовые облака показала, что на полет противоградовой ракеты (ПГР) на стартовом участке траектории полета существенное влияние оказывает приземный ветер. В ряде случаев отклонение ракеты на конечном участке траектории полета может достигать 3–3,5 км, что приводит к неоправданным затратам ракет, поскольку для обеспечения гарантированного воздействия на облако приходится осуществлять дополнительные пуски ракет по краям рабочей площадки воздействия. В ряде исследований, например, в Институте механики МГУ, исследовалось движение ПГР при сильном ветре, в результате которых создана математическая модель динамики полета и разработаны рекомендации по коррекции запуска ракет при наличии ветра. В Высокогорном геофизическом институте (ВГИ, г. Нальчик, Кабардино-Балкарская Республика) совместно с ОАО НПО «Сплав» (г. Тула) проведено исследование способов автоматического учета поправок и ввода скорректированных координат в систему управления пусковой установки. На первом этапе работы была создана материальная база для дальнейших исследований – разработан макет устройства автоматического введения поправок (АВП), пригодный для испытаний совместно со штатным оборудованием пусковой установки ТКБ-0183М в условиях полигона ВГИ.

В качестве исходного материала приняты зависимости поправок от скорости и направления ветра, полученные от предприятия изготовителя ПГР. Произведен анализ полученных зависимостей, средств измерения и обработки данных, позволяющих учесть их в аппаратуре устройства АВП при использовании стандартных измерительных и вычислительных средств.

Разработанный макет устройства АВП был выполнен на базе одноплатной микроЭВМ «Электроника НС 1201.01». В качестве датчика ветра использован анеморумбометр М63М-1 с небольшой доработкой. Макет был предназначен для работы совместно со штатным пультом управления ТКБ-0183М. Интерфейс устройства допускает подключение к микроЭВМ стандартных периферийных средств – дисплея 15ИЭ-00-13, печатающего устройства Д2М 180, накопителя на гибких магнитных дисках «Электроника ГОД 70». Недостаток данной разработки заключался в том, что она не являлась универсальной и могла быть применена только к конкретной пусковой установке и конкретному изделию. Для других же пусковых установок система требовала соответствующей доработки с учетом параметров уже другой ракеты. В этой связи создание аналогичной, но универсальной системы управления остается до сих пор актуальным.

## Уточнение понятий

В практике зенитной стрельбы различают баллистические величины и поправки. Определение баллистических величин (азимута  $\psi$  и угла возвышения  $\theta$ ), соответствующих упрежденному положению цели в принятой системе отсчета, не входит в задачу настоящей работы. Поэтому рассмотрим только учет поправок и его аппаратную реализацию.

В приборах управления огнем обычно учитывают пять поправок:

- на изменение температуры заряда;

- на отклонение плотности воздуха от номинальной;
- на снос снаряда ветром;
- на время заряжания во взрыватель (для ствольной артиллерии);
- на скорость движения носителя в системах на подвижном объекте.

При выработке поправок в приборах управления зенитным артиллерийским огнем (ПУАЗО) вводится понятие баллистического ветра – фиктивного ветра, принимаемого одинаковым по скорости и направлению для всей толщи атмосферы от орудия до точки разрыва снаряда. Баллистический ветер вызывает такой же снос снаряда, как реальный. Расчет баллистического ветра производится аэрометеопостами на основе измерения фактических скоростей и направлений ветра на различных высотах и соответствующего их усреднения. Считается, что срединная ошибка определения скорости ветра равна 1 м/с, а ошибка в определении направления – 9°.

Величина сноса снаряда ветром  $\Delta W$  вычисляется в зависимости от скорости ветра и полетного времени:

$$\Delta W = k \cdot W \cdot \tau$$

где  $W$  – скорость ветра, м/с;  $\tau$  – полетное время, с.

Коэффициент  $k$  зависит от угла, под которым дует ветер на летящий снаряд. Снос снаряда, обусловленный боковой составляющей ветра, в общем случае не пропорционален сносу от продольной составляющей. Поэтому направление вектора сноса снаряда несколько отличается от направления вектора ветра. Кроме того,  $k$  зависит от средней скорости снаряда на траектории, т.е. от типа артиллерийской системы. При этом

$$\Delta W = k(\tau) \cdot W \cdot \tau = W f(\tau).$$

Учет всех зависимостей коэффициента  $k$  при вычислении в ПУАЗО сноса  $\Delta W$  существенно усложняет аппаратуру и для простых устройств часто не представляется возможным. В этих случаях идут на допущения, принимая, например, коэффициент  $k$  не зависящим от направления ветра по отношению к плоскости стрельбы. Такое допущение сделано, например, в ПУАЗО-3. В этом приборе для баллистики 85-мм зенитной пушки зависимость коэффициента  $k$  от времени  $\tau$  принята согласно табл.1.

|                            |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Полетное время, $\tau$ , с | 4     | 10    | 20    | 30    | 40    |
| Коэффициент $k$            | 0,201 | 0,310 | 0,527 | 0,615 | 0,650 |

Таблица 1. Зависимость коэффициента сноса от полетного времени

В некоторых американских ПУАЗО используют еще более грубое допущение, принимая коэффициент  $k$  постоянным и независимым от  $\tau$ .

Таким образом, при вычислении поправок на ветер в ствольной зенитной артиллерии учитывают следующие положения:

1) расчет поправки производится на средний баллистический ветер на участке «орудие – точка разрыва»;

2) учет всех зависимостей коэффициента поправки  $k$  от направления ветра и полетного времени доступен для средств вычислительной техники, но существенно усложняет аппаратуру аналоговых устройств или требует определенных допущений и упрощений в методике решения задачи с компромиссом относительно точности получаемого результата. Выбор целесообразной точности аппроксимации, а также допущений при технической реализации способа введения должен производиться для конкретного типа снаряда, условий и аппаратуре пусков и требуемой точности попаданий.

Задача учета поправок на ветер при запуске ПГР рассмотрена в работах Института механики МГУ, НПО «Сплав» (г. Тула), в которых показано, что основной снос ракеты происходит на стартовом участке траектории (от момента пуска до момента окончания работы стартового двигателя) под влиянием так называемого приземного ветра.

Зависимости поправок предложено искать в следующем виде: для угла вертикального наведения

$$\Delta\theta = k_{\theta} \cdot \theta_0 \cdot W \cdot \text{Cos}\varphi;$$

для угла горизонтального наведения (азимута)

$$\Delta\psi = -\frac{k_{\psi} W \text{Sin}\varphi}{\text{Cos}\theta_{0,W}}, \quad (1)$$

где  $W$  – скорость ветра, м/с;  $\psi_0$  – исходный азимут наведения, градус;  $\theta_0$  – исходный угол возвышения, градус;  $\varphi$  – разность азимутов ветра и наведения, вычисляемая по формуле:

$$\varphi = \alpha_0 - \psi_0,$$

где  $\alpha_0$  – азимут ветра, градус;  $\theta_{0,W}$  – угол возвышения для «возмущенной» траектории, т.е. траектории полета ракеты при действии ветра, вычисляемый по формуле

$$\theta_{0,W} = \theta_0 + \Delta\theta,$$

$k_{\theta}$ ,  $k_{\psi}$  – постоянные коэффициенты, зависящие от начальной скорости  $V_0$  и других параметров ПГР типа «Алазань».

При расчете поправок следует учитывать, что азимут ветра измеряется по часовой стрелке от направления на север до направления, откуда дует ветер.

Расчет поправок по формулам, полученным разработчиком противорадового ракетного комплекса «Кристалл», можно проводить двумя путями:

- 1) независимым вычислением поправок по обеим координатам;
- 2) последовательным вычислением сначала поправки  $\Delta\theta$ , а потом  $\Delta\psi$  по скорректированным величинам угла  $\theta_{0,W}$ .

В первом случае расчетные формулы имеют вид:

$$\Delta\theta^I = \frac{-16,881 + 0,02414(\theta_0 - 52)^2}{10} W_X,$$

$$\Delta\psi^I = \frac{1,97 + 0,524(\theta_0 - 40)}{10} W_Z,$$

во втором –

$$\Delta\theta^{II} = \frac{-16,881 + 0,02414(\theta_0 - 52)}{10} W_X,$$

$$\Delta\psi^{II} = \frac{1,97 + 0,524(\theta_0 + \Delta\theta - 40)}{10} W_Z.$$

В формуле (1) в качестве аргумента содержится угол  $\theta_{0,W}$  для траектории полета ракеты при действии ветра. Для принятия определенного решения необходимо оценить разность  $\delta$  значений поправок на азимут

$$\delta = \Delta\psi^{II} - \Delta\psi^I.$$

С учетом эмпирических формул для ракетного комплекса «Кристалл»:

$$\delta = \frac{0,524\Delta\theta}{10} W_Z.$$

Отношение разности  $\delta$  к поправке  $\Delta\psi^I$  колеблется в пределах от 17% до 85% при изменении угла возвышения  $\theta$  от  $40^\circ$  до  $64^\circ$ .

Таким образом, очевидна неравнозначность двух вариантов коррекции азимута наведения.

## Реализация устройства

Проведенный анализ и изучение вопроса свидетельствует о сложности проблемы управления огнем путем введения коррекции по азимуту и углу возвышения ракетной пусковой установки (РПУ). Из проведенного анализа следует также и то, что во всех

существующих разработках рассматривается среднее значение вектора скорости ветра, который раскладывается на составляющие по осям декартовой системы координат. При этом совершенно не учитывается одно из важнейших свойств приземного ветра, а именно его пульсационный характер, проявляющийся в возможности резкого изменения скорости ветра за короткий промежуток времени от некоторого максимального значения до минимума. В данной работе были учтены эти свойства приземного ветра и разработано устройство, обеспечивающее запуск ПГР в момент спада скорости ветра до уровня, когда погрешность, обусловленная действием боковой составляющей вектора скорости ветра, становится ничтожно малой.

Устройство управления РПУ состоит из датчика пульсаций (ДП) приземного ветра и электронного блока (ЭБ), замыкающего цепи пуска ПГР в момент спада ветровой нагрузки до некоторого допустимого уровня (рис.1).

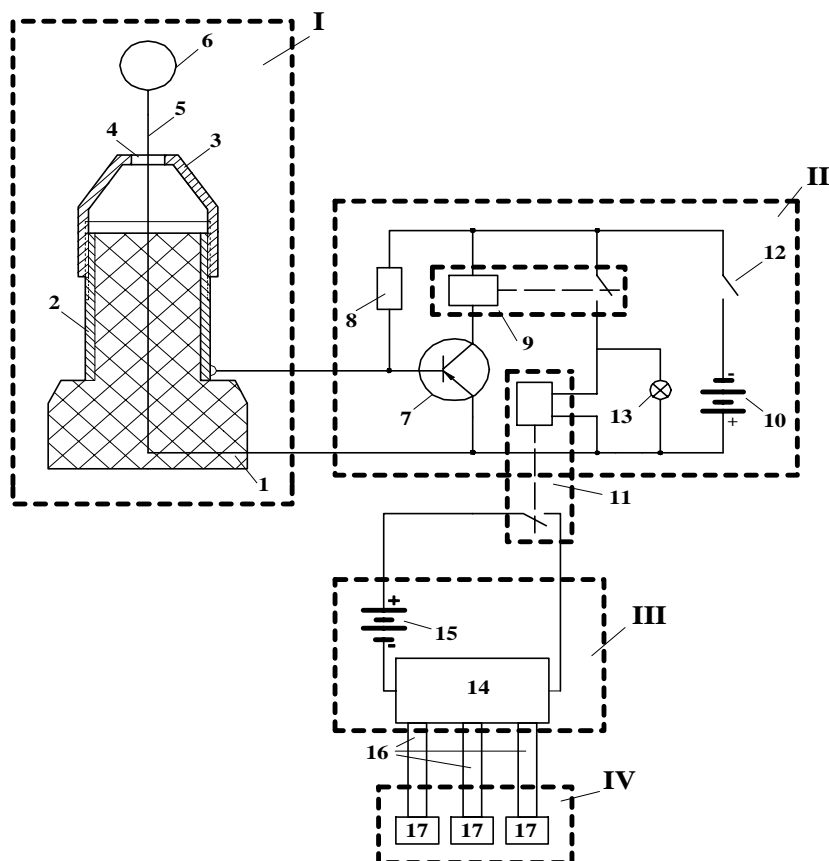


Рис. 1. Схема устройства управления РПУ. I – ДП; II – ЭБ управления; III – пульт управления запуском ракет; IV-пусковая установка (РПУ). 1 – корпус; 2 – цилиндр; 3 – колпак; 4 – отверстие в колпаке; 5 – упругий стержень; 6 – шарик; 7 – ТР; 8 – РС; 9 – реле; 10 – БП; 11 – силовое реле; 12 – кнопка включения ЭБ в режим работы; 13 – СД; 14 – БК ПУ; 16 – соединительные кабели; 17 – электровоспламенители ракет

ДП (I) представляет собой корпус 1, выполненный в виде подставки из токонепроводящего материала (эбонита) и содержащий металлический цилиндр 2, в верхней части которого размещен на резьбе металлический колпак 3 с отверстием 4 по оси, по которой размещен упругий стальной стержень 5, содержащий на конце легкий пустотелый шарик 6. Цилиндр 2 и стержень 5 подключены к ЭБ управления (II).

ЭБ (II) содержит транзистор (ТР) 7 (МП42А), к эмиттеру которого подключен стальной упругий стержень 5. Коллектор ТР подключен через катушку реле (РЭС-80) 9, и резистор (РС) 8 (4,7 кОм) к цилиндру 2 ДП, связанному, в свою очередь, с базой ТР 7.



Контактная группа реле (КГР) 9 подсоединена к обмоткам катушки второго управляющего реле 11, замыкающего цепь блока коммутации (БК) с блоком питания (БП) 15.

КГР 11 подключена к цепи пуска пульта управления (ПУ) (III). БК 14 ПУ (III) обеспечивает подачу электрического импульса через кабельную систему (КС) 16 на соответствующую электрокапсюльную втулку 17 запускаемой ракеты с РПУ IV в момент спада ветровой нагрузки до необходимого допустимого уровня. ЭБ (II) содержит кнопку включения и светодиод (СД) 13, помещенный в электрическую цепь параллельно с обмотками силового реле 11.

Устройство управления РПУ работает следующим образом.

На пунктах воздействия ДППВ (I) размещается рядом с РПУ (IV), а ЭБ управления (II) подключается к ПУ пусками ракет (III), размещенному в пульту пункта воздействия. При поступлении с центрального пункта управления активными воздействиями команды на запуск срабатывает кнопка пуска на ПУ (III). Пуск ракеты произойдет, если цепь, связанная с ДППВ (I), будет разомкнута. Последнее возможно, если сила ветра, действующая на шарик, будет ниже установленного порогового уровня (рис. 2), и контакт со стальным упругим стержнем будет отсутствовать. В этом случае в цепи базы ТР появится ток, протекающий от БП через РС, ТР откроется, через обмотку реле 9 потечет ток, сработает реле, замыкаются цепи второго силового реле и пуска, электрический импульс воспламеняет соответствующую электрокапсюльную втулку – происходит запуск ракеты из РПУ (IV) в нужном направлении.

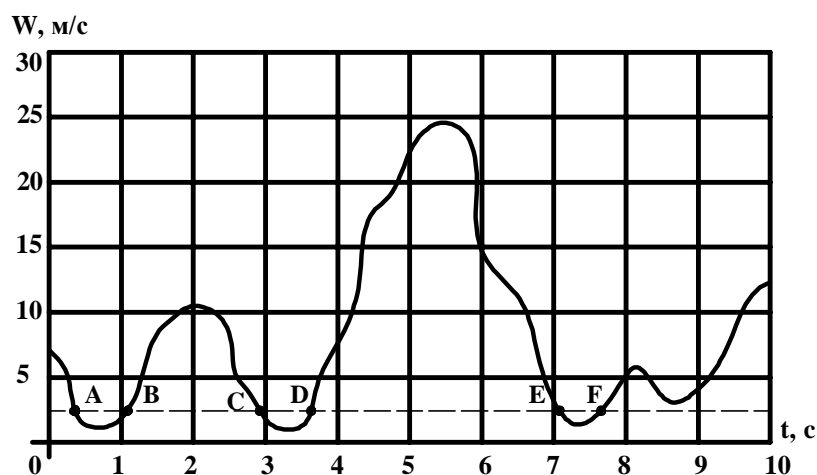


Рис. 2. График изменения пульсаций приземного ветра во времени. Пунктиром показан пороговый уровень скорости ветра

## Заключение

Разработанное устройство для управления РПУ обеспечивает непрерывный контроль ветровой нагрузки и запуск ракет только при условии, когда эта нагрузка не превышает заданный пороговый уровень. Проведены испытания устройства, которые показали достаточно высокую надежность работы основных его элементов и узлов.

Разработка может быть использована в системе РОСГИДРОМЕТ, в системе управления мехатронными объектами, которые требуют учета подобного фактора. Разработанное устройство может быть использовано в системе любого автоматизированного пульта управления любой РПУ.

# АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЕМ ВОЗДУХ / ТОПЛИВО В ИНЖЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С УЛУЧШЕННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТЬЮ

Д.Н. Герасимов, С.А. Мигуш  
Научный руководитель – д.т.н., профессор В.О. Никифоров

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 как оптимизации параметров работы ДВС, так и совершенствованием методов автоматического 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) [1, 2]. В инженерной практике и автомобилестроении получил распространение коэффициент избытка воздуха, показывающий отклонение реального соотношения воздух/топливо от идеального ( $\lambda$ -коэффициент) [2]. Оптимальные показатели работы двигателя достигаются при  $\lambda=1$ , таким образом, регулирование соотношения воздух/топливо и стабилизация  $\lambda$  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 [4-7]. Однако, во всех этих работах используются методы адаптивного управления, имеющие ряд недостатков связанных с медленной сходимостью алгоритмов адаптации, качеством которых главным образом определяется качество работы всей системы управления. Одним из таких недостатков является необходимость наличия не исчезающего возбуждения в канале управления, которое обеспечивает асимптотическую сходимость алгоритма адаптации.

В настоящей работе предлагаются методы прямого адаптивного управления соотношением воздух/топливо, лишенные вышеуказанных недостатков.

## Постановка задачи

Часть распыляемого форсункой топлива осаждается на стенках впускного коллектора, образуя пленку [5,6]. 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 [5, 6]:

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

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].

Модель, описывающая динамику формирования соотношения воздух/топливо может быть представлена в виде:

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

где  $x$  – масса топливной пленки, образующейся на стенках цилиндра, управление  $u$  – масса впрыснутого в цилиндр топлива,  $v(t)$  – измеряемый сигнал, параметры  $T, K, d = (1 - K)$  являются неизвестными. Целью управления является стабилизация регулируемой переменной  $y$  на оптимальном нормированном уровне, равном 1.

### Параметризация регулируемой переменной объекта

Для параметризации регулируемой переменной объекта (2), (3) воспользуемся вспомогательными фильтрами вида [1, 3]

$$\dot{\xi}^* = -k_0 \xi^* + \frac{1}{v} y, \quad (4)$$

$$\dot{v}^* = -k_0 v^* + u, \quad (5)$$

где  $k_0 > 0$  – постоянная величина. При этом параметризованная модель регулируемой переменной объекта может быть представлена в следующем виде:

$$y = v(t) \left( (k_0 \xi^* - \frac{1}{T} \xi^* - k_0 d v^* + \frac{1}{T} v^* + du) \right) + \sigma, \quad (6)$$

где  $\sigma(t)$  – экспоненциально затухающая функция. Путем представления величины  $\sigma = y|_{\sigma=0} - v(t)(x + du)$  и дифференцирования ее по времени нетрудно доказать справедливость равенства (6).

### Модель ошибки стабилизации. Синтез настраиваемого регулятора

Сформируем ошибку стабилизации регулируемой переменной  $\tilde{\psi}(t) = \psi - \psi(t) \rightarrow 0$ , тогда с учетом (6) модель ошибки может быть переписана в виде

$$\varepsilon = d(\psi^T \varphi - v(-k_0 v^* + u)), \quad (7)$$

где  $\psi^T = \left[ \frac{1}{d} \quad \frac{1}{dT} \right]$  – вектор неизвестных параметров объекта,  $\varphi^T = \left[ (1 - k_0 v \xi^*) \quad v(\xi^* - v^*) \right]$  – регрессор. На основе анализа модели ошибки (7) представим настраиваемый регулятор в виде

$$u = \frac{1}{v} \hat{\psi}^T \varphi + k_0 v^*, \quad (8)$$

где  $\hat{\psi}$  – вектор настраиваемых параметров. При этом нетрудно видеть, что модель ошибки принимает следующий вид:

$$\varepsilon = d \tilde{\psi}^T \varphi, \quad (9)$$

где  $\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}$  – вектор параметрических ошибок.

### Алгоритмы адаптации

**а) Градиентный АА.** Алгоритм основан на минимизации критерия качества вида

$$J_1 = \frac{1}{2d} \varepsilon^2(t) \quad (10)$$

и может быть представлен в следующем виде:

$$\dot{\hat{\psi}} = \gamma \varphi \varepsilon, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – коэффициент адаптации.

Алгоритм адаптации (11) имеет следующие свойства [3]:

1. Все сигналы ограничены;

2.  $\varepsilon(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$

3.  $\tilde{\psi}(t) = \psi - \hat{\psi}(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , если регрессор  $\varphi$  удовлетворяет условию неисчезающего возбуждения, которое может быть выражено в виде следующего неравенства:

$$\frac{1}{\beta} \int_t^{t+\beta} \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau > \alpha I, \quad (12)$$

где  $\beta, \alpha$  – положительные константы.

4. Если регрессор  $\varphi$  удовлетворяет условию (12), то существует оптимальное значение коэффициента  $\gamma$ , при котором скорость сходимости максимальна (при увеличении  $\gamma$ , скорость сходимости начинает падать).

Свойства градиентного АА (11) иллюстрируют существенный недостаток этого алгоритма, так как предполагают ограниченный класс функций регрессора  $\varphi(t)$  и соответственно входных сигналов  $u(t)$ . Свойства 3 и 4 не позволяют значительно увеличить скорость сходимости оценок  $\hat{\psi}(t)$ , что недопустимо при использовании этого алгоритма в реальных (особенно быстродействующих) системах.

**б) Интегральный АА.** Для значительного улучшения скорости сходимости алгоритма воспользуемся алгоритмом, основанным на минимизации интеграла от квадрата ошибки стабилизации по прошлым значениям времени

$$J_2 = \frac{1}{2} \int_0^t \varepsilon^2(t, \tau) d\tau, \quad (13)$$

который имеет следующий вид

$$\dot{\hat{\psi}}(t) = \gamma \int_0^t \varphi(\tau) \varepsilon(\tau) d\tau + \gamma \int_0^t \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) \hat{\psi}(\tau) d\tau - \gamma P(t) \hat{\psi}(t), \quad (14)$$

где  $P(t) = \int_0^t \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau$ .

Интегральный АА (14) имеет следующие свойства:

1. Сигналы  $\varphi(t)$ ,  $\hat{\psi}(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  ограничены
2.  $\varepsilon(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ ,
3.  $\tilde{\psi}(t) = \psi - \hat{\psi}(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , если регрессор  $\varphi$  состоит из линейно независимых компонентов. Более того, если элементы вектора  $\varphi$  линейно независимы, то скорость сходимости может быть увеличена путем увеличения параметра  $\gamma$ .

Необходимо отметить, что свойство линейной независимости – более слабое условие по сравнению с условием неисчезающего возбуждения (12), что является несомненным достоинством этого алгоритма. Несмотря на это некоторые интегралы АА (14) неограниченно растут во времени, в связи с чем практическая реализация алгоритма невозможна. Для устранения столь существенного недостатка используем модификации интегрального алгоритма.

## Модификации интегрального алгоритма

**а) Интегральный алгоритм с периодическим сбросом интеграторов**

$$\begin{cases} \dot{\hat{\psi}}(t) = \rho \cdot (\kappa I + P)^{-1} \pi(t), \\ \pi(m\Delta) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где

$$\pi(t) = \int_0^t \varphi(\tau)\varepsilon(\tau)d\tau + \int_0^t \varphi(\tau)\varphi^T(\tau)\hat{\psi}(\tau)d\tau - P(t)\hat{\psi}(t),$$

$\rho$  – постоянная величина,  $\kappa$  – малая постоянная,  $m$  – номер интервала сброса,  $\Delta$  – период сброса.

#### б) Интегральный алгоритм со списыванием

$$\dot{\hat{\psi}}(t) = \gamma(t) \int_0^t \eta(t, \tau)\varphi(\tau)\varepsilon(\tau)d\tau + \gamma(t) \int_0^t \eta(t, \tau)\varphi(\tau)\varphi^T(\tau)\hat{\psi}(\tau)d\tau - \gamma(t)P^*(t)\hat{\psi}(t), \quad (16)$$

где  $\gamma(t) = \rho \cdot (\kappa I + P)^{-1}$ ,  $P^*(t) = \int_0^t \eta(t, \tau)\varphi(\tau)\varphi^T(\tau)d\tau$ ,  $\eta(t, \tau) = \exp(-\mu(t - \tau))$  – фактор списывания,  $\mu > 0$  – постоянная величина.

Таким образом, алгоритмы адаптивного управления с улучшенной параметрической сходимостью состоят из

- динамических фильтров (4), (5);
- настраиваемого регулятора (8);
- алгоритма адаптации (15) или (16).

### Моделирование

Для иллюстрации свойств алгоритмов адаптивной стабилизации основанных как на градиентном, так и на интегральных алгоритмах адаптации, воспользуемся данными, приведенными в табл. 1.

| Алгоритмы                                     | Параметры |                    |          |                 |             |          |             |
|---|-----------|--------------------|----------|-----------------|-------------|----------|-------------|
|   | $k_0$     | $\xi^*(0), v^*(0)$ | $\gamma$ | $\hat{\psi}(0)$ | $\psi$      |          |             |
| Градиентный алгоритм                          | 1         | (0, 0)             | 20       | [2 0]           | [1.67 0.83] |          |             |
| Интегральный алгоритм с периодическим сбросом |           |                    | $\rho$   | $\hat{\psi}(0)$ | $\kappa$    | $\Delta$ | $\psi$      |
| Интегральный алгоритм со списыванием          |           |                    | 20       | [2 0]           | $10^{-4}$   | 1        | [1.67 0.83] |
|   |           |                    | $\rho$   | $\hat{\psi}(0)$ | $\kappa$    | $\mu$    | $\psi$      |
|   |           |                    | 20       | [2 0]           | $10^{-4}$   | 0.2      | [1.67 0.83] |

Таблица 1. Значения параметров регуляторов и неизвестных векторов  $\psi$

Измеряемый сигнал:  $v(t) = 10 \text{sign}(\sin(2t)) + 20$ . Результаты моделирования алгоритмов адаптивного управления соотношением воздух топливо представлены на рис. 1, 2, 3 в соответствии с приведенными в табл. 1 данными. На рис. 1 представлены переходные процессы в системе управления, замкнутой градиентным АА. На рис. 2 и 3 представлены переходные процессы в системе управления, замкнутой соответственно интегральным АА с периодическим сбросом и со списыванием.

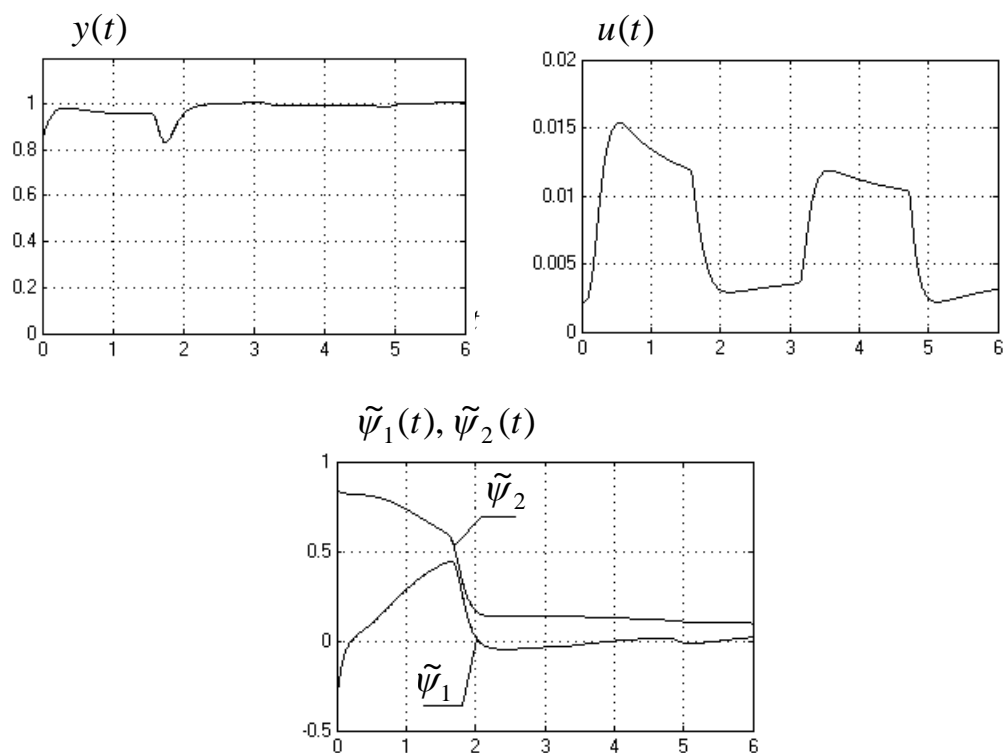


Рис. 1. Переходные процессы в системе управления замкнутой градиентным алгоритмом адаптации

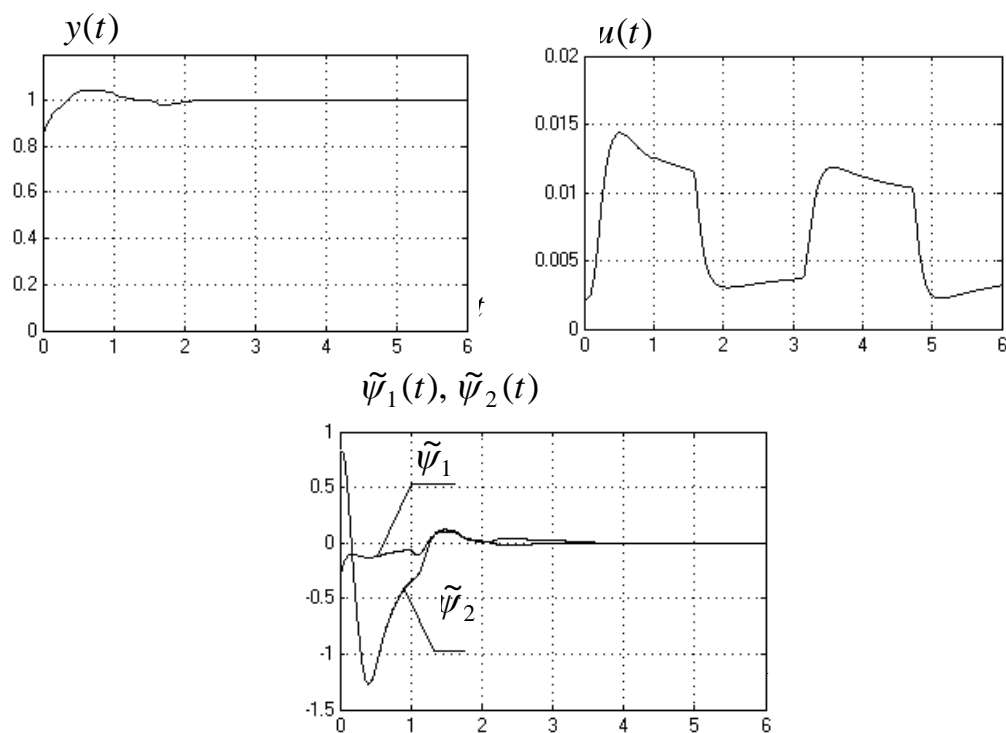


Рис. 2. Переходные процессы в системе управления замкнутой интегральным алгоритмом адаптации с периодическим сбросом интеграторов

## Заключение

Таким образом, в работе были разработаны алгоритмы адаптивного управления соотношением воздух / топливо в цилиндрах инжекторного ДВС, обладающие улучшенной параметрической сходимостью. В результате моделирования было проиллюст-

рировано качество работы как классического – градиентного алгоритма, так и разработанных – интегральных алгоритмов адаптации. Высокое быстродействие последних позволяет практически реализовать систему управления соотношением воздух / топливо.

## Литература

1. Герасимов Д.Н, Мигуш С.А. (н.р. Никифоров В.О.) Алгоритм адаптивного управления соотношением воздух/топливо в инжекторном двигателе внутреннего сгорания. Вестник конференции молодых ученых. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004, с. 93–96.
2. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. / А.И. Колчин, В.П. Демидов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2003. 496 с.: ил.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. / Серия «Анализ и синтез нелинейных систем»; под общей редакцией Леонова Г.А. и Фрадкова А.Л. СПб: Наука, 2000. 549 с., ил. 82.
4. Kim Y.-W., Rizzoni G., V. Utkin Automotive engine diagnostics and control via nonlinear estimation. // IEEE Control Systems, 1998.
5. 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.
6. Turin R.C., Geering H. Model-based adaptive fuel control in an SI engine. SAE paper No. 940374.
7. Tseng T.-C., Cheng W.K. An adaptive air/fuel controller for SI Engine throttle transients. SAE paper No. 1999-01-0552.

**РЕКОМЕНДАЦИИ ISO 1328 В ЧАСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ****М.В. Абрамчук****Научный руководитель – д.т.н., профессор Б.П. Тимофеев**

Сравниваются стандарты ISO 1328 (ISO 1328-1:1995 [1], ISO 1328-2:1997 [2]) и ГОСТ 1643-81 [3] на предмет наличия принципиальных отличий между документами, выявляются отличия в построении стандарта ISO 1328 и сравниваются табличные значения погрешностей на уровне базы (5 степень точности в ISO) в обоих стандартах.

**Введение**

В связи с планируемым вступлением нашей страны в ВТО встает проблема соотнесения нашей нормативной документации требованиям международных стандартов. Многие наши нормативные документы устарели. Это уже сегодня приносит убытки производителям, не имеющим возможности выпускать продукцию необходимой точности для внешнего рынка. Если ничего не предпринимать в этой области, то ситуация будет в дальнейшем только усугубляться.

В частности, чтобы разрешить сложившееся положение в области производства эвольвентных цилиндрических колес, предлагается переработать устаревшее издание (ГОСТ 1643-81) и получить проект внутреннего стандарта, который, с одной стороны, не противоречил бы требованиям ISO 1328 и допускал наших производителей к международному сотрудничеству в области зубчатых передач, а с другой – сохранял полезные стороны наших стандартов, опробованных в ходе многолетнего производства и эксплуатации в условиях серийного и массового производства.

**Принципиальные отличия между стандартами ГОСТ 1643-81  
и ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997**

ГОСТ 1643-81 [3, стр. 1] распространяется на эвольвентные цилиндрические зубчатые колеса и зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления с прямозубыми, косозубыми и шевронными зубчатыми колесами с делительным диаметром до 6300 мм, шириной зубчатого венца или полушеврона до 1250 мм, модулем зубьев от 1 до 55 мм.

Стандарт ISO 1328 [1, 2, стр. 1] устанавливает систему точности, относящуюся к отдельным эвольвентным цилиндрическим колесам, пары колес не учитываются. В ISO 1328-2 [2, стр. 3] отмечается, что «по соглашению между покупателем и производителем допуски могут быть аналогично использованы для цилиндрических косозубых зубчатых колес». В ISO 1328 применяются ряды параметров. В первой части [1, стр. 7-8]:

– делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 / 1 600 / 2 500 / 4 000 / 6 000 / 8 000 / 10 000 мм;

– модуль зубьев: 0,5 / 2 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм;

– ширина зубчатого венца: 4 / 10 / 20 / 40 / 80 / 160 / 250 / 400 / 650 / 1 000 мм.

Во второй части [2, стр. 5], для колебаний измерительного межосевого расстояния:

– делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 мм;

– модуль зубьев: 0,2 / 0,5 / 0,8 / 1 / 1,5 / 2,5 / 4 / 6 / 10 мм.

Та же, вторая часть [2, стр. 8], для радиального биения:



– делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 / 1 600 / 2 500 / 4 000 / 6 000 / 8 000 / 10 000 мм;

– модуль зубьев: 0,5 / 2,0 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм.

Ширина зубчатого венца во второй части стандарта ISO 1328 в учет не берется.

ГОСТ 1643-81 [3, стр. 1] устанавливает 12 степеней точности зубчатых колес и передач, обозначаемых в порядке убывания точности цифрами 1, 2, ... , 12. Для степеней точности 1 и 2 допуски и предельные отклонения не даются. Для каждой степени точности зубчатых колес и передач устанавливаются нормы: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колес в передаче. Устанавливаются шесть видов сопряжений зубчатых колес в передаче [3, стр. 2]: А, В, С, D, Е, Н и восемь видов допуска  $T_{jn}$  на боковой зазор: x, y, z, a, b, c, d, h, а также [3, стр. 3]: шесть классов отклонений межосевого расстояния, обозначаемых в порядке убывания точности римским цифрами от I до VI.

В первой части ISO 1328 [1, стр. 7] отмечается, что «система точности по ИСО включает в себя 13 степеней точности, где 0 – самая высокая, а 12 – самая низкая». Во второй части ISO 1328 [2, стр. 1] говорится, что «система точности радиальных измерений имеет иные ряды степеней, нежели основные ряды ИСО 1328-1. Ряды диаметра и модуля для радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) и радиального биения также другие. Система точности радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) включает в себя 9 степеней точности, где 4 – самая высокая степень, а 12 – самая низкая». Далее [2, стр.3] читаем: «определение степени точности с помощью измерения радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) согласно этой части ИСО 1328 не подразумевает, что погрешности элементов (например, шага, профиля, хода винтовой линии зуба и т.д. из ИСО 1328-1) будут соответствовать той же самой степени (точности). Положения в документах относительно требуемой точности должны включать ссылку на соответствующий стандарт, ИСО 1328-1 или ИСО 1328-2, соответственно». Нормы кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в ISO 1328 не устанавливаются. Также отсутствуют: виды сопряжений зубчатых колес в передаче, виды допуска на боковой зазор, классы отклонения межосевого расстояния, нормы бокового зазора. Боковой зазор упоминается в первой части ISO 1328 [1, стр.17] среди требований для проверки степени точности кинематической погрешности.

Нормы точности в ГОСТ 1643-81 содержат в себе, как уже отмечалось выше, показатели кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев, которые включают в себя поэлементные показатели (объединенные в комплексы) и комплексные показатели точности зубчатых колес и передач [4, стр. 326].

Первая часть ISO 1328 [1, стр. 1] содержит допустимые значения погрешностей шага, общие погрешности профиля зуба и общие погрешности направления зуба. Вторая часть [2, стр. 1] содержит допустимые значения колебаний измерительного межосевого расстояния и радиального биения.

В ГОСТ 1643-81 [3, стр. 4] указано, что «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». В ISO 1328, приложение А, пункт А.1 [1, стр. 17]: «Если нет особых указаний в документах на приобретение, измерение кинематической погрешности не обязательно. Поэтому допуски для этой погрешности не включены в основное содержание этой части ИСО 1328». Полная кинематическая погрешность  $F'_i$  в ISO 1328 определяется по формуле  $F'_i = F_p + f'_i$ , т.е. суммой полной накопленной погрешности шага и местной кинематической погрешности соответственно. Через эту же формулу в ГОСТ 1643-81 [3, стр.9, табл.6] определяется допуск на кинематическую точность.

матическую погрешность, равный сумме допусков на накопленную погрешность шага зубчатого колеса и на погрешность профиля зуба соответственно.

В ГОСТ 1643-81 показатели плавности работы зубьев [3, стр. 5] и показатели контакта зубьев [3, стр. 7] устанавливаются в зависимости от значений коэффициента осевого перекрытия  $\varepsilon_\beta$ . Коэффициент осевого перекрытия рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_\beta = \frac{b_w}{p_x}, \text{ где } b_w - \text{рабочая ширина венца, } p_x - \text{осевой шаг.}$$

В ISO 1328 [1, стр. 17] местная кинематическая погрешность  $f_i'$  определяется по формуле  $f_i' = K(4,3 + f_{pt} + F_\alpha)$ , где  $f_{pt}$  – погрешность шага,  $F_\alpha$  – погрешность профиля зуба общая, а коэффициент  $K$  зависит от коэффициента перекрытия  $\varepsilon_\gamma$ , т.е. местная кинематическая погрешность зависит от коэффициента перекрытия. Коэффициент перекрытия рассчитывается по формуле  $\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta$ , где  $\varepsilon_\alpha$  – коэффициент торцового перекрытия,  $\varepsilon_\beta$  – коэффициент осевого перекрытия. Коэффициент торцового перекрытия определяется по формуле  $\varepsilon_\alpha = \frac{z_1 \operatorname{tg} \alpha_{a1} + z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2} - (z_1 + z_2) \operatorname{tg} \alpha_{tw}}{2\pi}$ , где  $z_1, z_2$  – числа зубьев шестерни и колеса соответственно,  $\alpha_{a1}, \alpha_{a2}$  – углы профиля зуба в точке на окружности вершин шестерни и колеса соответственно,  $\alpha_{tw}$  – угол зацепления. Вместо таблицы допустимых значений местной кинематической погрешности приведена таблица значений  $f_i'/K$  [1, стр. 18-19].

В ISO 1328 пункт В.1 приложения В [1, стр. 20]: «Так как погрешности формы профилей и контактных линий, а также наклона профилей зуба и наклона винтовых линий зуба не являются отдельным предметом для обязательных допусков, то они не предусматриваются в качестве нормативных элементов в этой части ИСО 1328. Однако, поскольку погрешности наклона и формы имеют существенное влияние на рабочие характеристики колеса, то соответствующие значения приведены в таблицах В1-В3 [1, стр.21-26]».

Радиальное биение во второй части ISO 1328 [2, стр. 8] также не является нормативной величиной и носит информационный характер.

В ISO 1328 многие погрешности определяются частью профиля до начала модифицированного участка. В ГОСТ 1643-81 модификация профиля не оговорена.

Во второй части ISO 1328 [2, стр. 2] контроль полного колебания измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_i''$  предусматривает двухпрофильный контакт. Этот метод контроля прост, но имеет неустраняемые недостатки, которые описаны в целом ряде работ отечественных ученых [5].

## Отличия в построении стандарта ISO 1328

ISO 1328, в отличии от ГОСТ 1643, состоит из частей (ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997), имеющих общий заголовок *Передачи зубчатые цилиндрические – Система точности по ИСО*.

- Часть 1: Определения и допустимые значения отклонений соответствующих боковых поверхностей зацепляющихся зубьев.
- Часть 2: Определения и допустимые значения отклонений, относящихся к радиальным составным отклонениям (колебаниям измерительного межосевого расстояния), и информация по износу (радиальному биению).

Пункт 2 [1, 2, стр. 1] гласит, что ISO 1328 «не содержит все необходимые положения. Но он использует положения (ресурсы) из других документов. На эти другие положения есть ссылки в документах. И эти положения тоже становятся частью этого стандарта». В частности, в ISO 1328-1 это:

ISO/TR 10064-1:1992, *Передачи зубчатые цилиндрические. Практическое руководство по приемке. Часть 1. Контроль соответствующих боковых поверхностей зубьев.*

В ISO 1328-2 [2, стр. 2]:

ISO 701:1976, *Передачи зубчатые. Термины и обозначения геометрических данных.*

ISO 1122-1:1983, *Передачи зубчатые. Терминология. Часть 1. Определение геометрии.*

ISO 1328-1:1995, *Передачи зубчатые цилиндрические. Система точности по ISO Часть 1: Определения и допустимые значения отклонений соответствующих боковых поверхностей зацепляющихся зубьев.*

ISO/TR 10064-2:1996, *Передачи зубчатые цилиндрические. Практическое руководство по приемке. Часть 2. Контроль суммарных радиальных отклонений, биения, толщины зуба и зазора.*

В ISO 1328 отсутствует таблица допустимых значений накопленной погрешности шага  $F_{pk}$ . Эта величина рассчитывается по формуле  $F_{pk} = f_{pt} + 1,6\sqrt{(k-1)t}$ , где  $f_{pt}$  – погрешность шага,  $k$  – число шагов,  $t$  – модуль. Стандарт ISO 1328 содержит определение зубчатого колеса механизма [2, стр. 2] и требования к измерительному зубчатому колесу. В частности, пункт 5.5 [2, стр. 3]: «При использовании измерительного колеса с цилиндрическими косозубыми колесами ширина зубчатого венца измерительного колеса должна быть такой, чтобы коэффициент осевого перекрытия,  $\varepsilon_\beta$ , в сравнении с зубчатым колесом механизма был меньше или равен 0,5».

### Сравнения табличных значений погрешностей на уровне базы (5 степень точности в ISO) в обоих стандартах

Величины допустимых значений погрешностей в ISO 1328 рассчитываются по формулам для 5-ой степени точности. Пункт 5.2 [1, стр.7]: «Коэффициент шага между двумя последовательными степенями равен  $\sqrt{2}$ ; т.е. величины каждой следующей большей (меньшей) степени определяются умножением (делением) на  $\sqrt{2}$ . Требуемая величина для любой степени точности может быть определена умножением неокругленной вычисленной величины для 5-ой степени точности на  $2^{0,5(Q-5)}$ , где  $Q$  – это число степени точности требуемой величины».

| ISO 1328  | ГОСТ 1643-81   |
|---|--|
| 1) погрешность шага, $\pm f_{pt}$ 6,5 мкм   | 1) отклонение шага, $\pm f_{pt}$ 8 мкм   |
| 2) полная накопленная погрешность шага колеса, $F_p$ 19 мкм   | 2) допуск на накопленную погрешность шага, $F_p$ 20 мкм  |
| 3) погрешность профиля зуба общая, $F_\alpha$ 9,5 мкм   | 3) допуск на погрешность профиля зуба, $f_{\alpha}$ 7 мкм  |
| 4) погрешность направления зуба общая, $F_\beta$ 7 мкм  | 4) допуск на направление зуба, $F_\beta$ 7 мкм   |
| 5) местная кинематическая погрешность, $f'_I$ 14,6 мкм  | 5) допуск на местную кинематическую погрешность, $f'_I$ 16 мкм   |
| 6) допуск на полное колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса, $F_i''$ 31 мкм | 6) допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса, $F_i''$ 25 мкм |
| 7) допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, $f_i''$ 15 мкм                     | 7) допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, $f_i''$ 13 мкм              |
| 8) допуск на радиальное биение, $F_r$ 16 мкм  | 8) допуск на радиальное биение, $F_r$ 18 мкм   |

Таблица. Сравнение табличных значений погрешностей в стандартах

В таблице приведено сравнение значений параметров точности стандартов при следующих исходных данных: модуль  $m=5$  мм, делительный диаметр  $d=100$  мм, ширина венца  $b=30$  мм, коэффициент осевого перекрытия  $\varepsilon_{\beta}=1,5$ .

### **Заключение**

В работе сравнивались стандарты ГОСТ 1643-81 и ISO 1328 (ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997) в плане наличия принципиальных отличий и по структуре. Было произведено сравнение табличных значений погрешностей на уровне базы стандарта ISO 1328.

Имеющееся у нас оборудование для изготовления зубчатых колес не позволяет получать высоких степеней точности по ISO 1328, а оборудование для контроля предполагает ручное измерение параметров, в то время как ISO 1328 предусматривает только автоматизированное и компьютеризованное измерение.

### **Список литературы**

1. ISO 1328-1:1995 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
2. ISO 1328-2:1997 Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
3. ГОСТ 1643-81. Передатки зубчатые цилиндрические. Допуски. М.: Издательство стандартов, 1989.
4. Тищенко О.Ф., Валединский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1977.
5. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1972.

# ПОСТРОЕНИЕ ЕДИНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.О. Дергунов

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

В статье рассматриваются особенности создания структуры единой базы данных технологического назначения. Приведен пример конкретной реализации данной базы с использованием Microsoft SQL Server 2000.

## Введение

В настоящее время существует огромный объем разнообразной информации по стандартным элементам (на основе ГОСТ, ОСТ, СТП и пр.), инструментам, материалам и т.д., необходимой для технологической подготовки производства. Вся эта информация хранится, как правило, в различных справочниках и классификаторах. Часть информации попадает в компьютерные системы различными способами. Это могут быть сканированные материалы, информация, введенная оператором с клавиатуры или хранящаяся в подсистемах АСТПП, в которых используются баз данных.

Таким образом, вся необходимая для технологической подготовки производства информация представлена, в конечном итоге, на различных носителях и в разрозненном виде, что существенно затрудняет ее поиск и последующую обработку.

Наиболее очевидным способом облегчения хранения, поиска и обработки всей этой информации является представление ее в виде единой базы данных.

## Представление данных

Особенностью баз данных технологического назначения является наличие многих сотен наборов данных. Каждый набор имеет свою структуру и относительно небольшой объем (от одной до 200–300 записей). Данное обстоятельство существенно осложняет представление, поиск и обработку данных технологического назначения.

Чтобы найти оптимальное решение данной проблемы, необходимо, прежде всего, рассмотреть область применения хранимой в базах данных технологического назначения информации (рис. 1).

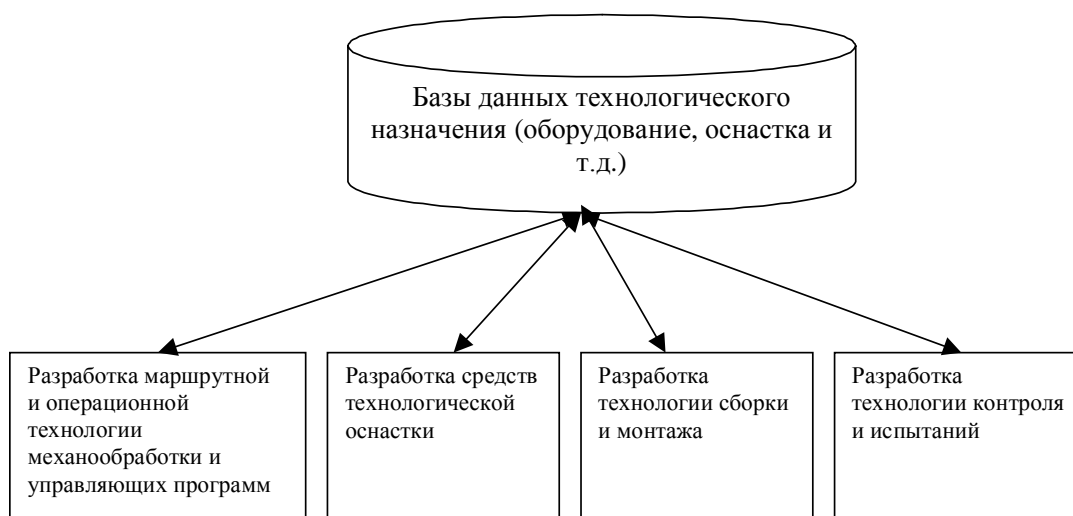


Рис. 1. Применение базы данных технологического назначения

Информацию, которая должна храниться в базах технологической подготовки производства, в общем случае можно объединить в следующие классы:

- режущий инструмент;
- измерительный инструмент;
- оборудование;
- приспособления;
- роботы;
- пресс-формы;
- припуски;
- заготовки;

В свою очередь, в каждом классе выделяются группы, обладающие одинаковыми наборами параметров. Например, в режущем инструменте можно выделить сверла, резцы и пр. При дальнейшей детализации выделяются объекты с конкретными значениями параметров. Таким образом, все элементы технологического назначения можно представить в виде рис. 2.

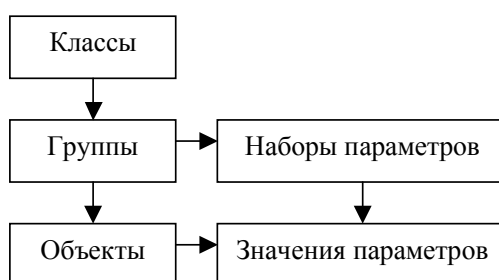


Рис. 2. Представление элементов технологического назначения

Благодаря введенному представлению становится возможным реализовать единую базу данных технологического назначения.

### Реализация базы данных

После проведенного анализа современных СУБД для реализации базы данных технологического назначения предпочтение было отдано Microsoft SQL Server 2000 [3]. В результате реализации с использованием Microsoft SQL Server 2000 была создана база данных со структурой, представленной на рис. 3.

Как видно из рис. 3, единая база данных технологического назначения состоит из следующих таблиц:

- 1) Classes – наименования классов (поле name\_class);
- 2) Groups – наименования групп (поле name\_group);
- 3) Objects – наименования объектов (поле name\_object);
- 4) GroupsValues – параметры, характерные для групп;
- 5) ObjectsValues – значения параметров для конкретных объектов (поле d\_value);
- 6) Attributes – наименование параметров (name\_attribute);
- 7) Dimensions – полное (поле name\_dimension) и сокращенное (поле short\_dimension) наименование единиц измерения.

Все таблицы связаны между собой посредством уникальных идентификаторов (поля с префиксом id).

Данный подход позволил представить множество объектов с разными параметрами в рамках реляционной базы данных. В результате появилась возможность обеспечить единый способ обработки, поиска и ввода информации, а также добиться информационной совместимости подсистем АСТПП. Дальнейшее изучение показало, что в

рамках получившейся базы данных можно хранить и такие сложные объекты, как детали, а также технологические процессы.

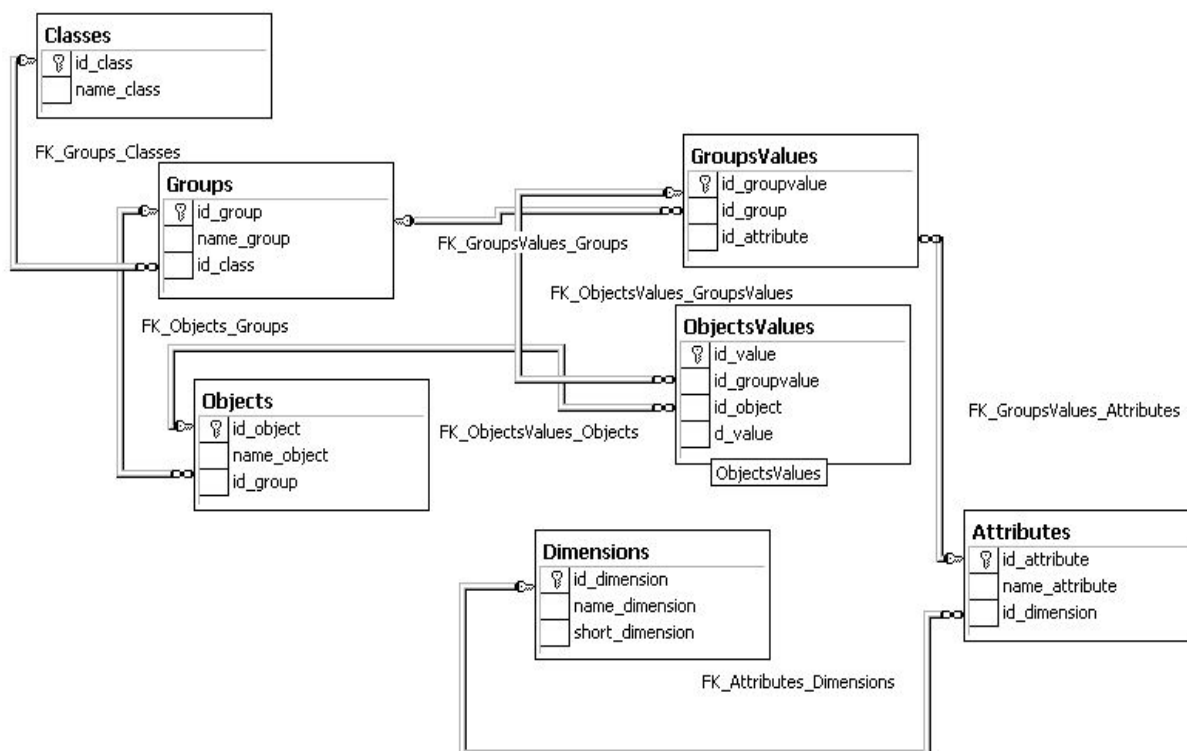


Рис. 3. Модель единой базы данных технологического назначения

## Заключение

В данной статье рассмотрены основная особенность построения базы данных технологического назначения – наличие множества наборов данных с различной структурой и относительно малым числом записей.

Приведен один из возможных подходов к их реализации, основанный на выделении классов и групп объектов с одинаковыми признаками. Представлена конкретная реализация общей базы данных технологического назначения для MS SQL Server 2000.

## Литература

1. Бэйн Т., Госнелл Д. Visual Basic. Net и SQL Server 2000. Эффективный уровень данных. СПб: Бинум, 2004.
2. Казеннов Г.Г. Основы построения САПР и АСТПП: / Учебник М.: Высшая школа, 1989.
3. Тихомиров Ю.В. MS SQL Server 2000: разработка приложений. СПб: БХВ-Петербург, 2000.

# СОЗДАНИЕ УДАЛЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В СРЕДЕ СТАНДАРТНЫХ ИНТЕРНЕТ ПРИЛОЖЕНИЙ

П.Д. Юсупов

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

Удаленные базы данных используются как в составе локальной сети, так и в составе глобальной сети (Интернет). Основные функции 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.

Схематически можно представить взаимодействие базы данных и WEB-сервера в виде рис. 1.

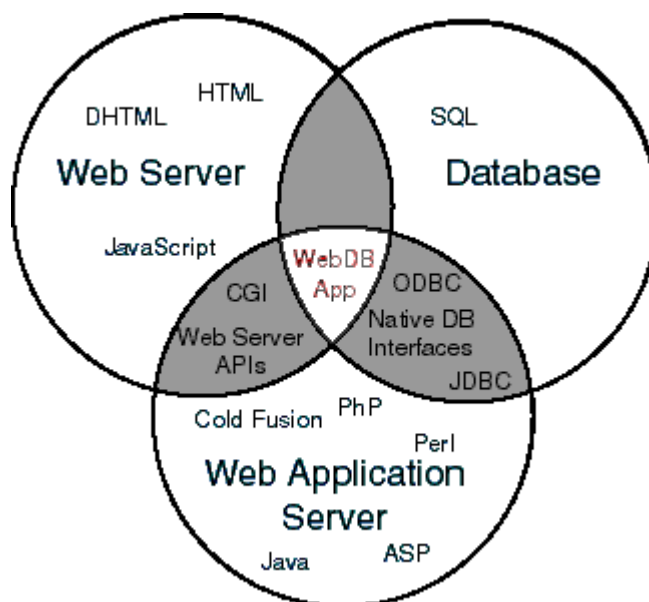


Рис. 1. CGI – Common Gateway Interface

Спецификация CGI позволяет браузеру вызвать тот или иной исполняемый модуль или скрипт на Web-сервере, который может обратиться с запросом к базе данных, построить в HTML-кодах страницу результатов и передать ее обратно Web-серверу, который же, в свою очередь, отсылает результаты браузеру. CGI-приложения могут содержать вызовы других программных (написанных, например, на Delphi) или командных (.bat, .cmd) файлов.

В разрабатываемой в данный момент Интернет-версии ТИС CGI приложение написано на Delphi 7 и работает в режиме просмотра по принципу «тонкого» клиента, используя BDE и Веб сервер IIS.

Средства для ведения базы данных, создаваемые на основе классической архитектуры клиент/сервер и называемые двухзвенными системами или системами с «толстым» клиентом, состоят из сервера баз данных, содержащего сгенерированные тем или иным способом таблицы, индексы, триггеры и другие объекты, реализующие бизнес-правила данной информационной системы, и одного или нескольких



клиентских приложений, предоставляющих интерфейс пользователя и производящих проверку допустимости и обработку данных согласно содержащимся в них алгоритмам. Клиентское приложение создается с помощью Delphi, поэтому для доступа к источникам данных они используют вызовы функций прикладных программных интерфейсов клиентских частей соответствующих серверных СУБД. Эти вызовы осуществляются посредством использования библиотеки Borland Database Engine (BDE). Соответственно, подобное клиентское приложение требует наличия на компьютере конечного пользователя клиентской части используемой серверной СУБД и присутствия в оперативной памяти набора динамически загружаемых библиотек как из клиентской части, так и из BDE, таких, как драйверы баз данных, библиотеки, содержащие функции API клиентских частей.

Используя BDE, можно создать приложения, работающие как с однопользовательскими базами данных (БД), так и с серверными СУБД, такими как Oracle, Sybase, Informix, Interbase, MS SQL Server, IIS, а также с ODBC-источниками (как в нашем случае). BDE обеспечивает для созданных приложений:

- непосредственный доступ к локальным базам данных (dBase, Paradox, текстовые файлы);
- доступ к SQL-серверам (Oracle, Sybase, MS SQL Server, InterBase, Informix, DB2) с помощью драйверов Borland SQL Links;
- доступ к любым источникам данных, имеющим драйвер ODBC (Open DataBase Connectivity), например, к файлам электронных таблиц (Excel, Lotus 1-2-3), серверам баз данных, не имеющим драйверов SQL Links (например, Gupta/Centura);
- создание приложений клиент-сервер, использующих разнородные данные;
- высокую производительность при работе с плоскими таблицами;
- использование SQL (Structured Query Language – язык запросов к серверным СУБД), в том числе при работе с локальными данными;
- изоляцию приложения от средств языковой поддержки;
- изоляцию приложения от конфигурации системы и сети.

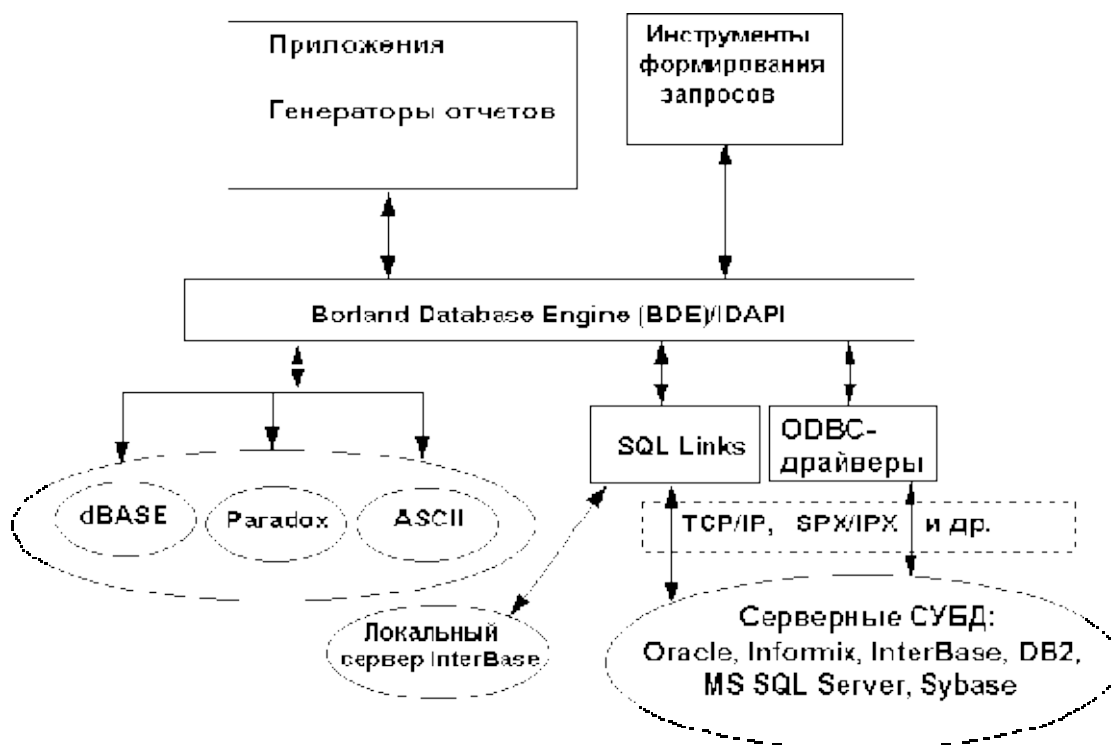


Рис. 2. Связь приложений с источниками данных с помощью BDE

По таким принципам построена Интернет версия ТИС. На рис. 3 представлена иллюстрация одной из страниц этой системы.

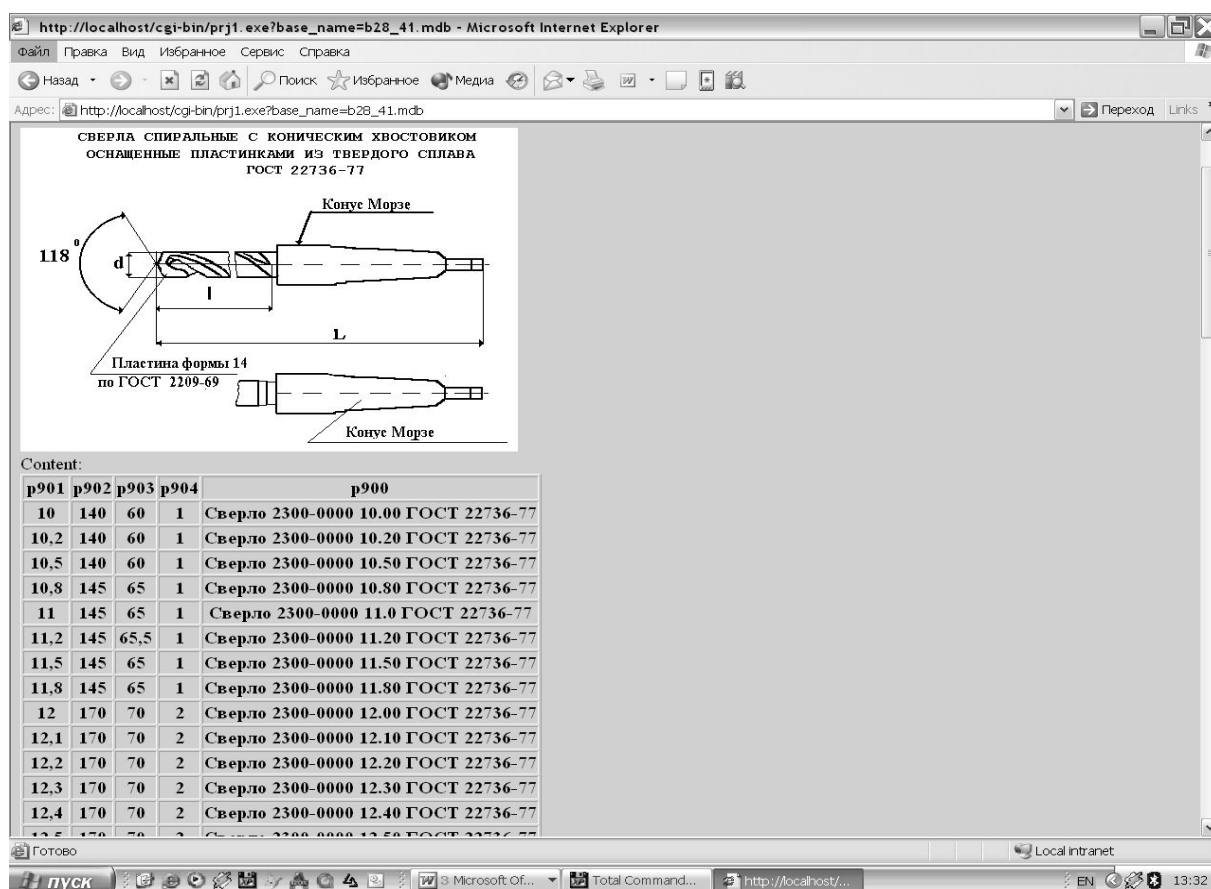


Рис. 3. Система ТИС-WEB

При переводе системы ТИС в такой формат она получила следующие преимущества:

- стало возможным работать с системой не только в локальной, но и в глобальной сети по протоколу ТС/IP, используя IIS;
- просмотр системы возможен без клиентской части, вся база данных хранится на сервере;
- к системе может быть подключена любая база, построенная по соответствующему принципу (принцип построения, в основном, зависит от названий файла, и этот принцип заимствован из предыдущих систем ТИС);
- безопасность базы данных обеспечивается средствами IIS.

Также выявились и некоторые недостатки:

- более трудоемок процесс организации интеллектуального поиска;
- возможно некоторое снижение быстродействия из-за взаимодействия со стандартными протоколами ODBC.

## Литература

1. Сван Т. Секреты 32-разрядного программирования в Delphi. К: Диалектика. 1997.
2. Дунаев С. Технологии Интернет- программирования. СПб: БХВ-Петербург, 2001.

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СВЯЗЕЙ ЧЕРЕЗ ШТЫРЕВЫЕ РАЗЪЕМЫ И МНОГОЖИЛЬНЫЕ КАБЕЛИ

В.Ю. Сушко

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Кораблев

В РЭА локальные тепловые связи часто представлены штыревыми разъемами с подводщими многожильными кабелями. Предлагаемая методика позволяет оценить тепловое сопротивление многоконтактного разъема, используя его паспортные данные. Приводится результат экспериментального определения теплового сопротивления и его сопоставление с результатами расчета.

## Введение

В современной электронике для соединения различных блоков, плат и отдельных деталей используются штыревые разъемы. Помимо электрических сигналов, через них и подводщие провода могут передаваться тепловые потоки, возникающие из-за разности температур соединяемых элементов. Разъемы являются стандартными изделиями, но величины их тепловых сопротивлений не нормируются и не приводятся в технической документации.

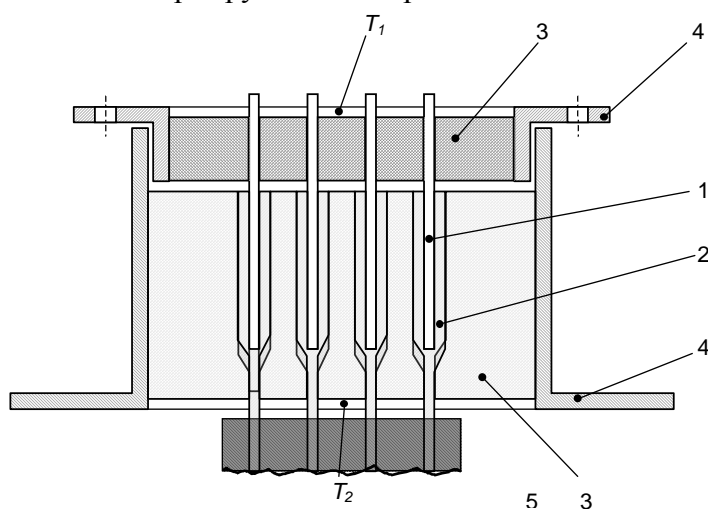


Рис. 1. Типовая конструкция разъема: 1 и 2 – электропроводные элементы, 3 – пластиковые, стеклянные или керамические панели, 4 – корпуса разъемов, 5 – изоляция подводщих кабелей

Типовая конструкция разъема представлена на рис.1. Тепловой поток идет от поверхности с температурой  $T_1$  к поверхности с температурой  $T_2$  следующими путями:

- через электропроводный элемент 1, контактное сопротивление в месте соединения с другим элементом и ответный электропроводный элемент 2;
- через толщину электроизоляционных панелей 3 и воздушный зазор между ними;
- по корпусам разъемов через место их контакта.

Под тепловым сопротивлением  $R_{раз}$  разъема понимается отношение перепада температур  $T_1$  и  $T_2$  (рис.1) к тепловому потоку  $\Phi$ , протекающему через разъем:

$$R_{раз} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi}. \quad (1)$$

В работе [1] показано, что три составляющие теплового потока можно рассчитать, зная тепловые сопротивления каждого из путей, а суммарное тепловое сопротивление разъема можно определить как состоящее из трех соответствующих параллельных сопротивлений. Задача осложняется тем, что в зоне контакта электропроводящих элементов (рис. 2) имеется область  $L$ , в которой тепловой поток от одного элемента передается к другому, двигаясь вдоль поверхности контакта и частично пересекая ее, как показано стрелками.

## Тепловая и математическая модель разъема

Модель области контакта представлена на рис. 2, где стержни 1 и 2 имеют теплопроводности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и площади поперечного сечения  $A_1$  и  $A_2$  соответственно. Величина контактного сопротивления  $3 - R_k$ , К/Вт;  $L$  – длина контакта.

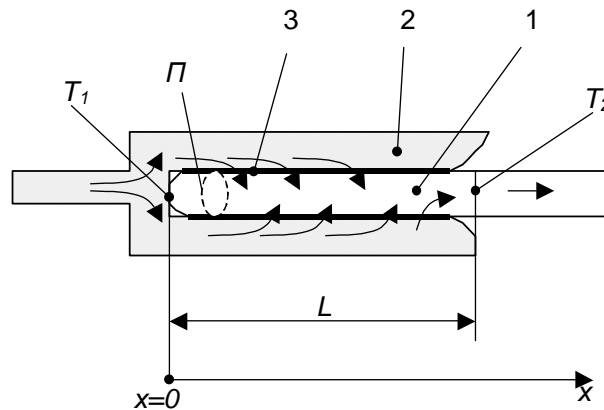


Рис. 2. Модель области контакта. 1 и 2 – стержни, 3 – контактное сопротивление.

Для элементарной ячейки стержня 1 длиной  $\Delta x$  уравнение теплового баланса имеет вид

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3, \quad (2)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – тепловые потоки, переносящие тепло по стержню 1, входящие и выходящий из элементарной ячейки соответственно;  $\Phi_3$  – тепловой поток, идущий в сторону стержня 2.

Если расписать значения потоков с помощью закона Фурье, то после преобразований получится уравнение теплопроводности для стержня 1:

$$\lambda_1 A_1 \frac{d^2 t_1(x)}{dx^2} + \alpha_k \Pi \cdot (t_2(x) - t_1(x)) = 0. \quad (3)$$

Здесь  $t_1(x)$  и  $t_2(x)$  – температуры первого и второго стержня соответственно. Аналогичное уравнение можно записать и для второго стержня,  $\Pi$  – периметр поперечного сечения стержня 1 в области контакта,  $\alpha_k$  – коэффициент контактного теплообмена, который можно рассчитать по методике, изложенной в [2].

Задача нахождения теплового сопротивления сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \lambda_1 A_1 \frac{d^2 t_1(x)}{dx^2} + \alpha_k \Pi \cdot (t_2(x) - t_1(x)) = 0 \\ \lambda_2 A_2 \frac{d^2 t_2(x)}{dx^2} + \alpha_k \Pi \cdot (t_1(x) - t_2(x)) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\begin{cases} t_1|_{x=0} = T_1 \\ t_2|_{x=L} = T_2 \\ \left. \frac{dt_1}{dx} \right|_{x=L} = \left. \frac{dt_2}{dx} \right|_{x=0} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – заданные постоянные температуры концов контактов.

Тепловое сопротивление находится из решения системы (4)–(5) по формуле [3]:

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{T_1 - T_2}{-\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} \Big|_{x=0} \cdot A_1}. \quad (6)$$

Аналитическое решение системы уравнений (4)–(6) было найдено в виде

$$R = \frac{L \cdot k_3}{2\lambda_1 A_1 k_2 \operatorname{sh}(k_2) \cdot (1 + k_1)}, \quad (7)$$

где постоянные  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  имеют вид

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\lambda_1 A_1}{\lambda_2 A_2}, \\ k_2 = \sqrt{\frac{L(\lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2)}{R_k \lambda_1 A_1 \lambda_2 A_2}}, \\ k_3 = 4k_1 + e^{-k_2} (k_1^2 - k_1 k_2 + 1) + e^{k_2} (k_1^2 + k_1 k_2 + 1). \end{cases} \quad (8)$$

При  $k_2 \gg 1$ , что обычно выполняется при малом контактном сопротивлении, формула (7) упрощается:

$$R = \frac{L(k_1^2 + k_1 k_2 + 1)}{\lambda_1 A_1 k_2 (1 + k_1)}. \quad (9)$$

Формула (9) удовлетворяет предельным переходам. При  $\lambda_1 \rightarrow \infty$  (первый стержень отсутствует) получается известная формула для стержня [4], где роль коэффициента теплоотдачи играет  $\alpha_k$ .

Полное тепловое сопротивление разъема  $R_{раз}$  можно рассчитать по формуле:

$$R_{раз} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{корп}} + \frac{1}{R_{эи}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где  $n$  – число контактов,  $R_i$  – сопротивление  $i$ -го контакта, рассчитанное по формуле (7),  $R_{корп}$  – тепловое сопротивление корпуса, также рассчитанное по формуле (7),  $R_{эи}$  – тепловое сопротивление электроизоляции, рассчитанное по формуле для плоской стенки.

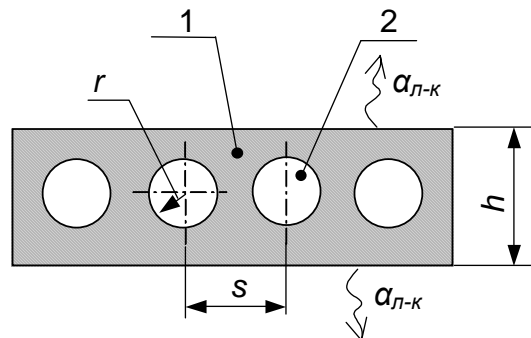


Рис. 3. Модель многожильного кабеля, 1 – электрическая изоляция, 2 – подводящие провода.

Поперечное сечение многожильного кабеля представлено на рис. 3. Подводящие провода 2 рассматриваются как металлические полубесконечные стержни радиусом  $r$ . Стержни располагаются внутри электрической изоляции 1 толщиной  $h$  на расстоянии  $s$  друг от друга. Тогда тепловое сопротивление многожильного кабеля длиной  $L_{каб}$  находится по формуле для стержня:

$$R_{каб} = \frac{1}{n \sqrt{\alpha_{эф} \Pi \lambda_2 A_2}} \operatorname{cth} \left( \sqrt{\frac{\alpha_{эф} \Pi}{\lambda_2 A_2}} L_{каб} \right). \quad (11)$$

Тепловое сопротивление изоляции  $R_{из}$  учитывается за счет эффективного коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{эф} = \left( \Pi \left( R_{из} L_{каб} + \frac{1}{\alpha_{л-к} s} \right) \right)^{-1}, \quad (12)$$

где  $\alpha_{л-к}$  – конвективно-лучистый коэффициент теплоотдачи с поверхности изоляции, а тепловое сопротивление изоляции может быть найдено по формуле для массива с теплопроводностью  $\lambda_{из}$ , ограниченного двумя параллельными плоскостями и заключающего ряд труб одинакового диаметра [4]:

$$R_{из} = \frac{1}{2\pi L_{каб} \lambda_{из}} \ln \left[ \frac{s}{\pi \cdot r} sh \left( \frac{\pi \cdot h}{2s} \right) \right]. \quad (13)$$

Для проверки формулы (7) было найдено тепловое сопротивление разъема Am-Phenol 17DA15U, имеющего 15 контактов.  $R_i$  и  $R_{корп}$  были определены по формуле (7), причем в качестве контактного сопротивления между частями корпуса берется тепловое сопротивление воздушного зазора между ними. Контактное тепловое сопротивление между контактами находится по методике, указанной в [2]. Давление в зоне контакта найдено при помощи справочных данных по коэффициенту трения [5] и известного усилия, с которым соединяется разъем.

### Заключение

В результате расчетов получено, что сопротивление разъема  $R = 4,2 \frac{K}{Bm}$ , а экспериментально найденное значение теплового сопротивления  $R_{эксн} = 4,5 \pm 0,5 \frac{K}{Bm}$ . Относительная погрешность составляет 7%, что приемлемо для большинства расчетов. Следовательно, полученная при некоторых допущениях предлагаемая методика вполне может применяться для расчета теплового сопротивления реальных разъемов.

### Литература

1. Дульнев Г. Н., Семьяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968
2. Дульнев Г. Н., Шарков А. В. Системы охлаждения приборов. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1984.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
4. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена, изд. 5-ое. М.: Атомиздат, 1979.
5. Левин И. Я. Справочник конструктора точных приборов, изд. 2-ое. М.: Оборонгиз, 1962.

# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ЛОКАЛЬНОГО СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ТУННЕЛЬНОГО ТОКА ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

С.Ю. Керпелева

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

Приводятся результаты исследования параметров универсального датчика туннельного тока и силового взаимодействия сканирующего зондового микроскопа в зависимости от геометрических размеров при работе в вакууме, газе и жидкости.

## Введение

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – это прибор, позволяющий исследовать структуру и физико-химические свойства поверхностей материалов от микронного до атомарного уровней пространственного разрешения [1]. Это стало возможным, с одной стороны, благодаря развитию аппаратных средств и программного обеспечения, а с другой – благодаря созданию прецизионных датчиков локального взаимодействия. В качестве зондов в СЗМ используют остро заточенные иглы, приближенные на сверхмалые расстояния к исследуемому объекту, причем в случае сканирующего силового микроскопа эти иглы обычно закрепляют на упругих микробалках – кантилеверах [2].

## Теоретическая часть

Типичная схема СЗМ представлена на рис. 1. Конкретная конструкция прибора может существенным образом видоизменяться в зависимости от решаемой задачи и условий эксперимента (сверхвысокий вакуум, газовая среда заданного состава, низкие или высокие температуры).

В состав СЗМ-комплекса обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные, производит на их основе построение СЗМ-изображения и, кроме того, позволяет обрабатывать полученное изображение, без чего подчас бывает трудно или вообще невозможно проанализировать наблюдаемую картину [2].

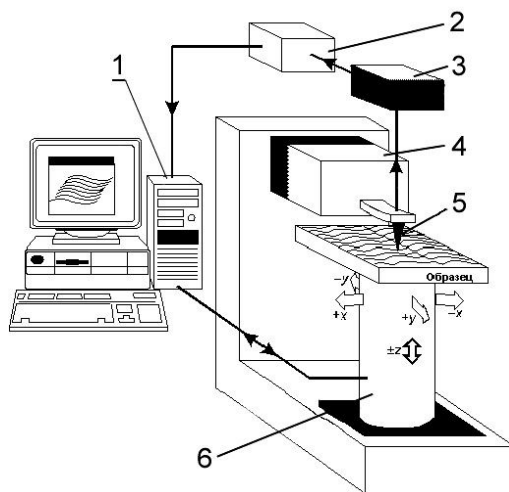


Рис. 1. Типичная схема сканирующего зондового микроскопа

1 – компьютерная система управления движением сканирующего устройства, сбора, визуализации и анализа данных; 2 – система обратной связи для контроля за вертикальным движением сканирующего устройства; 3 – датчик положения зонда; 4 – система грубого подвода и позиционирования зонда; 5 – зонд; 6 – трехкоординатный пьезосканер, перемещающий образец под иглой (иглу над образцом) по растровой схеме

Принцип работы СЗМ заключается в следующем. С помощью системы грубого позиционирования 4 зонд 5 подводится к поверхности исследуемого образца. При приближении образца и зонда на расстояние менее сотен нанометров зонд начинает взаимодействовать с поверхностью анализируемого объекта. Перемещение зонда вдоль неподвижной поверхности образца или образца относительно неподвижного зонда осуществляется с помощью трехкоординатного пьезосканера 3. Обычно он представляет собой трубку из пьезокерамики, на поверхность которой нанесены три пары разделенных электродов. Под действием приложенных к пьезотрубке напряжений  $U_x$  и  $U_y$  она изгибается, обеспечивая тем самым перемещение образца относительно зонда по осям  $X$  и  $Y$ , под действием напряжения  $U_z$  – сжимается или растягивается, что позволяет изменять расстояние игла-образец [3].

Традиционным датчиком локального взаимодействия в случае сканирующего силового микроскопа (ССМ), как уже говорилось выше, является кремниевая микробалка (кантилевер) с оптической схемой регистрации величины прогиба микробалки, возникающего вследствие силового взаимодействия между образцом и зондом, расположенным на краю микробалки. Различают контактный, бесконтактный и полуконтактный способы измерения силового взаимодействия. В контактном режиме зонд упирается в образец и отталкивается от него. В бесконтактном режиме зонд удален от поверхности и находится в области действия притягивающих сил. Силы притяжения и их градиенты на ветви притягивающего взаимодействия слабее соответствующих величин на ветви отталкивания. Поэтому для их детектирования обычно используется модуляционная методика. Для этого с помощью пьезовибратора кантилевер раскачивается на резонансной частоте. Вдали от поверхности амплитуда колебаний кантилевера имеет максимальную величину. По мере приближения к поверхности амплитуда колебаний, вследствие действия сил притяжения, уменьшается, при этом также изменяется частота и фаза колебаний. Чувствительность метода тем выше, чем выше добротность механической колебательной системы.

В полуконтактной моде также применяется модуляционная методика измерения силового взаимодействия. В этом режиме зонд постукивает по поверхности, находясь как в области притяжения, так и в области отталкивания.

Датчиком локального взаимодействия в случае сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) 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 [4].

Обычно датчики локального взаимодействия для ССМ и СТМ представляют собой отдельные устройства, и в процессе работы их приходится заменять, однако удобнее работать с универсальным датчиком туннельного тока и силового взаимодействия, не требующим замены при переходе от одного режима измерения к другому.

### **Конструкция универсального датчика локального взаимодействия**

Универсальный датчик туннельного тока и силового взаимодействия для работы в полуконтактной моде выполнен в виде пьезокерамической трубки длиной  $l = 7$  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.

Колебание пьезотрубки осуществляется с помощью синусоидального электрического напряжения, прикладываемого между общим внутренним электродом и одним из внешних электродов. Напряжение, пропорциональное амплитуде колебаний, измеряет-



ся между внутренним электродом и другим внешним электродом. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм (см. рис. 2).

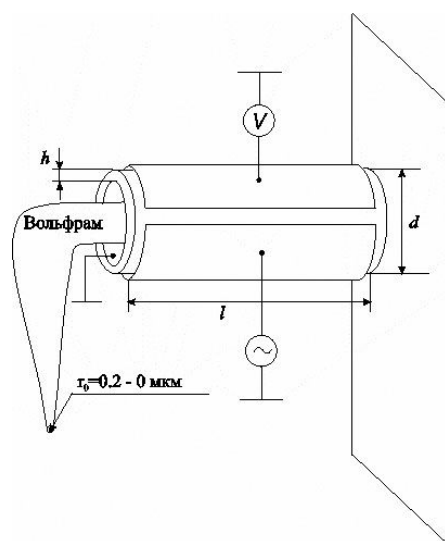


Рис. 2. Конструкция универсального датчика туннельного тока и силового взаимодействия для СЗМ

Свободный конец проволоки, использующийся в качестве нанозонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину 0,2–0,05 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.

Нами была построена математическая модель взаимодействия острия локального датчика с поверхностью исследуемых образцов и разработана конструкция и технология изготовления датчика [5, 6].

### Экспериментальная часть

Испытания датчика проводились в составе прибора NanoEducator (производство ЗАО «Нанотехнология – МДТ»). Исследовалась зависимость резонансной частоты механических колебаний и добротности датчика от длины пьезотрубки и длины вольфрамовой проволоки, из которой изготавливался зонд, при работе в вакууме, в воздушной среде и жидкости.

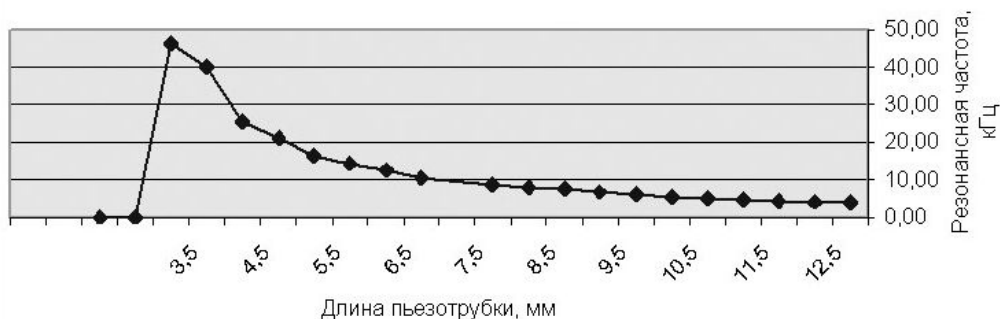


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты  $\omega_{рез}$  от изменения длины пьезотрубки  $l_{трубки}$

На рис. 3 представлена зависимость резонансной частоты  $\omega_{рез}$  от длины пьезотрубки  $l_{трубки}$ . Эти измерения проводились в отсутствие вольфрамового острия. Как видно из графика, резонансная частота увеличивается с уменьшением длины пьезотрубки. При достижении длины пьезотрубки 3,5 мм резонанс пропадает.

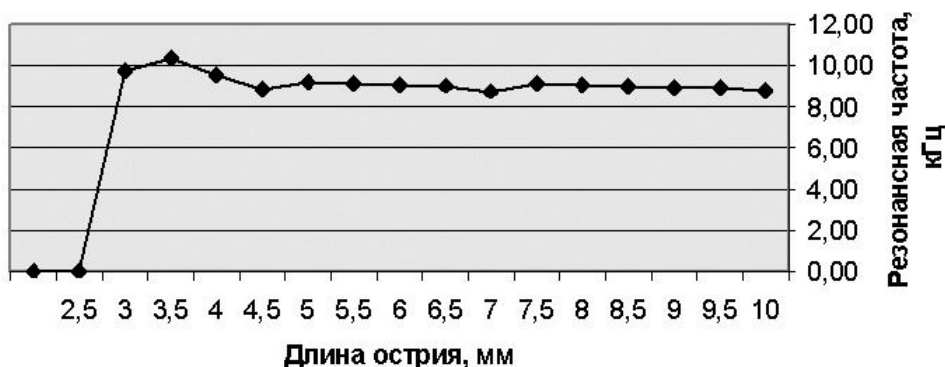


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты  $\omega_{рез}$  от изменения длины острья  $l_{острия}$  вставленного в пьезотрубку длиной  $l_{трубки} = 6,0$  мм

На рис. 4 представлена зависимость резонансной частоты от длины вольфрамового острья, вставленного в пьезотрубку длиной  $l_{трубки} = 6,0$  мм. Измерения проводились в воздушной среде. Как видно из графика, значение резонансной частоты меняется незначительно при изменении длины острья, т.е. резонансная частота датчика определяется геометрическими размерами пьезотрубки.

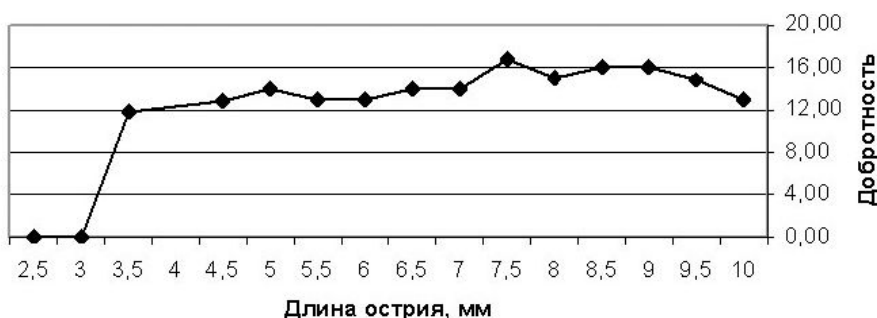


Рис. 5. Зависимость добротности от изменения длины острья, вставленного в пьезотрубку

На рис. 5. представлен график зависимости добротности датчика от длины вольфрамового острья  $l_{острия}$ . Как видно из графика, значение добротности меняется незначительно, однако при малой длине острья (порядка 3 мм) добротность падает, и резонанс пропадает. По-видимому, при малой длине острья его механическая фиксация внутри пьезотрубки ослабевает, что приводит к дополнительному трению и, как следствие, к механическим потерям в колебательной системе.

При исследовании резонансной частоты и добротности  $Q$  при длине пьезотрубки 6,0 мм и длине острья 6,5 мм в различных средах – на воздухе, в вакууме и в воде – были получены следующие результаты:

- $\omega_{на\ воздухе} = 8,410 \pm 0,005$  кГц,
- $\omega_{в\ вакууме} = 8,410 \pm 0,004$  кГц,
- $\omega_{в\ воде} = 8,400 \pm 0,005$  кГц,
- $Q_{на\ воздухе} = 26,00 \pm 1,29$ ,
- $Q_{в\ вакууме} = 37,85 \pm 1,81$ ,
- $Q_{в\ воде} = 21,00 \pm 0,51$ .

Как показали эти эксперименты, резонансная частота датчика практически не зависит от рабочей среды. Как и ожидалось, максимальная добротность (порядка 38 единиц) достигается при работе в вакууме, так как в этом случае отсутствует вязкое трение. Вместе с тем видно, что при данной конструкции датчика его добротность незначительно падает при работе в жидкой среде.

## Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований получены оптимальные геометрические размеры пьезотрубки и вольфрамового острия ( $l_{\text{трубки}} = 6,0$  мм,  $l_{\text{острия}} = 6,5$  мм) с точки зрения достижения максимальной добротности пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия. Кроме того, предлагаемая конструкция универсального датчика туннельного тока и силового взаимодействия обеспечивает возможность проведения экспериментов в различных средах (вакуум, газ, жидкость) без существенного изменения резонансной частоты и добротности колебательной системы.

Автор выражает благодарность сотруднику ООО «НТ-СПб» В.В. Павлову за помощь в проведении измерений.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (научно-техническая программа «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 и науки Российской Федерации по конкурсу персональных грантов для студентов, аспирантов и молодых специалистов (только Санкт-Петербург и Северо-западный регион) 2004 года.

## Литература

1. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии. // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21–23.
2. Сулов А.А., Чижик С. А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор). // Материалы, технологии, инструменты. 1997. Том 2. № 3. С. 78–89.
3. Бухарев А.А., Овчинников Д.В., Бухарева А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор). // Исследования структуры и свойств. Физические методы исследования и контроля. 1996. С. 10–27.
4. Голубок А.О., Дюбарев А.А., Кerpелева С.Ю., Чуркина А.К. Конструкции пьезосенсоров силового воздействия для сканирующей силовой микроскопии. // Труды 6 сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем» ВПБ-03 30 сентября – 03 октября 2003 г., СПб, часть 2, с. 85–90.
5. Кerpелева С.Ю. Варианты конструкции датчика в составе нанотестера, используемого для диагностики и модификации микро- и наноструктур. / Вестник I конференции молодых учёных (16–19 февраля 2004 г.). Т.2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 48–55.
6. Аннотированный отчет по гранту научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (подпрограмма «Электроника» (208)) 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».

# СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА В ГАЗОАНАЛИЗАТОРЕ

Д.С. Макаров

Научный руководитель – к.т.н., с.н.с. В.А. Кораблев

Рассматривается устройство термостатирования газового потока с последующим измерением расхода газа в газоанализаторе. Приведены основные требования к устройству, общее описание его принципа действия и основные характеристики.

Разработанное устройство является составной частью основного прибора – газоанализатора и представляет из себя термостат со встроенным расходомером потока газа. При разработке устройства принимались в расчет следующие исходные требования:

- диапазон изменения температуры окружающей среды 0–30 °С;
- температура газового потока на выходе из термостата  $(34–36) \pm 0.3$  °С;
- химически агрессивная газовая среда;
- максимальный объемный расход газа 1 л/мин;
- время выхода на рабочий режим менее 15 мин
- внутренний диаметр подводящей газ металлической трубки 3 мм;
- напряжение питания управляющей схемы двухполярное,  $\pm 15$  В.

На основе представленных выше данных была предложена модель устройства, проведены необходимые теоретические расчеты величины тепловой изоляции и мощности нагревателя, разработана принципиальная электрическая схема регулятора и анемометра, построен и опробован действующий макет устройства.

При составлении технического задания (см. требования выше) были приняты некоторые допущения. Так, к примеру, оговоренный диапазон изменений температуры окружающей среды не подразумевает резкого скачкообразного изменения температуры. Данное допущение необходимо для того, чтобы устройство могло эксплуатироваться непрерывно в течение некоторого времени после выхода на рабочий режим. При резкой смене температуры устройству может понадобиться от 1 до 6 минут для выхода на новый режим.

Требования к температуре термостатирования (34–36°С) основывались на экспериментальных данных. При экспериментах было выявлено, что данная температура наиболее подходит для протекающей химической реакции газового потока с некоторым реагентом. Для определенности было сформулировано условие: температура газового потока на выходе из термостата  $35 \pm 0.3$ °С.

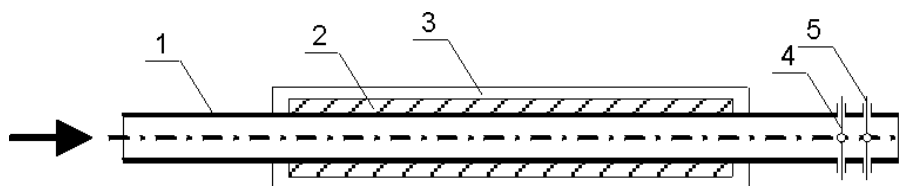


Рис. 1. Принципиальная схема устройства

Химическая агрессивность среды накладывает ограничения на используемые материалы, приводимые в механический контакт с газом. Допускается применение нержавеющей стали, фторопласта, а также герметичных датчиков ТР-2.

На рис. 1 показана принципиальная схема устройства в продольном разрезе. Изучаемый газ поступает в стальную трубку 1 в направлении, изображенном стрелкой. Снаружи на трубку 1 намотан проволочный нагреватель 2, который изолирован от окружающей среды слоем тепловой изоляции 3. На выходе трубки установлены полупро-

водниковые датчики 4 и 5 типа ТР-2. Подводящие концы датчиков выходят через герметичные фторопластовые втулки. Внешний вид и линейные размеры датчика ТР-2 представлены на рис. 2 (1 деление соответствует 1 миллиметру).

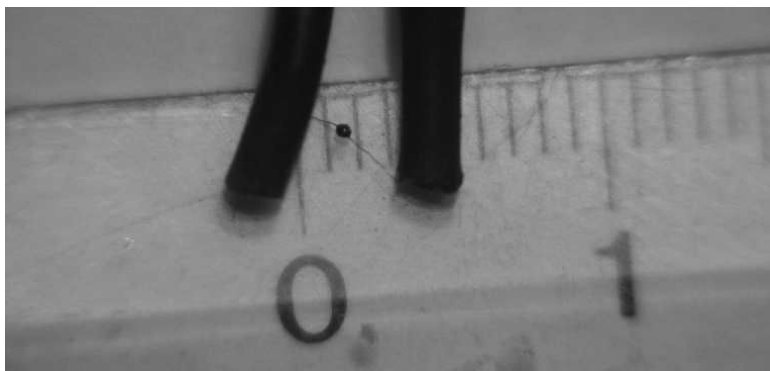


Рис. 2. Полупроводниковый датчик ТР-2: внешний вид и размеры

Датчик 4 служит для измерения температуры газового потока. Датчик 5 используется для измерения скорости протока газа. Датчики 4, 5 и нагреватель 2 подключены к блоку управления. Блок управления представляет собой аналоговую электрическую схему, состоящую из усилителя сигнала, генератора функций (пилообразного напряжения) и компаратора (устройства сравнения сигналов) и управляющую мощностью нагревателя 2 в зависимости от температуры газового потока.

К достоинствам датчика ТР-2 относятся небольшие размеры (бусинка диаметром 0.6 мм, см. рис. 2), высокая чувствительность (около 650 Ом/К), герметичность, стойкость к агрессивным средам. К недостаткам относятся нелинейность характеристики, а также очень существенный разброс номинала. По справочным данным, номинальное значение электрического сопротивления датчика при 25°C равно  $15 \text{ кОм} \pm 20\%$  ( $15 \pm 3 \text{ кОм}$ ), что делает их практически незаменимыми и требует тщательного подбора каждого датчика. Как было указано выше, датчик был выбран из-за стойкости к агрессивным средам. На рис. 3 представлены результаты калибровки датчиков 4 и 5 по платиновому датчику Pt500.

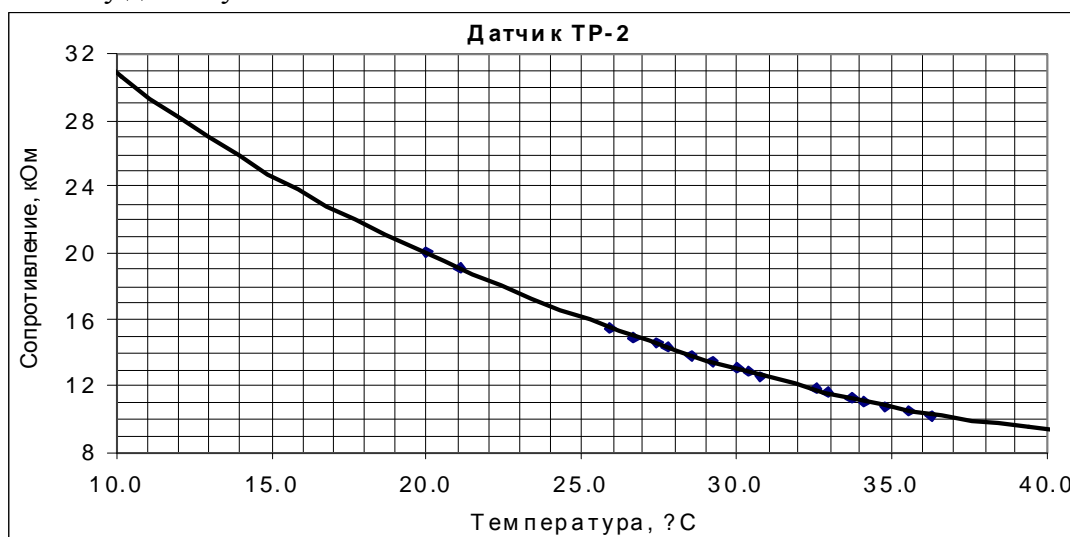


Рис. 3. Температурная зависимость сопротивления датчика ТР-2

Регулирование температуры основывается на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом мощность нагревателя остается постоянной, а изменяется скважность нагревающих импульсов.

Измерение расхода осуществляется по принципу *термоанемометра*. Датчик расхода 5 нагревается протекающим через него постоянным током и при отсутствии потока газа находится при некоторой постоянной температуре. Поток газа вызывает охлаждение датчика и увеличение его сопротивления. Это изменение регистрируется системой.

Расчет нагревателя и тепловых потоков производился по следующей схеме. Из заданных линейных размеров трубки и объемного расхода газа находилась линейная скорость потока: Зная скорость потока, находим критерий Рейнольдса

$$V = \frac{Gv}{S_{сеч}}, \quad Re = \frac{Vd}{\nu},$$

где  $V$  – скорость потока,  $d$  – диаметр трубки,  $\nu$  – кинематическая вязкость газа. Из числа Рейнольдса определяем режим течения ( $Re < 2000$ , режим течения – ламинарный). Зная число  $Re$ , можно найти число Нуссельта  $Nu$ , а из него найти искомый коэффициент теплоотдачи. Зная коэффициент теплоотдачи и объемный расход газа, а также его температуру, можно рассчитать необходимую мощность и температуру стенок трубки:

$$Nu = 1.4 \left( Re \frac{d}{l} \right)^{0.4} Pr^{0.33},$$

$$\Phi = c_p G_v \Delta T,$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d},$$

$$T_{mp} = T_{cp} + \frac{\Phi}{\alpha S}.$$

Изготовленный прототип устройства изображен на рис. 5. Изображенное устройство не является конечным и сконструировано исключительно с целью проверки основных расчетных закономерностей. Данное устройство было опробовано на газовой среде и показало высокую точность термостатирования газового потока и хорошую воспроизводимость результатов измерения расхода. При практической реализации устройства в расчет принималось фактическое отклонение погрешности термостатирования в пределах заданного допуска, и была реализована *температурная компенсация* значения скорости потока. При компенсации производилось считывание текущего значения температуры газового потока, и вносилась линейная поправка на температуру в измеренное значение скорости. Следует заметить, что при отсутствии подобной компенсации даже при отклонениях температуры газового потока на 1К ошибка измерения скорости составляла 100%. Текущая ошибка измерения скорости не превышает 8%.

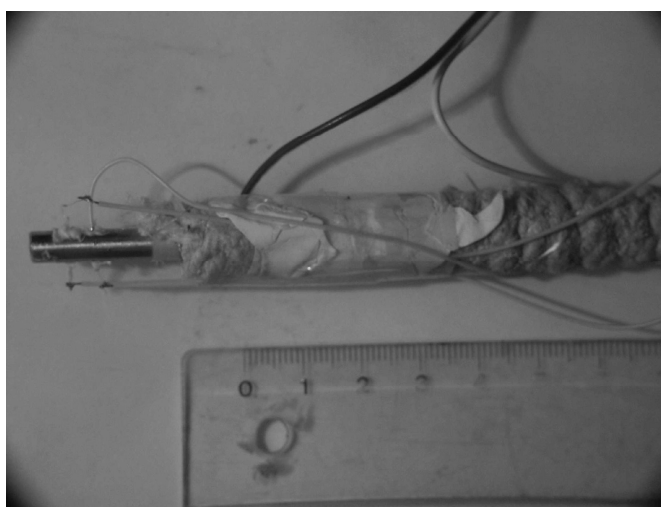


Рис. 5. Внешний вид макета устройства

В настоящей работе было проведено математическое и реальное моделирование устройства термостатирования проточного газа, проведены основные математические расчеты и практически реализован макет устройства, являющегося составной частью прибора-анализатора химического состава потока газа. В настоящее время проводятся дальнейшие испытания и проверяется работоспособность устройства в химически агрессивных средах.

### **Литература**

1. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003.
2. Дульнев Г.Н., Тарновский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971.
3. Корнев П.А., Шарков А.В. Исследование параметров подогревного термостата с двухпозиционным регулятором. // Учебно-технические разработки. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2001.

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.Н. Кокшаров, Н.В. Спасский

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич

Обзор посвящен рассмотрению состояния рынка упругих чувствительных элементов, основных направлений его развития.

## Введение

Упругие чувствительные элементы (УЧЭ) нашли применение в широком спектре деятельности человека. УЧЭ является неотъемлемой частью различного рода датчиков. УЧЭ используются в промышленных и автомобильных датчиках, датчиках охранной сигнализации, в измерительной аппаратуре, реле. В современных иностранных автомобилях, например, только датчиков на герконах используется от 10 до 40 штук. Особенности УЧЭ делают их незаменимыми в ряде областей техники. Герконовое реле и датчики по совокупности свойств и уровню цен превосходят полупроводниковые аналоги, которые еще десять лет назад занимали лидирующие позиции в приборостроении. В настоящее время в связи с развитием высоких технологий наблюдается обратный переход – от полупроводниковых устройств к устройствам на герконах. Прогресс в области микроэлектроники и материаловедения привел к созданию малогабаритных и дешевых микромеханических устройств, выполненных с использованием технологии микроэлектронной промышленности. Использование таких приборов для измерения параметров движения подвижных объектов ознаменовало революционные изменения в инерциальной технике [3].

## Классификация УЧЭ

Геометрическая форма УЧЭ разнообразна и зависит от их назначения и конструкции. Одинаковым требованиям могут удовлетворять УЧЭ разных форм, и, наоборот, УЧЭ одинаковой формы могут выполнять различные функции. Упругие элементы (УЭ) конструктивно различных форм по основным геометрическим признакам можно разделить на стержневые УЭ, изготавливаемые из проволоки или лент, и УЭ в виде пластин и оболочек, изготавливаемые из листового материала или трубок.

Мембраны, сильфоны, пружины широко применяются в различных электроконтактных устройствах, таких как контактная группа реле, скользящие контакты, упругие опоры и направляющие, а также в качестве подвесов высокочувствительных элементов измерительных приборов и др.[2].

К основным параметрам УЧЭ относят [6]: упругую характеристику, жесткость, чувствительность (величина, обратная жесткости), перестановочную силу, эффективную площадь, коэффициент запаса, прочностную надежность, метрологическую надежность, гистерезис.

Сравнительный анализ [8] показал, что герметизированные магнитоуправляемые контакты (герконы) по совокупности технических характеристик к настоящему времени остаются одними из перспективных элементов коммутационной техники – во многих случаях им практически нет альтернативы. Отметим существенные достоинства герконов:

- полностью герметизированный металлический контакт. Герконы могут работать в условиях повышенной влажности и запыленности, в среде активных жидкостей и газов, при изменении температур от  $-60$  до  $+150$  °С. Они практически не восприимчивы к воздействию радиации;
- полная гальваническая развязка цепей нагрузок и управления;



- малая мощность управления (50–200 мВт), низкое электрическое сопротивление (0,05–0,15 Ом), большой срок службы при высокой надежности (107–108 циклов переключений);
- высокая механическая устойчивость (удары до 500 г, вибрации в диапазоне частот до 3 кГц);
- доступность и удобство эксплуатации;
- сравнительно низкая цена изделий.

### **Современные тенденции в технологии изготовления упругих элементов.**

Технологии изготовления упругих элементов разнообразны и определяются конструкцией, назначением и материалом УЭ, а также техническими требованиями [1]. Прежде всего, отметим современный подход к расчету, разработке, построению УЧЭ, которым является, несомненно, этап проектирования при помощи персональных компьютеров (ПК). Именно ряд прикладных программ для ПК дают нам большие возможности в разработке, исследовании, в построении математических моделей и при описании колебательных процессов УЧЭ. Производство современных конструкций определяется технологиями изготовления данных изделий. Поэтому важной задачей производства на сегодняшний день является этап изготовления УЭ. Далее приведен ряд современных технологических процессов изготовления УЭ:

- технология прецизионного изготовления упругих элементов балочного типа методом электрохимико-механического полирования в деталях из труднообрабатываемых материалов;
- технология высокопрочного неразъемного соединения деталей из щелочных стекол с деталями из кремния в электростатическом поле высокого напряжения;
- технология прецизионной электроискровой обработки непрофилированным электродом – инструментом сложных закрытых профилей в деталях из труднообрабатываемых материалов;
- технология прецизионного размерного формообразования методом химического травления сложноконтурных сквозных пазов и упругих перемычек чувствительных элементов из кварцевого стекла;
- технология размерной обработки кремния для создания чувствительных элементов датчиков механических величин.

### **Рынок сегодня**

Общий объем продаж УЧЭ на мировом рынке составляет около 1 млрд. штук в год. Ежегодный рост потребности в них – не менее 10–15%. Рост объема продаж УЧЭ связан с увеличением производства изделий, изготавливаемых на их основе. В первую очередь это относится к реле и датчикам. Ведущими производителями УЧЭ на мировом рынке являются фирмы OKI (Япония), Hamlin (США), Standex (Великобритания), Philips, C.P. Clare, Fujitsu (Япония), Gunther (Германия), Aleph Nippon (Япония), РЗМКП (Россия).

Оценочная доля ОАО «Рязанский завод металлокерамических приборов» (РЗМКП) составляет порядка 10–12%. Продается 100–120 миллионов изделий, что не так мало в сравнении, например, с OKI, который обеспечивает около 18% мирового уровня поставок.

РЗМКП – один из крупнейших в мире производитель герконов. На начало 90-х годов завод выпускал примерно 25% от общего числа производимых в мире УЧЭ – герконов. На протяжении последних лет завод не растерял производственный потенциал. Произошло это в основном за счет сбыта УЧЭ на экспорт (до 85% производимых объе-

мов), а также за счет разработки и выпуска ряда датчиков на герконах для внутреннего рынка. Область интересов бизнеса РЗМКП находится в США, Китае, Юго-Восточной Азии, Европе. Это компании OKI (Япония), Hamlin (США), Standex (Великобритания), CP Clare. Если разбить мировой рынок УЧЭ на сегменты, то датчики составляют около 20%, охранная и пожарная сигнализация – 20%, телефония – 10% (здесь используются миниатюрные герконы), реле – 10%, оставшаяся часть – автомобильная электроника и игрушки (см. рис. 1.1). В частности, герконы РЗМКП используются в автомобилях фирмы «Опель».

Фирма ВАЗ использует УЧЭ производства РЗМКП в датчиках контроля уровня жидкости и уровня масла, а также в датчиках и системах блокировки ремней безопасности. Для этих применений к УЭ предъявляются жесточайшие требования по качеству, вплоть до инспектирования производства [7].

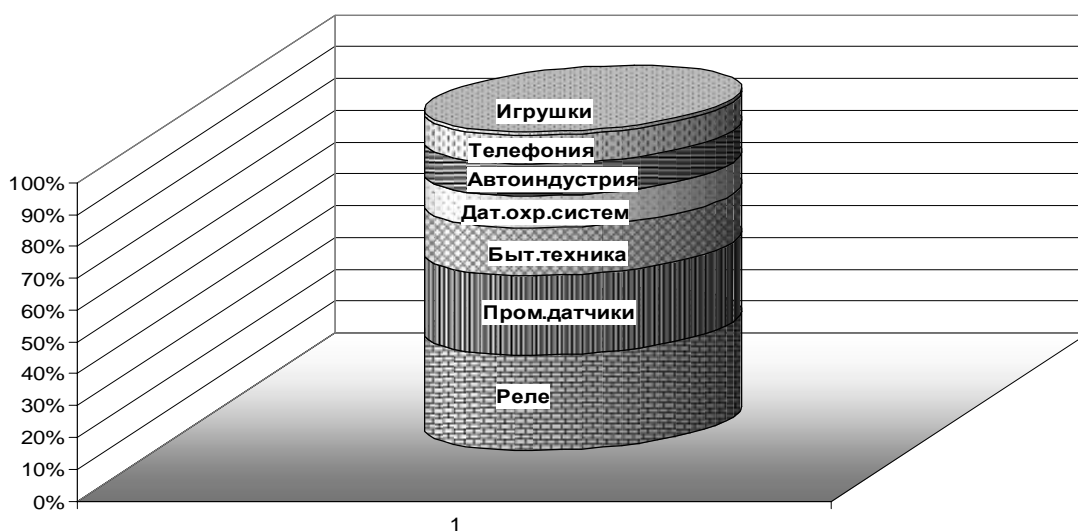


Рис. 1.1. Диаграмма распределения УЧЭ на мировом рынке потребления. С 2002...2005 гг. РЗМКП расширил производственные мощности завода до выпуска 1,5...2,2 млн. механизмов с УЧЭ в год (см. рис. 1.2)

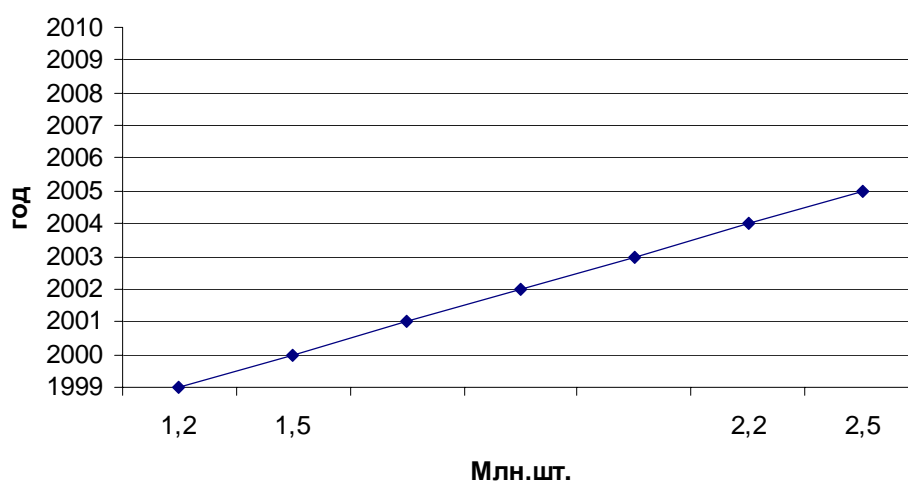


Рис. 1.2. График наращивания производства механизмов с УЧЭ РЗМКП

## Рынок завтра

Приоритетным направлением должно быть создание датчиков в плоских корпусах (высотой не более 5 мм), с повышенными предельными характеристиками, с низкой потребляемой мощностью (до 150 мВт), что позволяет осуществлять управление с по-

мощью микросхем [4]. Использование в таких приборах поляризованных магнитных систем, несмотря на жесткие ограничения по габаритам, обеспечивает более эффективное контактное нажатие. При этом расширяются функциональные возможности и повышается чувствительность реле как на замыкающих, так и на переключающих УЧЭ. Одной из актуальных задач современного приборостроения является создание УЧЭ для микросенсорной аппаратуры, сравнительно недорогой, помехозащищенной, с достаточно широким амплитудным и частотным диапазонами, с высоким быстродействием.

## Заключение

Обобщая, можно дать прогноз на развитие УЧЭ.

1. уменьшение размеров датчиков [5], переход к микромеханическим размерам (MEMS-технологии) и создание интегральных быстродействующих датчиков на магнитоуправляемых контактах (МК), таких как герконы, акселерометры, гироскопы;
2. уменьшение мощности, потребляемой на управление;
3. использование в качестве контактного слоя новых покрытий;
4. развитие новых высоконадежных элементов мембранных конструкций.

С целью повышения надежности, сокращения длительности приработки, замены дорогостоящих материалов на конструкционные элементы, сокращения трудоемкости изготовления деталей повышенной точности и долговечности на поверхности контакт-деталей магнитных контактов (МК) предлагается наносить регулярный микрорельеф (РМР). Наиболее совершенным методом образования РМР является метод вибрационного накатывания, предложенный профессором Ю.Г. Шнейдером.

В ртутных герконах смачивание контактирующих поверхностей контакт-деталей, исключаящее вибрацию при замыкании, осуществляется посредством их амальгирования ртутью или периодической подачей ртути на контактирующие поверхности [8].

Особый интерес может представлять абсолютно новый геркон – комбинация конструкций мембранного и ртутного геркона. Предлагается на поверхности мембран для мембранных герконов любого вида сначала наносить ртутную пленку путем амальгирования (центрифугирования), а затем осуществлять вибронакатку. В результате, кроме улучшения чувствительности (МДС срабатывания) и механических характеристик упругих элементов, таких как жесткость, упругость, равномерность прогиба, будет полностью ликвидировано вредное явление дребезга (вибрации) при коммутации МК.

Широкие функциональные возможности, надежность и высокое быстродействие таких герконов делают их весьма перспективными. В целях увеличения срока службы и эффективности функционирования исследуемых устройств автоматики на МК научнотехническим коллективом под руководством профессора В.Л. Ткалич осуществлена разработка ряда модификаций контактных систем герконов. Данные конструкции обладают улучшенными показателями надежности (сниженным уровнем дребезга, увеличенной вибростойкостью, отсутствием залипания, стабилизированным сопротивлением контактного перехода, сниженным уровнем динамических шумов, увеличенным сроком службы, качественным спаем баллона с КС).

Прогресс компьютерной техники сегодня задает определенный темп развития исследований во многих областях науки и поиск новых алгоритмов расчета, более точных, более приближенных к реальным условиям протекания процессов. Новые технологии позволяют сократить временные затраты, способствуют построению в кратчайшие сроки новых конструкций.

## Литература

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 455 с.
2. Вереина Л.И. Техническая механика. М.: Изд. центр «Академия»; ИРПО, 2000. 176 с.

3. Евстифеев М.И. Состояние разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов. – Навигация и управление движением. / Сборник докладов 2 научно-технической конференции молодых ученых, С-Петербург, 2000, с.54–71.
4. Карабанов С., Мазельс Р. Герконовое реле. Взгляд на перспективы развития направления. // Компоненты и технологии. 2001. №7. 54 с.
5. Мокров Е.А. Интегральные датчики. Состояние разработок и производства, направления развития, объемы рынка. // Компоненты и технологии. 2002. №1. 52 с.
6. Понамаре в С.Д. Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
7. Соснина А. Рязанский завод металлокерамических приборов: правильно выбранная стратегия на рынке. // Компоненты и технологии. 2003. №7. 52 с.
8. Ткалич В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 102 с.

# ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТА ОБРАБОТКИ ПАРТИЙ ДЕТАЛЕЙ В САПР ТП

Е.Г. Чернокнижная

Научный руководитель – д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин

Описывается постановка задачи формирования маршрута путем составления диспетчерского графика обработки деталей в САПР технологических процессов гальванического производства. Предлагаются формализованный подход и основные зависимости для построения алгоритмической структуры. Рассматривается вариативность решений.

## Введение

Современная САПР технологических процессов на предприятиях машино- и приборостроения должна решать широкий спектр технологических задач, объединенных в единый комплекс. Это объединение предусматривает взаимосвязь задач как внутри самой САПР ТП, так и со смежными ей системами – АСУ ТП, АСУП, а также с системой сопровождения жизненного цикла изделия [1].

Одной из функций САПР ТП является формирование маршрута обработки деталей. Особенностью проектирования маршрута в гальваническом цехе является то, что различные детали могут обрабатываться по одинаковому маршруту, соответствующему так называемой «технологической программе» (ТПр). Гальваническое производство может быть «ручным» или «автоматизированным» – основанном на применении гальванических автооператорных линий (гальваноавтоматов). Для участков с ручным обслуживанием гальванических ванн составлять точный график транспортирования деталей между позициями не имеет смысла – здесь результат все равно определится квалификацией рабочего. Но на гальваноавтоматах составление точного графика (в смысле времени обработки в ваннах и последовательности переноса партии деталей различными автооператорами) не только определяет строгое выполнение технологии (а значит, и качественный результат), но и оптимизирует загрузку оборудования. В известных САПР ТП [2] маршрут обработки деталей и управляющие программы для станков составляются для процессов механообработки. Для гальванических процессов ограничиваются составлением технологических карт, режимов работы гальванических ванн, нормированием процессов и т.п. В условиях интеграции с АСУ ТП формирование оптимизированного маршрута движения деталей является, безусловно, актуальной задачей.

Многопроцессный гальваноавтомат представляет собой совокупность отдельных ванн обработки деталей, каждая из которых предназначена для реализации отдельной операции, а в целом – для реализации нескольких ТПр. Расстояния между центрами соседних ванн есть величина, постоянная для гальваноавтомата. Эффект каждой операции заключается в суммировании результата воздействия на материал изделия, которое имело место в данной операции, с результатом воздействия в предыдущих операциях. Технологическая программа задает последовательность обработки деталей на ваннах, а также время выдержки с учетом допусков. При этом на некоторых ваннах детали могут обрабатываться несколько раз.

Каждая ТПр включает следующие группы основных операций: подготовка поверхности перед нанесением покрытий; нанесение металлических неорганических покрытий; дополнительная обработка покрытий; вспомогательная обработка.

Сходство отдельных групп операций в различных ТПр дает возможность компоновать многопроцессные гальваноавтоматы, на которых можно выполнять несколько десятков ТПр. Для повышения производительности по наиболее актуальным ТПр в состав гальваноавтоматата включают однотипные позиции, так называемые ванны-дубли.

Технологический процесс обработки деталей на отдельной позиции гальваноавтомата является непрерывным, т.е., начав обработку приспособления с деталями в одной ванне, нельзя прерывать её до полного завершения. Это же справедливо и для процесса переноса деталей автооператором (АО) от ванны к ванне. Однако занятость во времени основного технологического оборудования (ванн обработки и АО) непостоянна, причем периоды занятости и свободы в общем случае предсказать заранее нельзя. Чередувание во времени периодов занятости с периодами свободы позволяет характеризовать режим работы основного оборудования на многопроцессном гальваноавтомате, а также ТПр гальванической обработки деталей в целом, как непрерывно-дискретный. При формальном рассмотрении данной задачи применим подход, используемый в теории расписаний [3].

Приспособления, на которых детали поступают на обработку, могут быть различными – барабаны, подвески. Они находятся на катодных штангах, вместе с которыми АО транспортирует детали в соответствии с ТПр от ванны к ванне. В дальнейшем приспособление с деталями, поступившее на вход гальваноавтомата, будем называть требованием, а сам процесс обработки – обслуживанием.

Входной поток является случайным, поэтому на гальваноавтомате могут возникать такие возмущения, как занятость АО и ванн обработки. Образуется очередь требований к определенным видам оборудования. Но, поскольку процесс гальванической обработки на гальваноавтомате исключает межоперационное пролеживание, так как оно приводит к браку, вся очередь располагается перед входом на гальваноавтомат. Если начинать обслуживание в момент времени, когда все оборудование, необходимое данному требованию, свободно, время обслуживания очереди станет недопустимо большим, а коэффициент загрузки оборудования – низким. Отсюда возникает задача упорядочения входного потока требований или задача составления диспетчерского графика обработки деталей на гальваноавтомате.

### Модель диспетчерской подстройки

В соответствии с содержательным описанием объекта, совокупность технологических программ многопроцессного гальваноавтомата представим множеством  $T$ , элемент которого  $T_i$  представляет собой последовательность времен обслуживания  $i$ -го требования на нужных позициях и соответствующих времен допуска:

$$T_i = (t_{i1}, \Delta_{i1}, \dots, t_{ij}, \Delta_{ij}), \quad (1)$$

где  $t_{ij}$  – время обслуживания  $i$ -го требования на  $j$ -й позиции,  $\Delta_{ij}$  – допуск на время обслуживания.

Время транспортирования требований может быть рассчитано, исходя из известных расстояний между позициями и скоростей перемещения АО. Практически удобнее предварительно измерить эти времена и свести их в симметричную матрицу, элемент которой  $\delta_{jm}$  выражает время перемещения АО от позиции  $j$  к позиции  $m$ .

Рассмотрим ТПр обслуживания двух требований (рис.1). Введем величины:

$$\begin{aligned} a_{i1} &= \delta_{i1}, \\ a_{ij} &= a_{ij-1} + t_{ij-1} + \delta_{ij}, \\ b_{im} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$b_{ij} = b_{i+1} + t_{ij+1} + \delta_{ij+1}.$$

Суммарное время обслуживания  $i$ -го требования равно

$$T_i = \frac{\sum_j (t_{ij} + \delta_{ij})}{j}. \quad (3)$$

Чтобы требование  $T_2$  обслуживалось непосредственно за  $T_1$ , необходимо, чтобы общая длина сдвига составила:

$$\Theta_{1,2} = \frac{\min(b_{1j} + a_{2j})}{j}. \quad (4)$$

Анализ позволяет сделать вывод, что подстройку требований только по ТПр делать нельзя. Главным является наличие и время освобождения необходимого оборудования. Тогда формула (2) примет вид

$$\Theta_i = \frac{\min(b_j + a_{ij})}{j}, \quad (5)$$

где величина  $b_j$  не ставится в соответствие какой-то конкретной ТПр, а «привязывается» к обслуживающим АО, Индекс « $i$ » принадлежит подстраиваемой ТПр.

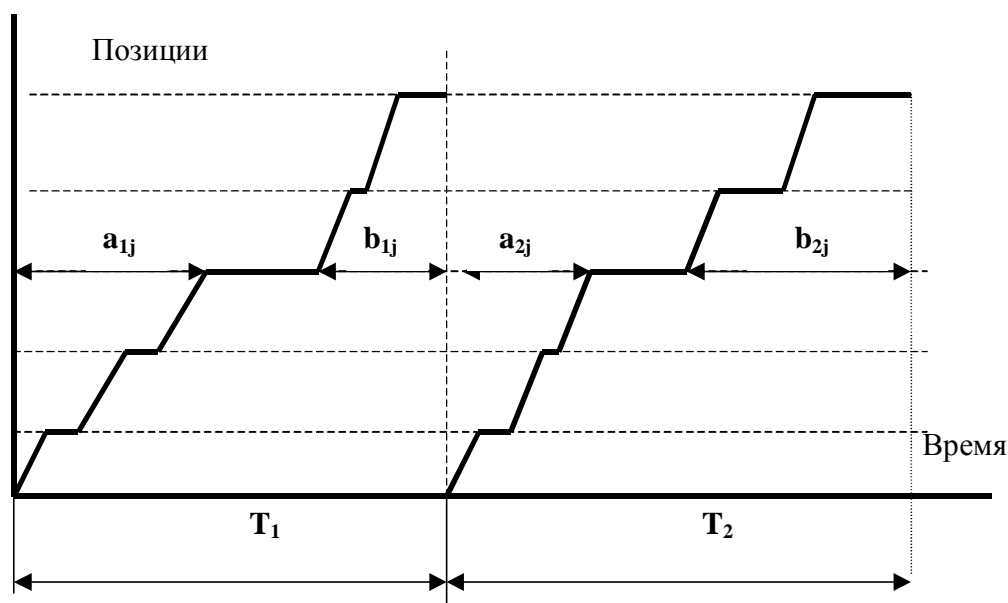


Рис. 1. Две технологические программы до подстройки

При подстройке очередного требования к работающей линии возможны следующие варианты:

1. последовательности ТПр полностью совпадают (простая подстыковка),
2. последовательности не совпадают (возможна стыковка с переплетением).

При найденном по позициям сдвиге может оказаться, что отрезки занятости какого-либо из АО в подстраиваемой ТПр, накладываются на временной оси на отрезки в реализуемой ТПр. Корректировку по АО можно произвести путем сдвига вправо по временной оси. Информацию для корректировки должна давать таблица ресурсов  $R$ , в которой содержатся времена начала и окончания всех отрезков занятости по всем трем АО. Информация в таблице обновляется после подстройки очередного требования. Возможны пять случаев:

$$t_i^r \geq t_s^r + \delta_w, \quad t_i^r \leq t_{s+1}^r - \delta_w, \quad (6a)$$

$$t_i^r \geq t_s^r, \quad t_i^r \leq t_s^r, \quad (6б)$$

$$t_s^r < t_i^r < t_s^r + \delta_w, \quad t_i^r < t_{s+1}^r - \delta_w, \quad (6в)$$

$$t_{s+1}^r > t_i^r > t_{s+1}^r - \delta_w, \quad (6г)$$

$$t_i^r < t_s^r + \delta_w, \quad t_i^r > t_{s+1}^r - \delta_w, \quad (6д)$$

где  $t_i^r$  и  $t_i^r$  – время начала и окончания транспортирования  $r$ -м АО подстраиваемого требования  $i$ ; соответственно,  $t_s^r$  ( $t_{s+1}^r$ ) и  $t_s^r$  ( $t_{s+1}^r$ ), соответственно, время начала и окон-

чания отрезка  $s$  или  $(s+1)$  для  $r$ -го АО в существующем процессе ( $s=1 \div S$ ,  $r=1 \div R$ ),  $\delta_w$  – время возврата АО с позиции, на которой он закончил предыдущую операцию, на требуемую позицию. Значения  $\delta_w$  различны и выбираются в зависимости от местонахождения АО.

Из соотношений (б) видно, что только а) является случаем нормальной подстройки. Остальные требуют корректировки. Корректировка проводится в условиях следующих ограничений:

- составленная часть графика не корректируется;
- величины  $\delta_w$  известны для всех АО и не могут быть изменены.

Очевидно, что в случаях (бв) и (бг) возможна корректировка за счет времени  $\Delta t_{ij}$ , а в случаях (бб) и (бд) возможен только сдвиг подстраиваемой ТПр вправо по временной оси.

## Заключение

Предложенная формализация процесса составления диспетчерского графика является универсальной в смысле применимости к гальваническому автомату с любым количеством ванн и автооператоров и используется при разработке алгоритмического и программного обеспечения рассматриваемой подсистемы САПР ТП, а также подсистемы управления движением АСУТП.

## Литература

1. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 320с.
2. Андриченко А. КОМПАС-Автопроект 9.0 — инструментальные средства САПР технологических процессов. // САПР и графика. 2001. №12. 2001. С.22–23.
3. Семенов А.И., Португал В.М. Задачи теории расписаний в календарном планировании мелкосерийного производства. М: Наука,1982. 183с.



# ЛАЗЕРНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ – СРЕДСТВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

А.В. Ефименко, Ю.С. Монахов

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

Статья посвящена рассмотрению средств реализации биологической обратной связи для сканирующих лазерных медицинских установок. Подробно рассмотрены механизмы реализации указанных схем на базе контроля пульса и артериального давления. Также рассмотрены возможности построения обратных связей используя оптическую когерентную томографию.

Находящиеся сегодня на отечественном рынке установки, осуществляющие процедуру лазеротерапии, в своем большинстве не имеют технических средств для контроля за проведением процедуры облучения. Их режим работы основан на некоторых эмпирических данных, заложенных производителем или вводимых врачом, проводящим процедуру. Такой подход имеет очевидные недостатки, ведь он не учитывает индивидуальные особенности каждого пациента. Эффективность воздействия в таком режиме зависит от опыта, и в некоторой мере, от интуиции врача-оператора, задающего параметры работы установки.

Это можно пояснить на таком примере – до сих пор рекомендуемые параметры плотности мощности излучения в разных руководствах отличаются в сотни раз и более (от 0,5 до 200 мВт/см<sup>2</sup>), а рекомендуемые дозы варьируют от 0,1 до 120 Дж/см<sup>2</sup>. Анализируя сложившиеся представления об оптимальных параметрах лазерной терапии и параметры выпускаемых разными фирмами лазеров, некоторые авторы пришли к выводу, что «в медицинской практике по существу используется неконтролируемое воздействие лазерного излучения на пациента».

Отсюда встает вопрос о необходимости разработки технических систем для реализации обратных связей от пациента к установке, называемых биологическими обратными связями (БОС).

Проведенные разработки совместно с учеными из ОрелГТУ по исследованию механизмов взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ) с тканями человека на основе изучения схем поглощения, отражения и преломления (НИЛИ) показали возможность построения систем БОС на основе учета пульса и артериального давления [1–4].

В основе терапевтического эффекта – сложного биомеханизма взаимодействия низкоэнергетического электромагнитного излучения с живым организмом лежат фотофизические и фотохимические реакции, связанные с резонансным поглощением энергии излучения биотканью, а также с восприятием энергии излучения и переносом эффекта воздействия жидкими средами организма на нескольких уровнях воздействия. Характер и уровни этих взаимодействий зависят как от спектра излучения, так и от спектральных характеристик биотканей.

В прямых экспериментах на тканевом уровне доказано, что фазы усиления энергетики клеток совпадают с увеличением кровенаполнения ткани. Следовательно, благоприятные моменты лазерного терапевтического воздействия должны приходиться на фазы систолы и вдоха самого больного. Технически это оказалось возможным реализовать в автоматическом режиме биоуправления сигналами с датчиков пульса и дыхания, расположенных на теле пациента. При расположении датчика на меньшем расстоянии от сердца, чем область облучения (патологии) вводится задержка с учетом скорости распространения пульсовой волны. Таким образом относительно рекомендуемого уровня интенсивности (мощности) лазерного воздействия во время выдоха и во время диастолы уровень интенсивности (мощности) синхронно снижается. Этим достигается устранение относительно сильных воздействий в неблагоприятные моменты, когда из-за уменьшения энергетического обеспечения возможны

пессимальные и парабактериальные реакции клеток. Наоборот, в моменты увеличения кровенаполнения, увеличения транспорта энергетических метаболитов и диффузии кислорода в клетки уровень лазерного воздействия достигает рекомендуемого (методикой, утвержденной Минздравом) уровня. Благодаря такой синхронизации изменений интенсивности лазерного воздействия и изменений кровенаполнения ткани резко расширяется диапазон положительных реакций клеток, увеличивается их чувствительность и уменьшается вероятность передозировки лазерного воздействия. Сигналы датчиков пульса (оптическая пара светодиод-фотодиод в виде прищепки на палец) и дыхания (термосопротивления возле носа реагируют на изменение температуры при дыхании) в автоматическом режиме синхронно изменяют в ритмах кровотока интенсивность лазерного излучения.

Обычная глубина амплитудной модуляции суммарного сигнала с датчика пульса и с датчика дыхания составляет 30 %. Однако при определенных видах патологии и локализации патологического очага, когда известно о преимущественном ослаблении микроциркуляции в венозной или в артериальной части капиллярного русла, нарушениях функции преимущественно артериол или венул, соотношение глубин модуляции изменяется в соответствующую сторону.

Термин «биоуправление» используется разными авторами для совершенно разных случаев использования обратных связей и сигналов от биологического объекта. Все предложенные методы используют известные из теории автоматического управления способы регуляции по отклонению или регуляции по возмущению, имея целью стабилизировать или удержать в нужном диапазоне регулируемые по обратной связи те или иные параметры биообъекта. Так, например, обеспечивается изменение тока стимуляции биологически активной точки в зависимости от каких либо ее характеристик (электропроводности, тонуса ткани и др.), нагрузки на организм в зависимости от изменения частоты пульса и т.д. В случае лазерной терапии решается принципиально новая задача синхронизации воздействия с усилением кровенаполнения ткани, что равноценно внутренним многочастотным контурам управления естественных регуляторных систем организма. Согласование путем перестройки местного кровотока в области патологии с центральным кровотоком усиливает взаимосвязь и интегральную целостность всего организма. Решается задача не увеличения стабильности отдельной подсистемы, а усиления взаимозависимости и интеграции центра и периферии за счет искусственной внешней связи. Попытки некоторых авторов использовать лишь отдельные составляющие такого биоуправления, например, использовать сигналы для модуляции лазерного и иного воздействия только с датчика пульса или только с датчика дыхания в принципе противоречат идеи такого биоуправления. Использование только сигналов датчика пульса или только сигналов датчика дыхания больного может усугубить разбаланс артериального притока и венозного возврата крови в капиллярном русле органа и ткани в месте патологии и затруднить лечение.

Приведенные выше методы контроля проведения процедуры лазеротерапии оказались довольно сложными и недостаточно объективными.

В качестве информационного канала для контроля за состоянием пациента предлагается использование оптической когерентной томографии, позволяющей получать информацию и оценивать состояние тканей человека, подвергающихся воздействию лазерного излучения [5].

Сама оптическая когерентная томография (ОКТ) появилась относительно недавно, примерно 15 – 20 лет назад. В последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в этой области, обеспечивающей разрешение до единиц микрометров при восстановлении томографических изображений. Технология ОКТ успешно используется для

клинической медицинской диагностики состояния кожных покровов человека, в кардиологии, зубоврачебной медицине и некоторых других областях медицины.

Принцип ОКТ состоит в освещении объекта оптическим излучением с определением степени отражения излучения по глубине среды от каждого отдельного слоя. С технической точки зрения, основной частью ОКТ является двухлучевой интерферометр, освещаемый источником излучения с широким спектром. В интерферометре излучение разделяется на измерительную волну, освещающую объект, и опорную волну, оптическая длина пути которой может изменяться при управляемом перемещении опорного отражателя.

При формировании трехмерных изображений внутренней структуры среды необходимо учитывать характеристики оптической системы: особенности фокусировки пучка, сканирования, регистрации отраженного излучения и др.

В заключение хочется еще раз отметить, что оптическая когерентная томография является довольно молодым и, вместе с тем, достаточно перспективным направлением развития техники, особенно медицинской, поэтому исследования в области практического применения этого направления кажутся весьма оправданными.

## Литература

1. Евстигнеев А.Р., Дунаев А.В. Медицинские лазерные устройства. Учебное пособие // Орел: ОрелГТУ, 2005. –122с.
2. Шалобаев Е.В., Подмастерьев К.В., Корндорф С.Ф., Монахов Ю.С., Дунаев А.В., Ефименко А.В. Лазерная медицинская техника // Сборник трудов Конференции «Оптика и образование – 2004» / Под общей редакцией А.А.Шехонина. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004.–С.85.
3. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Юркова Г.Н., Ефименко В.Т., Ефименко А.В., Корндорф С.Ф., Дунаев А.В. Проблемы создания биологических обратных связей и их применение в сканирующих лазерных медицинских установках // Известия ОрелГТУ. Машиностроение, приборостроение, 2003. Выпуск 4. –С.93–97.
4. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Леонтьева Н.В., Ефименко А.В. Некоторые аспекты разработки медицинского сканирующего лазерного стимулятора для проведения физиотерапевтических процедур // Труды Четвертой международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека» – СПб.: ГУ ИТМО, 2004. – С. 111–115.
5. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы, перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики / СПб.: ГУИТМО, 2004. – С.6–30.

# КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Е.А. Воронцов

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

В данной работе приводится общая классификация геодезических приборов, а также представлена классификация геодезических приборов различного функционального назначения.

## Введение

Общие признаки классификации геодезических приборов установлены ГОСТ 23543-97 «Геодезические приборы. Общие технические требования». В основу классификации указанного стандарта положены следующие признаки:

- функциональное назначение;
- область применения;
- физическая природа носителей информации;
- конструктивные особенности;
- точность;

Общая классификация геодезических приборов приведена на рис.1.

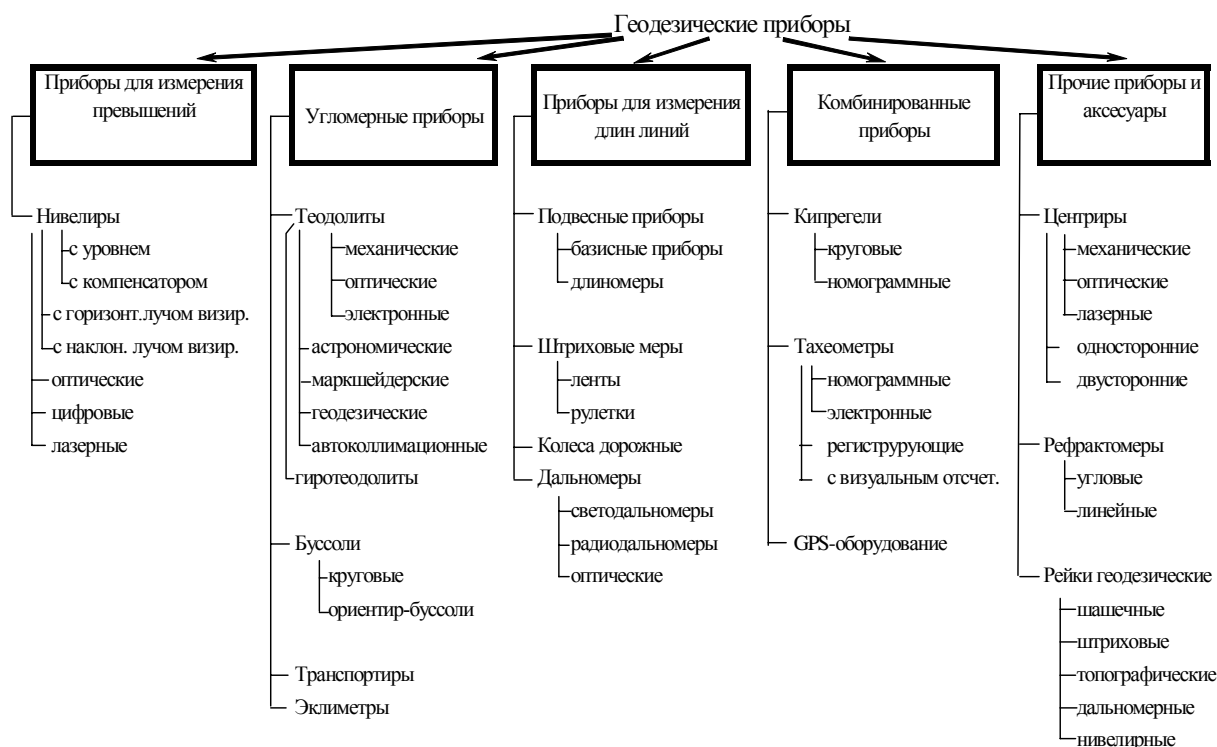


Рис.1. Классификация геодезических приборов

## Нивелиры

Нивелир – геодезический высотомер для определения превышений горизонтальной линией визирования. Нивелиры изготавливаются в соответствии с ГОСТ 10528-88 «Нивелиры. Общие технические условия»

В обозначении нивелира с компенсатором после цифры добавляется буква К. В настоящее время уделяется большое внимание классификации компенсаторов. Компенсаторы делятся на группы в зависимости от чувствительного элемента, его расположения, вида подвески, типа демпфера, по типу чувствительного элемента. В табл.1 приведена классификация оптических нивелиров.

| Точность измерений | Ср. кв. ошибок мм/км | Увеличение зрительной трубы | Конструктивное исполнение | Характеристики компенсатора             |                                     |   |                    |          |
|--------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|---|--------------------|----------|
|                    |                      |                             |                           | место расположения в оптической системе | тип чувствительного элемента        | вид подвески                              | демпфер            | диапазон |
| высокоточные       | 0,5                  | от 30х                      | с уровнем при трубе       |   |                                     |   |                    |          |
|                    |                      |                             | с компенсатором           | сходящийся ход                          | маятниковые, жидкостные, оптические | на нитях, на плоской пружине, на магнитах | воздушн. магнитный | ±10'     |
|                    |                      |                             |                           | параллельный ход                        |                                     |   |                    |          |
| точные             | 1,5                  | до 30х                      | с уровнем при трубе       |   |                                     |   |                    |          |
|                    |                      |                             | с компенсатором           | _____”_____                             |                                     |   |                    | ±15'     |
| технические        | от 1,5               | до 30х                      | с уровнем при трубе       |   |                                     |   |                    |          |
|                    |                      |                             | с компенсатором           | _____”_____                             |                                     |   |                    | ±15'     |

Таблица 1. Классификация оптических нивелиров

### Теодолиты

Теодолит – геодезический прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов. Теодолиты выпускаются в соответствии с ГОСТ 10529-88.

По функциональному назначению теодолиты относятся к угломерным приборам широкого диапазона точности (см. табл. 2).

Оптические и электронные теодолиты снабжаются компенсаторами при вертикальном круге взамен цилиндрического уровня.

По конструкции оптической системы зрительной трубы различают теодолиты с прямым (земным) и обратным (астрономическим) изображением.

### Дальномеры

Электромагнитные дальномеры в настоящее время заняли ведущее место в геодезии при измерении длин линий. Среди них различают приборы двух основных видов:

- светодальномеры;
- радиодальномеры.

Наибольшее распространение получили светодальномеры. Современные светодальномеры широко используются для измерения сторон геодезических построений различных классов и точности, для изучения деформации сооружений, при выполнении изыскательских и проектно-планировочных работ.

В радиодальномерах заложен принцип измерения расстояний посредством измерения времени распространения электромагнитных волн радиодиапазона. Отличительная особенность радиодальномера по сравнению со светодальномерами состоит в том, что на другом конце измеряемой линии устанавливается не отражатель, а ретранслятор. Основная станция называется ведущей, а ретранслятор – ведомой станцией.

| По области применения | По физической природе носителя информации | Точность измерений | Ср. кв. ошиб      | Зрительная труба |             | Наличие компенсатора | Компенсатор                  |                      |                  |
|-----------------------|---|--------------------|-------------------|------------------|-------------|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------|
|                       |   |                    |                   | увеличение       | изображение |                      | тип чувствительного элемента | тип демпфера         | диапазон работы  |
| геодезические         | астрономические                           | высокоточные       | до 1,5"           | от 30х           | прямое      | -                    | -                            |                      |                  |
|                       |   |                    |                   |                  |             | +                    | маятниковые                  | воздушн.<br>магнитн. | от ±3'<br>до ±6' |
| маркшейдерские        | оптические                                | точные             | от 1,5"<br>до 10" | до 30х           | обратное    | -                    | -                            |                      |                  |
|                       |   |                    |                   |                  |             | +                    | маятниковые                  | воздушн.<br>магнитн. | от ±3'<br>до ±6' |
| гироскопические       | электронные                               | технические        | от 10"            | до 30х           |             | -                    | -                            | -                    | -                |
| автоклиматические     |   |                    |                   |                  |             |                      |                              |                      |                  |

Таблица 2. Классификация теодолитов

### Тахеометры

Тахеометр – геодезический прибор, предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных углов, длин линий и превышений.

| Точность измерения углов | Ср. кв. ошиб. | Увеличение зрительной трубы | Компенсатор           |                  | Диапазон измеряемых расстояний |               | Точность измерения расстояния                 | Диапазон рабочих температур |
|--------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|---------------|---|-----------------------------|
|                          |               |                             | Тип                   | Диапазон         | без отражателя                 | с отражателем |   |                             |
| высокоточные             | до 1,5"       | от 30х                      | жидкостной двухосевой | от ±3'<br>до ±8' | до 500 м                       | до 5000 м     | от ±2<br>до ±5 мм<br>(с учетом атм. поправки) | зависит от модели           |
| точные                   | до 10"        | до 30х                      | жидкостной двухосевой |                  |                                |               |   |                             |
|                          |               |                             | жидкостной одноосевой |                  |                                |               |   |                             |
| технические              | от 10"        | до 30х                      | жидкостной двухосевой |                  |                                |               |   |                             |
|                          |               |                             | жидкостной одноосевой |                  |                                |               |   |                             |

Таблица 3. Классификация тахеометров

Развитие оптико-механических тахеометров, кодовых теодолитов и электронных дальномеров привело к созданию электронных тахеометров с целью повышения автоматизации линейно-угловых измерений и топографических съемок. Конструктивно они сочетают кодовый теодолит с электронным дальномером. Эта группа обеспечивает цифровую индикацию измеряемых величин: горизонтальных и вертикальных углов, наклонных расстояний, горизонтальных расстояний, превышений, отметок и автоматическую регистрацию результатов измерений на различные виды носителей информации. Классификация современных тахеометров приводится в табл.3.

### Приборы механического типа для измерения длин линий

Для измерения длин линий широко применяются разнообразные средства механического типа. Они классифицируются на два основных вида:

- подвесные средства,
- непосредственного откладывания длин на местности.

К механическим приборам для измерения длин линий относятся штриховые ленты, рулетки и подвесные проволоки. Измерительные ленты и рулетки изготавливаются из различных материалов (стали, полимеров и др.), подвесные проволоки – из стали или инвара. Измерительные ленты и рулетки широко применяются для измерения длин линий при выполнении топографических работ, инженерно-геодезических изысканий, при выполнении геодезических работ на строительных площадках. Подвесные проволоки, входящие в комплект длинномеров и базисных приборов, используются для точных и высокоточных измерений сторон полигонометрии или базисов государственной геодезической сети.

### Геодезические приборы вертикального проектирования

К приборам вертикального проектирования относятся геодезические центриры, предназначенные для проектирования точек одной поверхности на другую либо изменения планового смещения точек относительно друг друга. В прикладной геодезии геодезические центриры находят применение при строительстве зданий и сооружений, при монтаже крупногабаритных машин и оборудования, при изучении деформации сооружений. В топографо-геодезическом производстве центриры используют в основном для центрирования геодезических приборов и визирных целей над опорными точками или под ними.

| Принцип                                 | Точность стабилизации визирной оси |          | Визирование                    | Увеличение зрительной трубы | Способ стабилизации      |
|---|------------------------------------|----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| механические*<br>оптические<br>лазерные | высокоточные                       | 1,5"     | одностороннее,<br>двустороннее | 30-40 <sup>x</sup>          | компенсатор<br>с уровнем |
|   | точные                             | 1.5"-10" |                                | 10-25 <sup>x</sup>          | компенсатор<br>с уровнем |
|   | технические                        | от 10"   |                                | 2-5 <sup>x</sup>            | с уровнем                |

\* отвесная линия задается механическим элементом

Таблица 4. Классификация оптических центриров

### Лазерные геодезические приборы

Создание лазерных геодезических приборов – новое, быстро развивающееся направление геодезического приборостроения, которое стимулируется высокой эффективностью их использования в строительстве. Большинство лазерных геодезических

приборов создано на базе уже существующих геодезических приборов. Поэтому их по аналогии называют:

- лазерные нивелиры;
- лазерные визиры;
- лазерные приборы вертикального проектирования – лазерные центриры;
- лазерные дальномеры.

В настоящее время существует следующая классификация лазерных приборов:

- лазерные нивелиры:
  - с уровнем (с уровнем при зрительной трубе);
  - с самоустанавливающимся лазерным пучком (с компенсатором);
  - с вращающимся лазерным пучком (ротационные);
- лазерные приборы вертикального проектирования (центриры):
  - с уровнем;
  - с самоустанавливающимся лазерным пучком (с компенсатором);
- лазерные дальномеры.

### **Приборы поиска подземных коммуникаций**

В настоящее время при детальных крупномасштабных топографических съемках городов и особенно съемках исполнительных планов промышленных предприятий широко используются для отыскания и съемки подземных металлических трубопроводов и различного вида кабелей (электрокабелей, кабелей КИП, кабелей связи и сигнализации) специальные электронные приборы.

### **Спутниковое навигационное оборудование (GPS)**

В настоящее время для решения многих геодезических задач применяется спутниковое навигационное оборудование, в частности GPS-оборудование. Данный вид приборов позволяет с высокой точностью производить необходимые измерения и с высокой скоростью обрабатывать большой объем информации.

### **Литература**

1. ГОСТ 23543-88\* «Геодезические приборы. Общие технические требования».
2. Захаров А.И. Геодезические приборы: Справочник. М.: Недра, 1989. 314 с.
3. Литвинов Б.А., Лобачев В.М., Воронков Н.Н. Геодезическое инструментоведение. М.: Недра, 1971, с.328.
4. Спиридонов А.И., Кулагин Ю.Н., Крюков Г.С. Справочник – каталог геодезических приборов. М.: Недра, 1984. 238 с.
5. Справочное пособие для работников метрологической службы в топографо-геодезическом производстве. М.: ЦНИИГАиК, 1991. 190 с.



# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ И МИКРОСЕНСОРОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Н.Н. Валентик, В.А. Климанов, Н.В. Когай  
Научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич

Математическое моделирование, описывающее реальные условия эксплуатации сильфонных упругих элементов (СУЭ) в системах управления, позволит сократить объемы дорогостоящих испытаний подобных элементов на стадии их проектирования. В настоящей работе рассматриваются математические модели колебательных систем упругих чувствительных элементов (УЧЭ) для исследования их частотных спектров.

## Введение

Характеристики систем управления в значительной степени определяются первичными измерительными приборами, формирующими сигналы обратной связи. Тонкостенные упругие чувствительные элементы – сильфоны, воспринимающие измеряемую величину, являются одними из элементов таких первичных датчиков систем автоматического управления. Как правило, датчики на основе сильфонов преобразуют механическую величину деформации сильфона в электрическую.

Рост требований к датчикам, в первую очередь к их метрологическим характеристикам и показателям надежности, делает актуальной проблему повышения качества СУЭ. Снижение материалоемкости конструкции, обеспечение заданного ресурса работы, необходимых параметров надежности и точности являются важнейшими условиями для вновь разрабатываемых элементов автоматизированных систем управления. Эти требования обусловили развитие расчетных и экспериментальных методов, которые легли в основу общей методологии проектирования новых типов датчиков.

## I. Математическая модель расчета сильфона при кривошипно-шатунном механизме возбуждения колебательного контура

Рассмотрим математическую модель расчета УЧЭ при кривошипном механизме возбуждения колебательного контура. На рис. 1,а, представлена кинематическая схема возбуждения колебательного контура однофазного сильфона кривошипным механизмом, создающим при достаточной длине шатуна гармоническое движение конца последнего:

$$x_B = r \sin \omega t. \quad (1)$$

Будем считать характеристику привода жесткой ( $\omega = \text{const}$ ). Пусть внутренние сопротивления возбудителя создается пружиной жесткости  $c_B$  и трением в направляющих  $k_B$ . Тогда характеристика возбудителя будет выражена как

$$x = x_B - \frac{1}{c_B} P \quad (2)$$

или в скоростях как

$$v = v_B - \frac{i\omega}{c_B} P. \quad (3)$$

Усилие на возбудителе  $P_B = x_B \zeta$  зависит от общей внутренней и внешней жесткости:

$$\zeta = k_B i \omega + \frac{c_B (c - m\omega^2 + ki\omega)}{c + c_B - m\omega^2 + ki\omega} \quad (4)$$

или, при внешнем сопротивлении  $\zeta_0$ :

$$\zeta = k_B i \omega + \frac{c_B \zeta_0}{c_B + \zeta} . \quad (5)$$

На внешнюю систему передается нагрузка

$$P_0 = x_B \frac{c_B \zeta}{c_B + \zeta} . \quad (6)$$

Характеристика системы (без учета  $k_B$ ):

$$P_0 = P_B - c_B x_0 . \quad (7)$$

При малых  $c_B$  и  $x_B$ , достаточных, однако, для возбуждения необходимой  $P_0$  на жесткости  $\zeta_0$ , система приобретает характер «мягкого» возбудителя [1].

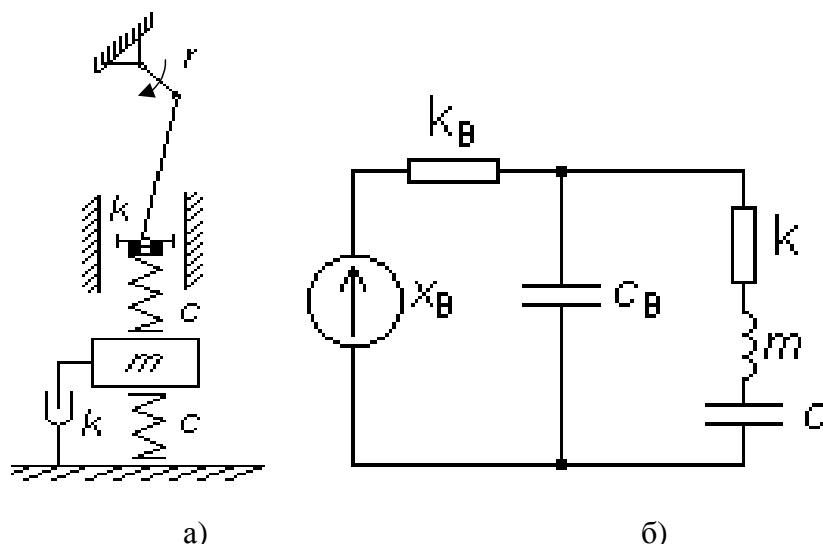


Рис. 1. Электромеханическая модель колебательной системы однофрового сильфонного УЧЭ при кривошипно-шатунном возбуждении: а) механическая модель, б) электрическая модель

На рис.1.б показана динамическая модель колебательной системы однофрового сильфонного УЧЭ. Фактически мы имеем параллельный  $RC$ -контур. Практический интерес представляет амплитудно-частотная характеристика. Соответствующая комплексная передаточная функция имеет вид:

$$H(j\omega) = \frac{R}{1 + j\omega CR} , \quad (8)$$

а амплитудно-частотная характеристика –

$$|H(j\omega)| = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} . \quad (9)$$

Для кривошипного возбудителя внутреннее сопротивление носит инерционный характер. При увеличении этого сопротивления и стремлении к бесконечности схема по структуре приближается к идеально жесткому возбуждению.

Предлагаемый подход к решению задачи расчета параметров сильфонов дает возможность осуществить автоматизированный расчет требуемых динамических характеристик [2].

## II. Математическая модель расчета сильфона при центробежном возбуждении колебательного контура

Сильфон, как любая механическая система, способная совершать перемещения под действием приложенной нагрузки, обладает определенными амплитудно-частотными характеристиками, в том числе имеет свой набор резонансных частот. Во-

прос о нахождении значений этих частот является основным вопросом в обеспечении надежного функционирования устройств подобного типа. В настоящее время этот вопрос решается только экспериментальным путем, так как нахождение резонанса системы со многими степенями свободы теоретическим путем является трудоемкой задачей, которая может быть решена лишь приближенными методами расчета параметров колебательного процесса [3].

Таким образом, при анализе сиффона как механической системы целесообразно осуществить переход от системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами.

Для анализа возьмем механическую систему возбуждения колебательной системы центробежным вибратором рис.2.а [1]. Принято считать, что этот вид возбуждения близок к идеальному источнику силы:

$$P_B = r m_B \omega^2, \quad (10)$$

однако такое представление справедливо лишь при условии малых значений  $m_B$ .

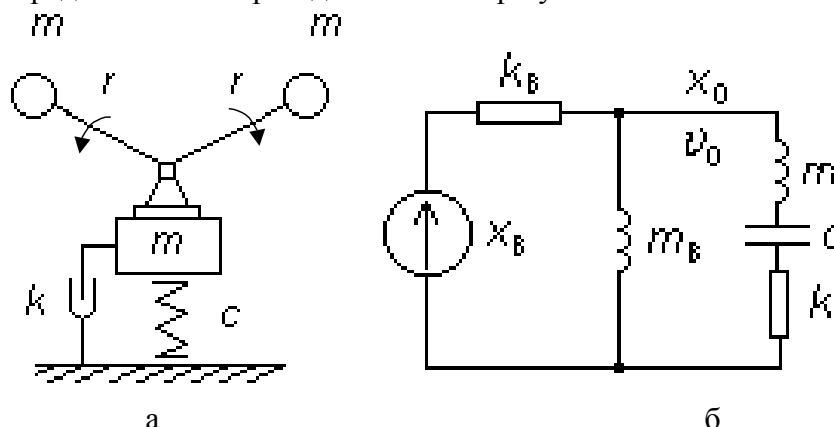


Рис. 2. Электромеханическая модель колебательной системы однофрового сиффонного УЧЭ при центробежном возбуждении. а) – механическая модель, б) – электрическая модель

На рис.2,б показана полная схема возбуждения с учетом сопротивления трения  $k_B$  и внутреннего сопротивления возбудителя  $m_B$ . Характеристика возбудителя

$$x_0 = x_B + \frac{1}{m_B \omega^2} P_0 \quad (11)$$

выражается через возмущенное перемещение

$$x_B = r \sin \omega t \quad (12)$$

(считаем, что  $\omega = \text{const}$ ) и усилие на внешнем контуре:

$$P_0 = x_B \frac{m_B \omega^2 \zeta_0}{m_0 \omega^2 - \zeta_0}, \quad (13)$$

или, в развернутом виде,

$$P_0 = -x_B \frac{m_B \omega^2 (c - m \omega^2 + ki \omega)}{c - (m + m_B) \omega^2 + ki \omega}. \quad (14)$$

Усилие возбуждения:

$$P_B = x_B \zeta, \quad (15)$$

где жесткость представляется как

$$\zeta = k_B i \omega - \frac{m_B \omega^2 (c - m \omega^2 + ki \omega)}{c - (m + m_B) \omega^2 + ki \omega}. \quad (16)$$

Относя силы трения  $k_B$  к свойствам источника энергии, характеристику инерционного возбудителя можем преобразовать к виду:

$$-P_0 = P_B - m_B \omega^2 x_0 \text{ или } P_0 = P_B - i m_B \omega \nu_0, \quad (17)$$

где  $P_B = m_B \omega^2 x_B$ ,  $u_0 = \frac{dx_0}{dt}$ .

Динамическая жесткость внутреннего инерционного сопротивления ( $-m_B \omega^2$ ) растет с частотой возбуждения. Поэтому, если на низких частотах центробежный вибратор можно считать возбудителем, близким к идеальному источнику переменной возмущающей силы, то на высоких частотах его характер меняется, приближаясь к характеру идеального источника динамических перемещений.

Амплитудно-частотная характеристика упрощенной динамической модели [3]:

$$|H(j\omega)| = \frac{RL\omega}{\sqrt{(\omega L)^2 - R^2}}, \quad (18)$$

где  $R = z_0$  и  $L = m_B$ .

## Заключение

В настоящей работе рассмотрены различные варианты математических моделей колебательных систем УЧЭ для исследования их частотных спектров. Предложена методика расчета амплитудно-частотных характеристик многозвенных УЧЭ (сильфонов) при кривошипном и центробежном возбуждении их колебательных контуров, с использованием метода электромеханических аналогий.

## Литература

1. Исследование напряжений в конструкциях. /Под ред. Н.И. Пригоровского. М.: Наука, 1980. 120 с.
2. Ткалич В.Л., Полубояринова И.А. Математическая модель для расчетов сильфонов (возбуждение колебательного контура кривошипным механизмом). //Депонировано в ВИНТИ № 113-В99, 18.01.99.-5 с.
3. Ткалич В.Л., Полубояринова И.А. Математическая модель для расчета сильфонов (центробежное возбуждение колебательного контура). //Депонировано в ВИНТИ № 112-В99, 18.01.99.-5 с.

## МЕМБРАННЫЕ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЕ КОНТАКТЫ

Н.Н. Валентик, В.А. Климанов, Н.В. Когай

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич

В целях увеличения срока службы и эффективности функционирования исследуемых устройств автоматики на магнитоуправляемых контактах осуществлена разработка ряда модификаций контактных систем герконов. Предлагаемое авторами статьи конструкторско-технологическое решение мембранного ртутносмачиваемого геркона, требующее привлечения современных технологий, приведет к повышению чувствительности, увеличению токов коммутации, снижению дребезга, повышению технологичности, а также увеличению срока службы МК.

Опыт эксплуатации упругих чувствительных элементов (УЧЭ) – герконов убедительно показывает, что качество и надежность зависят от характера контактирования сопрягаемых деталей друг с другом или с жидкой фазой (герконы с сухими контактными поверхностями; герконы со смачиваемыми контактными поверхностями, например, ртутью), определяемого состоянием поверхностного слоя контактирующих деталей.

С целью повышения надежности, сокращения длительности приработки, замены дорогостоящих материалов на конструкционные, сокращения трудоемкости изготовления деталей повышенной точности и долговечности и т.п. на поверхности контакт-деталей МК предлагается наносить регулярный микрорельеф (РМР). Образованный на поверхности УЧЭ РМР создает систему регулярно расположенных зон в поверхностном слое, а зачастую, и во всей толщине УЧЭ. Нанесение частичного РМР (ЧРМР) II или III вида на поверхности подвижных контакт-деталей МК влечет за собой образование непрерывно или дискретно расположенных углублений, между которыми остается нетронутым исходный, чаще всего нерегулярный, микрорельеф обрабатываемой поверхности. При ПРМР КС остаточные напряжения при деформации распределяются равномерно по всему материалу детали, что особенно важно для конструкций мембранных герконов, так как обеспечивается равномерность прогиба мембранного КС при срабатывании, снимаются напряжения в зонах спая с баллоном МК, возрастает стабильность работы МК, значительно уменьшается разброс срабатывания упругого элемента. Помимо этого, уменьшается гистерезис, увеличивается жесткость КС, чувствительность МК, растет число коммутаций в единицу времени и, следовательно, обеспечиваются большой срок службы и повышенное быстродействие МК.

В ртутных герконах смачивание контактирующих поверхностей контакт-деталей, исключаящее вибрацию при замыкании, осуществляется посредством их амальгирования ртутью или периодической подачей ртути на контактирующие поверхности. Применение вибронатки (IV вид ПРМР) после амальгирования на поверхностях УЧЭ существенно улучшается проникновение и закрепление молекул ртути в толще материала контакт-детали. Оно приводит также к улучшению механических характеристик УЧЭ. В случае периодической подачи ртути к месту контакта по полукапиллярам, выполненным на поверхности самих контакт-деталей, при замыкании происходит вытеснение и разбрызгивание ртути из зоны контактирования; ее медленное пополнение ограничивает допустимую частоту срабатывания МК. Нанесение III вида РМР на поверхности УЧЭ позволит исключить это вредное явление. Особый интерес может представлять абсолютно новый (с точки зрения технологии) геркон, представляющий собой комбинацию конструкций мембранного и ртутного геркона. Предлагается на поверхности мембран для мембранных герконов любого вида сначала наносить ртутную пленку путем амальгирования (центрифугирования), а затем осуществлять вибронатку, образуя РМР IV вида. В результате, кроме улучшения чувствительности (магнитодвижущая сила срабатывания) и механических характеристик УЧЭ, таких как жесткость, упругость, равномерность прогиба, будет полностью ликвидировано вредное явление дребезга

(вибрации) при коммутации МК. Широкие функциональные возможности, повышенная надежность и высокое быстродействие таких герконов делают их весьма перспективными.

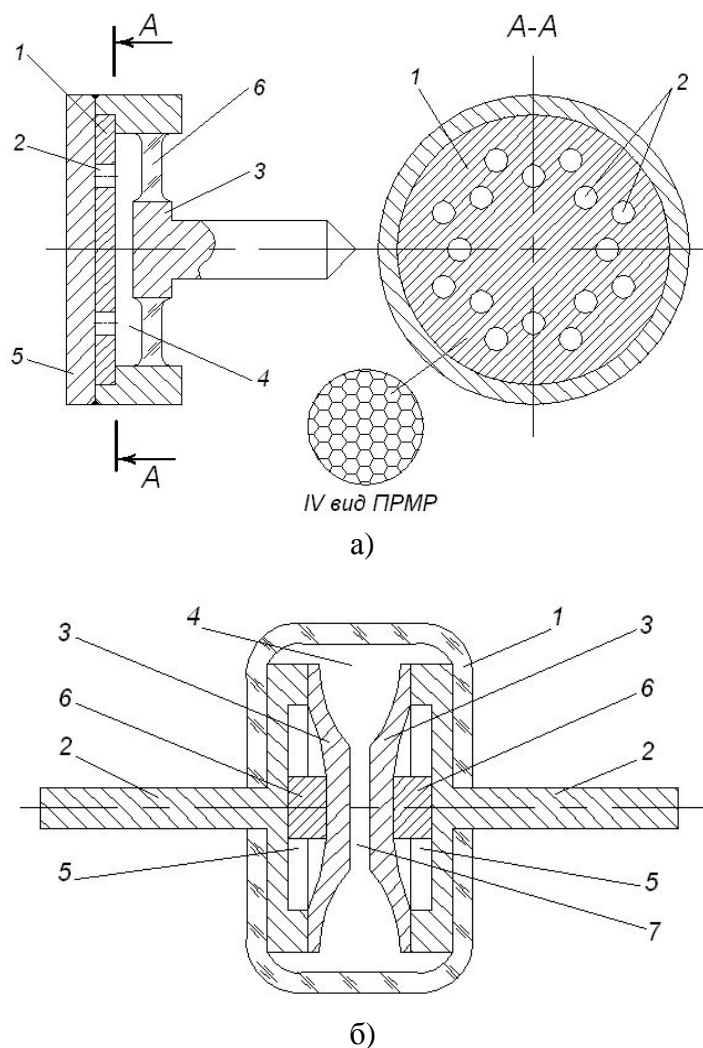


Рис. 1. Мембранные герконы

В мембранных герконах подвижная контакт-деталь выполняется в виде мембраны. Эскизы предлагаемых модификаций приведены на рис.1. На рис.1,а показан мембранный геркон, один из контактов которого выполнен в виде мембраны с перфорацией (подвижный контакт), а другой – в виде ферромагнитного стержня. Магнитная мембрана 1 с круглыми вырезами 2 осуществляет контактирование с магнитным сердечником 3 своим центральным диском под действием потока в рабочем зазоре 4. Сердечник 3 изолирован от металлического корпуса 5 стеклянным кольцом 6. Мембранный геркон имеет большую площадь рабочего зазора и, следовательно, меньшее магнитное сопротивление, что увеличивает чувствительность. Мембрана имеет большую площадь контактирования с сердечником, что обеспечивает коммутацию больших токов. Варьируанием формы вырезов и размеров можно менять величину прогиба мембраны и чувствительность контакта. Современные технологии позволяют обеспечить величину перемещения мембраны под нагрузкой в упругой зоне на величину порядка  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  метров, что обеспечивает очень высокую чувствительность мембранных конструкций. Оба контактных сердечника имеют полный регулярный микрорельеф рабочей поверхности и в зоне контактирования смачиваются ртутью, что существенно улучшает динамические характеристики герконов. Смачивание осуществляется посредством амальги-

рования контакт-деталей ртутью посредством токов высокой частоты, после формообразующего процесса вибронакатывания УЧЭ, с целью регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности контакт-деталей. Вторая модификация мембранного ртутносмачиваемого МК, показанная на рис.1.б, предполагает выполнение обоих КС в виде амальгированных ртутью мембран с ПРМР IV согласно [5].

Предлагаемые параметры поверхностей с ЧРМР и ПРМР [5]: для поверхностей с ЧРМР – глубина (высота) регулярной неровности  $h=16$  мкм, относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями,  $F_n=(60-70)\%$ , угол направления неровностей  $\Theta=50^\circ$ ; для поверхностей с ПРМР – высота элемента поверхности  $R=(10-16)$  мкм, относительная опорная площадь  $T_p=(60-80)\%$ .

На рис. 1.б обозначены стеклянный баллон 1, впаянные магнитные сердечники 2, на которых установлены гофрированные мембраны 3 с РМР рабочей поверхности. Каждая мембрана отделяет от основной полости 4 автономную полость 5, внутри которой установлен немагнитный упор 6. Основная и автономные полости заполнены инертным газом с различным давлением, что способствует, совместно с упором 6, виброустойчивости мембраны 3. Между мембранами 3 задан рабочий зазор 7. Под действием продольного магнитного поля мембраны прогибаются навстречу друг другу и замыкают электрическую цепь. Возможна установка мембраны только на одном магнитном сердечнике, однако чувствительность геркона при этом снижается. Созданный РМР с высотой микронеровностей в несколько десятков микрометров осуществляет влияние на внутреннюю структуру материала на глубину до нескольких миллиметров. Такие регулярно расположенные зоны значительно изменяют прочностные характеристики УЧЭ, на порядок увеличивают надежность, стойкость к многократным нагрузкам и изгибам, а также износостойкость элементов УЧЭ. Сам процесс прокатки УЧЭ в валках с РМР делает условия деформации материалов более благоприятными, за счет равномерного распределения нагрузок по всей ширине проката. Это улучшает качество листа, а также снижает энергозатраты за счет улучшения условий захвата и распределения материала в зоне пластической деформации.

После операции вибропрокатки производится операция вырубки, позволяющая получить конкретные габаритные размеры мембран и перфорацию с требуемыми допусками на диаметры отверстий.

Таким образом, предлагаемое в работе конструкторско-технологическое решение позволит повысить чувствительность, увеличить токи коммутации, снизить дрейбег, повысить технологичность, а так же увеличить срок службы МК.

## Литература

1. Ткалич В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 98 с.
2. Михеева О.Д., Ткалич В.Л., Добрусин А.М., Фролов Н.Д. Повышение надежности пружинных ртутных и мембранных герконов // Всероссийская научная конференция (Computer-Based Confefence) «Методы и средства измерений». Тезисы доклада. Нижний Новгород, 2000. С.16.
3. Харазов К.И. Устройства автоматики с магнитоуправляемыми контактами. М.: Энергоавтомиздат, 1990.
4. Ткалич В.Л. Разработка и исследование методов повышения надежности герконов и реле на их основе: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб, ИТМО, 1994.
5. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РЕЗИСТЕНТНОСТИ ВНУТРЕННЕЙ  
ПОЛОСТИ НОСА ЧЕЛОВЕКА НА НАТУРНОЙ МОДЕЛИ

А.А. Рассадина

Научный руководитель – д.т.н., профессор Г.Н. Лукьянов

Исследуется конвективный воздухообмен натурной модели носа человека. Выведены формулы для вычисления гидравлического сопротивления (коэффициента резистентности) внутри модели. Приведены значения гидравлического сопротивления для областей преддверия носа, общего носового хода, среднего носового хода, хоан.

**Введение**

Исследование конвективного воздухообмена внутри полостей носа является одной из важнейших задач физиологии дыхания человека [1]. Понимание конвективных процессов дыхания может значительно расширить диагностические возможности современных приборов, и позволит диагностировать ранние стадии патологий дыхания человека. На сегодня эта задача остается нерешенной, что объясняется сложностью анатомического и физиологического строения носа. Существует несколько гипотез развития конвективных процессов воздухообмена внутри полостей носа [2, 3]. Эти гипотезы были предложены медиками на основе фото- и видеонаблюдений за процессом дыхания как внутри человеческого носа, так и на его моделях. Гипотезы носят во многом описательный характер, расходятся между собой и требуют дополнительного физического обоснования.

С этой целью была создана натурная модель полости носа, позволяющая осуществлять наблюдения непосредственно за физическими параметрами, характеризующими дыхание человека. К этим параметрам относятся скорость воздушного потока, давление и температура. Расчет гидравлических сопротивлений внутри полости носа является одной из основных задач исследования, так как позволяет объективно оценить степень проходимости воздуха внутри полостей носа и охарактеризовать конвективный воздухообмен внутри модели. В медицине аналогом коэффициента гидравлического сопротивления является степень резистентности. Экспериментальные исследования на натурной модели носа позволили определить значение гидравлического сопротивления внутри различных её частей и показали, что при вдохе воздушный поток равномерно распределяется между общим и средним носовыми ходами. При выдохе основная масса воздушного потока движется через средний носовой ход.

**Теоретическая часть**

Внутреннюю полость носа можно представить как систему последовательно и параллельно соединенных каналов (рис. 1) – области преддверия носа, области среднего, нижнего, верхнего и общего носовых ходов, области хоан. Тогда общее гидравлическое сопротивление системы:

$$\xi_{\text{общ}} = \xi_1 + \xi_{2-5} + \xi_6, \quad (1)$$

где  $\xi_1$  – коэффициент гидравлического сопротивления области преддверия носа,  $\xi_{2-5}$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления областей среднего, нижнего, верхнего и общего носовых ходов,  $\xi_6$  – коэффициент гидравлического сопротивления области хоан.



Коэффициент гидравлического сопротивления отдельно взятого канала  $\xi_i$  можно найти из уравнения Бернулли [4, 5] (тепловой нагрев воздуха и энергию сил давления, расходуемую на проталкивание массы воздуха через каналы носа, не рассматриваем) найдя величину потери давления  $\Delta H$ :

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta H. \quad (2)$$

В формуле (2)  $\rho$  – массовая плотность воздуха,  $кг \cdot c^2 / м^4$ ;  $v_1, v_2$  – скорости воздушного потока в выбранных сечениях рассматриваемого и последующего за ним каналов,  $м/с$ ;  $z_1, z_2$  – геометрические высоты, т.е. расстояния от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до рассматриваемой точки жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м/с^2$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_i$ :

$$\xi_i = \frac{\Delta H}{\frac{\rho \cdot v_1^2}{2}} = 1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} + \frac{2 \cdot g \cdot (z_1 - z_2)}{v_1^2}. \quad (3)$$

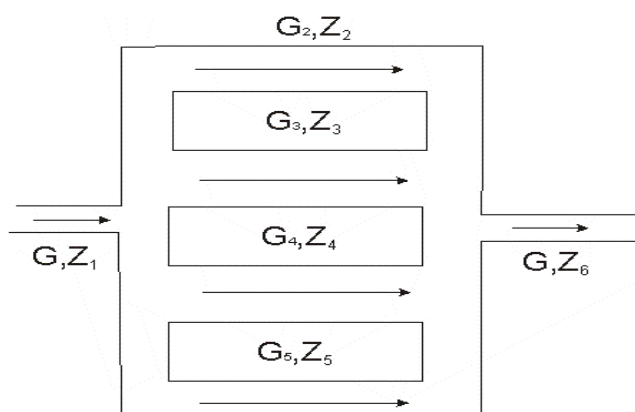


Рис.1. Внутренняя полость носа как система последовательно и параллельно соединенных каналов  $G, z_1$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления области преддверия носа,  $G_2, z_2$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления общего носового хода,  $G_3, z_3$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления нижнего носового хода,  $G_4, z_4$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления среднего носового хода,  $G_5, z_5$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления верхнего носового хода,  $G, z_6$  – расход и коэффициент гидродинамического сопротивления области хоан

### Экспериментальное исследование. Результаты исследования

Для исследования процессов конвективного воздухообмена внутри полости носа была создана натурная модель носа, полностью повторяющая его внутреннее анатомическое строение [6]. Внутри модели были расположены полупроводниковые термометры сопротивления СТ1-18, отградуированные в режиме термоанемометров (ТА). ТА расположены в следующих каналах модели:

- в области преддверия носа,
- в области среднего носового хода,
- в области общего носового хода,
- в области хоан.

Геометрическая высота и геометрическая плоскость сравнения для каждого из каналов показаны на рис. 2.

По формуле (3) были найдены значения гидравлических сопротивлений, которые приведены в табл. 1.

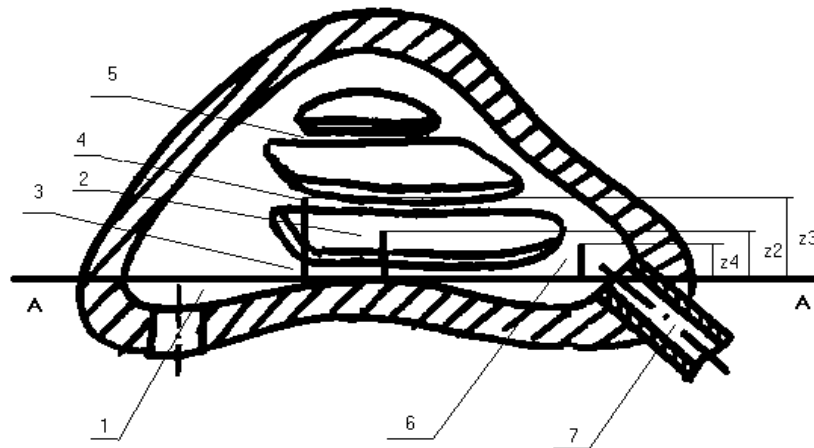


Рис. 2. Внутренний вид натурной модели носа. Цифрами обозначены: 1 – область преддверия носа, 2 – область общего носового хода, 3 – область нижнего носового хода, 4 – область среднего носового хода, 5 – область верхнего носового хода, 6 – область хоан, 7 – отводная трубка. Сечение А-А – геометрическая плоскость сравнения. Z2 – геометрическая высота общего носового хода, Z3 – геометрическая высота среднего носового хода, Z4 – геометрическая высота хоан

| №  | Области модели                |       | Гидравлическое сопротивление, $\xi$ |
|----|-------------------------------|-------|-------------------------------------|
| 12 | Преддверие носа - общий ход   | вдох  | 0,53                                |
|    |                               | выдох | 0,53                                |
| 13 | Преддверие носа - средний ход | вдох  | 0,72                                |
|    |                               | выдох | 0,69                                |
| 24 | Общий ход - хоаны             | вдох  | 0,21                                |
|    |                               | выдох | 0,19                                |
| 34 | Средний ход - хоаны           | вдох  | 0,27                                |
|    |                               | выдох | 0,14                                |

Таблица 1. Гидравлические сопротивления модели

Полученные значения гидравлических сопротивлений позволили осуществить следующий анализ массообменных процессов внутри модели носа.

При вдохе воздух встречает значительное сопротивление внутри полости носа в области разделения потока раковинами. При этом происходит падение скорости воздушного потока. Гидравлическое сопротивление воздуху оказалось больше при переходе из области преддверия носа в область среднего носового хода, по сравнению с переходом из преддверия носа в общий ход, поэтому большая часть воздуха идет через общий носовой ход. Она составит примерно половину вдыхаемого воздушного потока,  $\xi = 0,53$ . Остальная его часть распределится между средним, верхним и нижним носовыми ходами. Сопротивление общего и среднего носовых ходов области хоан незначительно и составит примерно одинаковую величину,  $\xi \approx 0,2$ .

При выдохе воздух распределится примерно одинаково между средним и общим носовыми ходами, величина гидравлического сопротивления незначительна и равна  $\xi \approx 0,15$ . Гидравлическое сопротивление воздуха при переходе из области среднего носового хода в область преддверия носа больше, чем величина гидравлического сопротивления при переходе из общего носового хода в область преддверия носа. Можно предположить, что указанная особенность воздухообмена позволяет части воздуха остаться внутри среднего носового хода и перераспределиться в носовые пазухи.

## Заключение

Исследовался конвективный воздухообмен натурной модели носа. Модель носа полностью повторяет полости носа человека и является сложной разветвленной структурой каналов нерегулярной формы. Важными характеристиками конвективных процессов внутри модели являются гидравлические сопротивления внутри наиболее значимых областей модели. Такими областями выбраны области преддверия носа, области среднего и общего носовых ходов, области хоан. Расчет гидравлических сопротивлений был выполнен на основе анализа уравнения Бернулли, в котором не учитывались энергия сил давления и внутренняя тепловая энергия модели. Анализ полученных значений гидравлических сопротивлений показал, что при вдохе воздух встречает значительное сопротивление в области разделения потоков по носовым ходам, что значительно тормозит его скорость [6]. Большая часть воздуха идет через общий носовой ход, что совпадает с [3]. При выдохе воздух примерно одинаково распределяется по носовым ходам, при этом часть его оседает внутри среднего носового хода и попадает в пазухи, что также совпадает с [3].

## Литература

1. Сагалович Б.М. Физиология и патфизиология дыхательных путей. М.: Медицина, 1964, с.327.
2. Оторинология. Учебник./ Под. Ред. Солдатова И.Б., Гофмана В.Р. Воен.-Мед. Акад. СПб, 2000.
3. Пискунов Г.З., Пискунов С.З. Клиническая ринология. М.: Миклош, 2002 390 с.
4. Дульнев Г.Н. Механика жидкостей и газов: Учеб. пособие. СПб, СПбИТМО (ТУ), 2001, 188 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям./ Под. ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
6. Рассадина А.А. Оригинальная модель для исследования движения воздушных потоков внутри полости носа// Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004, с.265-270.

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ КРОВОТОКА НА ТЕМПЕРАТУРУ СРЕДЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОЖУ

А.Е. Пушкарева

Научный руководитель – д.т.н., доцент В.Ю. Храмов

Проведено исследование влияния скорости кровотока на температуру кожи в процессе лазерного нагрева. При помощи численного моделирования процессов диффузии света и тепла выявлена взаимная зависимость скорости течения крови и температуры слоев кожи.

## Введение

Одним из основных результатов воздействия лазерного излучения на кожу является локальное повышение температуры среды. Происходящие при этом изменения свойств биоткани могут оказывать влияние на распределение температуры. Так, например, увеличение скорости кровотока может оказаться дополнительным, и достаточно эффективным, механизмом отведения тепла от места облучения. Данный эффект может повлиять как на эффективность, так и на безопасность процедуры, поскольку нарушается локальность нагрева.

Скорость течения крови различна в сосудах разного типа и зависит от диаметра сосуда. Так, линейная скорость кровотока в капиллярах (диаметр  $d=8$  мкм) очень низкая и составляет примерно 0,1 мм/с, а в мелких венах ( $d=0,75$  мм) – 0,05 м/с [1]. При повышении температуры кровотоки могут увеличиться в несколько раз. Этот эффект связывают в основном с местным расширением сосудов и снижением вязкости крови. Кроме того, скорость кровотока не мгновенно реагирует на изменения температуры. Задержка довольно велика и составляет, согласно [2], 60–90 с.

К сожалению, исследования процессов, происходящих в живой биоткани при воздействии на нее оптического излучения, экспериментальным путем представляют значительную сложность, хотя и являются наиболее достоверными. Альтернативой может служить численное моделирование.

Многие исследования, посвященные моделированию взаимодействия лазерного излучения с кожей, учитывают наличие крови в ткани, однако не принимают во внимание ее движение. Существуют работы, учитывающие скорость течения крови, однако авторы либо принимают ее неизменной и не рассматривают ее зависимость от температуры ткани, либо полагают, что увеличение скорости кровотока происходит мгновенно, не учитывая задержку во времени данного процесса [3].

В данной работе было проведено математическое и компьютерное моделирование процессов диффузии света и тепла, происходящих в коже человека под воздействием лазерного излучения с длиной волны 810 нм. Учтена зависимость скорости кровотока от температуры среды, а также задержка изменения скорости кровотока при изменении температуры.

## 1. Модель

Расчеты проводились на основе четырехслойной модели кожи, включающей в себя эпидермис, базальный слой, дерму и подкожную жировую клетчатку. Предполагалось, что кровеносные сосуды располагаются в дерме и жире.

За основу для моделирования динамики оптических и тепловых процессов диффузии при воздействии оптического излучения на кожу были взяты теория переноса излучения и теория теплопроводности. Распределения освещенности и источников тепла внутри кожи, полученные с помощью решения уравнения переноса излучения в диффузионном приближении [4], позволили провести расчет распределения температуры в среде. Для каждого из слоев решалось уравнение теплопроводности:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость;  $t$  – время;  $\kappa = \alpha \cdot \rho \cdot c$  – теплопроводность,  $\alpha$  – температуропроводность;  $Q(\mathbf{r}) = \mu_a \cdot \varphi(\mathbf{r}) \cdot \frac{E_0}{\tau_p}$  – объемная плотность источников тепла в среде;  $\mu_a$  – коэффициент поглощения;  $\varphi(\mathbf{r})$  – полная освещенность в точке  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ , отнесенная к единичной плотности мощности излучения на поверхности кожи;  $E_0$  – плотность энергии излучения. Здесь  $T$  – температура ткани (дермиса или жира), но не крови.

В тех областях, где нет крови (эпидермис, базальный слой), тепловой расчет проводился на основе (1). В дермисе и жире были добавлены источники тепла, обусловленные потоком крови. Для этих слоев уравнение теплопроводности принимает вид

$$\rho \cdot c \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)) + Q(\mathbf{r}) + Q_{blood}(t, T), \quad (2)$$

где  $Q_{blood}(t, T)$  – поглощенное или выделенное кровью тепло, в зависимости от того, как ее температура соотносится с температурой окружающей ткани. Его можно записать следующим образом [2]:

$$Q_{blood}(t, T) = \rho c [\rho_b \cdot f \cdot (T_{blood} - T)], \quad (3)$$

где  $\rho_b$  – плотность крови;  $T_{blood}$  – ее температура (36.5 °C);  $f$  – плотность потока крови в ткани, измеряемая в см<sup>3</sup>/(с·г) и представляющая собой объем крови, переносимый в секунду, в 1 грамме соответствующей ткани.

В стационарных условиях, плотность потока равна  $f_0$  и различна в дермисе и жире. Кроме того, стационарная плотность потока зависит от температуры, т.е. можно написать  $f_0 = f_0(T)$ . В нестационарных условиях воздействия света на кожу, которые рассматриваются в данной работе,  $f$  не равно  $f_0(T)$ , где  $T$  – текущая температура. При изменении температуры поток крови изменяется не мгновенно, а с задержкой:  $t_{delay} = 60-90$  с. Учет данной задержки проводился с помощью следующего уравнения для потока крови:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_0(T) - f}{t_{delay}}. \quad (4)$$

Таким образом, была получена система уравнений (2) и (4), решение которой позволяет получить зависимость температуры внутри кожи от скорости кровотока на любой глубине и в любой момент времени.

## 2. Результаты и их обсуждение

Моделирование проводилось с использованием системы для математических вычислений Mathcad. Для расчетов были приняты следующие величины скорости течения крови: в дерме 15 мл/(мин·100·г), в подкожной жировой клетчатке 5 мл/(мин·100·г) [2]. Рассматривался импульсный режим с длительностью одного импульса 1 сек и частотой повторения 0.8 Гц. Плотность энергии импульса 1.6 Дж/см<sup>2</sup>. Такой режим представляется характерным для лазерной обработки жировой ткани.

Интерес представляют полученные зависимости температуры и потока крови от времени, представленные на рис. 1 и 2. Поскольку в рассматриваемой модели кровотоков присутствует только в дерме и подкожной жировой клетчатке, то контрольные точки, для которых были построены приведенные зависимости, были выбраны на глубинах 2 мм (дерма) и 5 мм (подкожный жир).

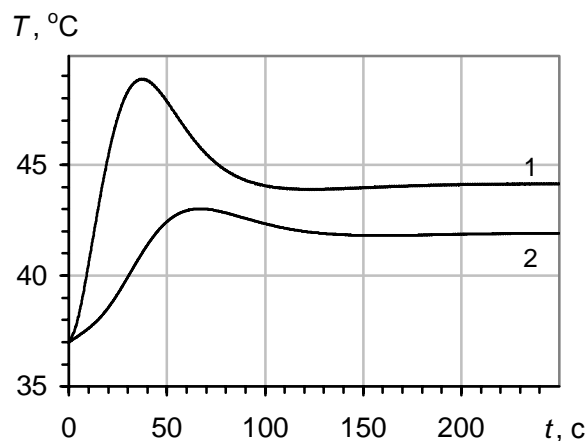


Рис. 1. Зависимости температуры различных слоев кожи от времени: 1 – дерма (глубина 2 мм), 2 – подкожная жировая клетчатка (глубина 5 мм)

На рис. 1 виден спад температуры примерно через 40 сек для дермы и 1 мин для жира. Снижение температуры является достаточно значительным на глубине 2 мм. В подкожной жировой клетчатке спад температуры менее резкий. В обоих случаях после понижения температуры происходит стабилизация, и дальнейшая обработка не приводит к нагреву слоев.

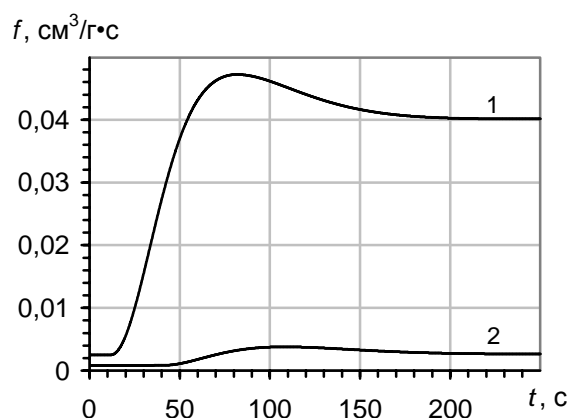


Рис. 2. Зависимости плотности потока крови в различных слоях кожи от времени: 1 – дерма (глубина 2 мм), 2 – подкожная жировая клетчатка (глубина 5 мм)

Из рис. 2 видно, что некоторое время поток крови практически остается неизменным. С учетом зависимостей, приведенных на рис. 1, можно сказать, что скорость течения крови начинает заметно возрастать после достижения температуры (41.5–42)°C. Однако через некоторое время плотность потока немного снижается и затем стабилизируется. Это происходит вследствие падения температуры.

Таким образом, при сравнении зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, было получено, что первоначально температура беспрепятственно возрастает, а затем увеличивается поток крови и температура заметно снижается, что ведет к некоторому уменьшению плотности потока крови. Особенно ясно этот эффект заметен в дерме. В подкожной жировой клетчатке это не так выражено, поскольку достигаемая температура здесь значительно ниже, и скорость кровотока меньше, чем в дерме.

Более наглядно взаимная зависимость температуры дермы от плотности потока крови представлена на рис. 3. Здесь достаточно четко заметен момент, когда начинается увеличение скорости кровотока. Также видно, что снижение температуры происходит не сразу после изменения потока крови, ее рост сначала замедляется, а затем начи-

нается ее спад. Аналогичным образом относительно температуры ведет себя и плотность потока крови.

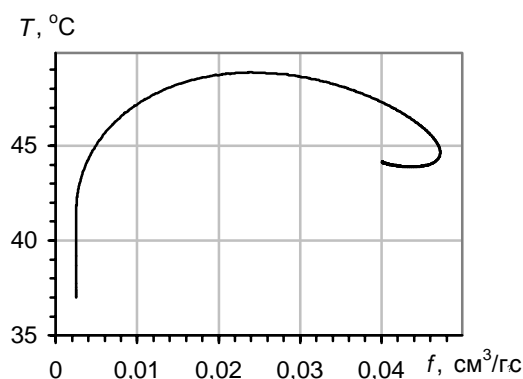


Рис. 3. Зависимость температуры от плотности потока крови в дерме

Итак, возрастание температуры внутри кожи при длительном воздействии ограничено вследствие повышения скорости течения крови при ее нагреве. В результате происходит значительный спад температуры до некоторого уровня и дальнейшая ее стабилизация. Снижение температуры приводит к соответствующему понижению эффективности воздействия, что нельзя оставлять без внимания. Риск термического повреждения эпидермиса максимален спустя примерно 40 сек после начала процедуры.

Таким образом, кровоток играет немаловажную роль в процессе отвода тепла от зоны воздействия. Температура внутри кожи не увеличивается постоянно при длительном воздействии, поэтому необходимо ограничивать время воздействия для достижения наибольшей эффективности. Однако при работе с глубокими слоями отвод тепла с помощью кровотока может играть положительную роль, как фактор, стабилизирующий температуру и поддерживающий ее на некотором определенном уровне. Поскольку никаких резких изменений в подкожной жировой клетчатке не происходит, то можно производить достаточно длительную обработку глубоких слоев кожи, не опасаясь перегрева.

## Заключение

В работе проведено численное моделирование воздействия лазерного излучения на кожу с учетом изменения скорости кровотока вследствие нагрева. Выявлена взаимная зависимость температуры кожи и скорости течения крови в ней. Показано, что изменение плотности потока крови в процессе обработки оказывает значительное влияние на результат лазерного нагрева, стабилизируя температуру кожи.

## Литература

1. Морман Д., Хеллер Л. Физиология сердечно-сосудистой системы. СПб.: Питер, 2000.
2. Sekins K.M., Emery A.F. Thermal Science for Physical Medicine. Therapeutic Heat and Cold. 4-th edition, J.F. Lehmann, ed., Williams & Wilkins, Baltimore, 1990. p. 62-112.
3. Zhu D., Luo Q., Zhu G., Liu W. Kinetic thermal response and damage in laser coagulation of tissue // Lasers in surgery and medicine. 2002. Vol. 31. № 5. p. 313-321.
4. 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.

# **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОС ЧЕЛОВЕКА**

**П.А. Головин**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор К.Г. Коротков**

Приводится новый метод исследования волос человека – метод газоразрядной визуализации (ГРВ), показывающий сложность превращения биологического объекта (волос) в неживую материю в процессе увядания. Также проводится обзор существующих физических методов исследования волос

## **Введение**

В настоящее время выявлен ряд признаков волос, характеризующих определенные их свойства, которые можно объединить в 4 группы.

1. Признаки морфологического характера – размеры, форма, строение концов волос, характер пигмента, рисунка кутикулы, особенности строения сердцевинки, поперечных срезов, наличие повреждений и заболеваний волос.
2. Признаки биологического характера – групповая, ферментная специфичность, половая принадлежность.
3. Признаки химических свойств волос – элементный состав, изменения волос на протяжении и на срезах под действием солей тяжелых металлов, кислот, щелочей и др.
4. Признаки физических свойств волос – эластичность, рефракция, удельный вес, прозрачность, электрические и др. свойства.

Нас, в первую очередь, интересуют физические, особенно электрические и электронные свойства волос.

Большой интерес в понимании, что же такое человеческий волос, представляет исследование волос с помощью метода газоразрядной визуализации. Исследование проводилось в 2004 г. совместно несколькими институтами в России и США.

В работе предлагается новый метод газоразрядной визуализации (ГРВ), позволяющий взглянуть на волос не как на инертную ткань, а как на самостоятельно «живущий», после его срезания с головы человека, объект.

В то время как корень волоса жизненно важен, стержень волос, рассматривался состоящим прежде всего из мертвых кератиновых ячеек [54, 44]. Волосы традиционно рассматривались как инертная ткань. Их прямое взаимодействие с телом, как обычно полагали, было несуществующим. Результаты измерений методом газоразрядной визуализации (ГРВ) показали существенные различия между волосами в естественных условиях и срезанных волосах.

Также приводится обзор существующих физических, фотометрических и электрических методов изучения волос.

## **Отклик человеческих волос к физическому воздействию, наблюдаемый с помощью метода газоразрядной визуализации (ГРВ)**

Эксперименты, использующие технику газоразрядной визуализации (ГРВ) [17, 18], на человеческих волосах подняли важные вопросы о природе физической связи между волосами и скальпом. Эксперименты проводились с живыми людьми, и в то время когда волосы были присоединены к голове человека, и впоследствии, после срезания. Результаты этих испытаний ГРВ показали существенные различия между волосами в естественных условиях и срезанных волосах.

Оборудование для испытания ГРВ состоит из 3 главных частей. Первое – катушка вместе со стеклянным электродом, на котором помещен тестируемый образец, с проводящим слоем круглой формы, на котором создается коронный разряд (1). Вторая часть –



цифровая видеокамера. Третья часть ГРВ – программное обеспечение, чтобы анализировать и определить количество видимых параметров колебаний коронного разряда по типу яркости, площади и форме в реальном времени

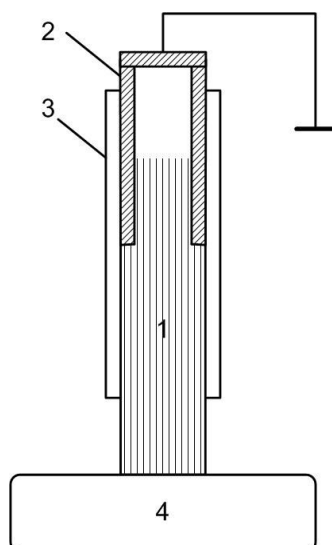


Рис. 1. Образец, помещенный в специальную трубку с 3-4 мм. диаметром, в вертикальном положении относительно электрода и ГРВ камеры : (1) образец; (2) электрод; (3) трубка с 3-4 мм. диаметром; (4) электрод

Серия биполярных 10-микросекундных электрических импульсов на 3 кВ, с шагом  $10^6$  V/s и частотой повторения  $10^3$  Гц, была приложена к проводящему слою, генерирующему электромагнитное поле (ЭМП) вокруг волос. Вокруг волос распространялся скользящий коронный разряд, со свечением в видимой и ультрафиолетовых областях электромагнитного спектра. Пространственное распределение каналов разряда было зарегистрировано ТВ камерой, и затем было оцифровано в компьютере.

Волосы снимались в течение 10 секунд, и короткие фильмы были сохранены в компьютере как файлы AVI. Частота съемки была установлена на 30 изображений в секунду. Это продиктовано скоростью съемки камерой и компьютерным интерфейсом. Все файлы AVI были преобразованы в ряд файлов BMP. Параметры площади (число засвеченных пикселей) и усредненная интенсивность (оцениваемая от 0 для абсолютно черного цвета до 255 для абсолютно белого), для каждого изображения были рассчитаны программным обеспечением.

Испытания ГРВ волос были выполнены в естественных условиях с управляемой влажностью и температурой: относительная влажность 33–38 % (RH), нормальное атмосферное давление и 20–23°C. Система зажима была настроена так, чтобы расположить волосы в широком и узком диапазонах параллельно поверхности.

Было взято более 100 образцов волос разных людей в возрасте 18–55 лет. Волосы были разных типов. Повреждения волос были в пределах нормы. Испытуемые сидели около камеры так, чтобы их волосы могли лежать поперек электрода. Первые десять измерений были сделаны с волосами, помещенными на электрод. Несколько минут спустя проводились 30 повторных измерений, причем после 15 из них волосы срезались с головы. Параметр «Интенсивность» использовался как главный критерий измерений. Размер площади ГРВ использовался как контрольный критерий, чтобы гарантировать, что измерение образца и его положения были постоянны в течение всего эксперимента.

В некоторых случаях исследования заканчивались после 24 часов; в других – более чем через 3 дня. Из-за тенденций, замеченных в результатах измерений для первой

группы, дополнительные образцы волос были проверены с использованием того же самого протокола, но с 7-дневным периодом измерений.

В связи с изменениями в измерении интенсивности ГРВ свечения волос, как показано на рис. 2, протокол был изменен, чтобы наблюдать это явление в расширенном промежутке времени.

Эти эксперименты были нацелены на обнаружение, был ли этот эффект последователен и восстанавливаем. После начальных 30 измерений, которые включили срезание волос, 10 повторных регистраций были сделаны после 24, 98, 121, и 165 часов.

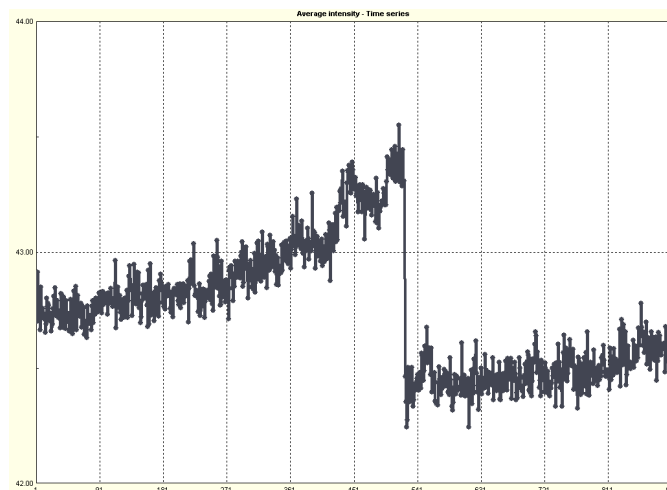


Рис. 2. Зависимость времени и интенсивности изображения в 30 повторных измерениях с волосами, срезанными с головы человека в середине измерения

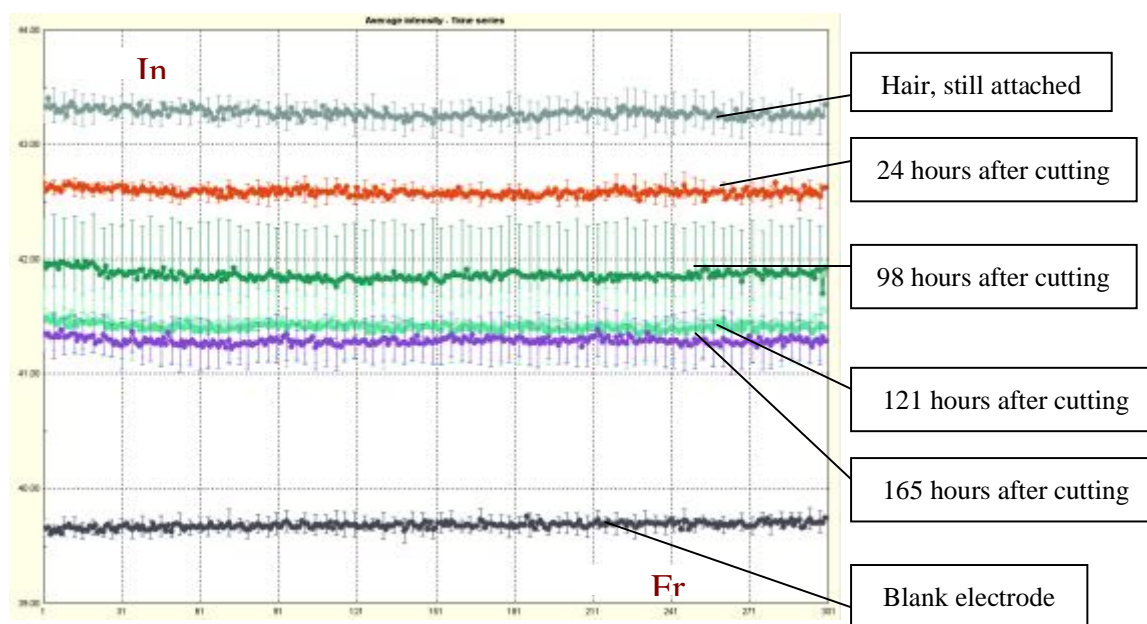


Рис. 3. Интенсивность ГРВ для каждого из нескольких интервалов для одного образца

Усредненные измерения каждого ряда были приведены вместе, чтобы показать изменение в интенсивности, регистрирующейся в течение долгого времени (рис. 3). Результаты, показанные на рис. 3, указывают, что существенное снижение в интенсивности произошло в первые 24 часа после срезания волос с головы. Измерения, сделанные после 121-часового испытания, не отличались значительно друг от друга. Это означает,

что снижение в способности волос отвечать на ЭМП, связанные с измерениями ГРВ, были завершающими в 4-й день после срезания.

Результаты опыта, показанного в иллюстрации, были подтверждены впоследствии другими измерениями. Регистрация интенсивности свечения всех волос была проведена в зависимости от времени, что показало тенденцию уменьшения интенсивности. Это уменьшение является самым большим сразу после срезания и замедляется после 24 часов.

Этот пример снижения может быть описан логарифмической тенденцией. Представленные результаты были воспроизведены на многих образцах в двух лабораториях и в России и в США. Конечно, это только предварительные данные, и трудно сделать любые заключения. Мы можем лишь предположить, что передача  $\pi$ - электронов вдоль стержня волоса тесно связано с физическим отделением от тела.

Это может произойти из-за отделения волос от тела как возможного источника свободных электронов для генерации коронного разряда. Известно, что ГРВ может регистрировать мельчайшие изменения на электроде [19], что связано с комплексом явлений передачи потенциальной энергии через ткань [20].

Было постулировано, что большая часть рогового вещества человеческих волос, состоящая из мертвых ячеек, является фактически активным передатчиком электромагнитных сигналов. Если бы такая коммуникация действительно существовала между человеческими волосами и телом, то следовало бы ожидать, что этот сигнал ослабится после прерывания этой связи.

Контрольные эксперименты, основанные на мёртвых образцах, не показывали, что то же самое изменение в сигнале ГРВ было наблюдаемо в живых образцах. Образцы волос, используемые в этом исследовании, были из одного источника. Никакое статистически существенные различия не были замечены в регистрации для образцов после срезания их с головы человека.

## **Обзор физических свойств волос и существующих физических методов их исследования**

### **Макроскопические свойства волос**

Цвет волос. Этот признак является важным при проведении экспертизы волос и зависит от количества и цвета пигмента в волосах, характера кутикулы: чем она ровнее, тем большее светорассеивание и тем светлее кажется волос. Наличие пузырей воздуха в волосах также придает им светлый оттенок. Однако цвет зависит и от субъективного восприятия, что усложняет исследование волос даже одним человеком.

Согласно классификации Брока, существует 54 нюанса цветовых оттенков. [45] определяет цвет волос в пучке как белокурые, светло-русые, русые, темно-русые, черные, седые, рыжие. [1] рекомендует пользоваться семичленной шкалой: светло-белокурые, белокурые, темно-белокурые, светло-русые, русые, черные. Цвет волос по отдельности определяется как белый, желтый, светло-коричневый, коричневый, темно-коричневый, черный, но может иметь другой оттенок вследствие искусственной окраски, действия температуры и гниения.

Форма волос. Ствол волоса человека имеет прямую или слегка веретенообразную форму. Волосы животных имеют ланцетовидную, цилиндрическую, коническую, изогнутую и другие формы. У специалистов различных специальностей имеются свои классификации формы волос.

### **Физические свойства волос**

Кроме микроскопических исследований волос, существует большее количество физических методов комплексного исследования волос. Положительным является и то, что результаты этих исследований можно объективно фиксировать.

### Определение прочности на разрыв и эластичности.

Эластичность волоса зависит от толщины коркового слоя, внешних воздействий, патологических состояний. Прочность и эластичность можно измерить на гидравлическом динамометре с самозаписывающим устройством, позволяющим получить диаграмму разрыва, волоса. А.Н. Кишиневский (1960, 1962) [12, 13] установил, что при разрыве удлинение волоса происходит неравномерно: вначале оно нарастает соответственно нагрузке, затем резко увеличивается до какой-то величины нагрузки, дальнейшее же удлинение волоса до момента разрыва незначительно. Диаграммы разрыва волос разных людей отличаются по характеру и величине, зависят от регионального происхождения. Например, при разрыве подмышечных волос стадия повторного удлинения отсутствует.

Средняя прочность для волос с головы разных людей колеблется от 14 до 157 г, волос подмышечной области – от 35 до 132, волос лобковой области – от 95 до 200 г. Удлинение волос к моменту разрыва у разных лиц составляет в среднем 34% для волос с головы, 25% для волос подмышечной области и 24% для волос лобковой области. Разница в прочности волос с головы одного человека в среднем не превышает 15–25 г и лишь редко достигает 40 г; удлинение волоса составляет не более 10–15%, т.е. примерно 1 мм. Автор [13] считает, что различие в прочности на 40 г; удлинение волоса на 1,5 мм указывают на принадлежность данных волос разным лицам.

А.О. Израелит [9] изучала ползучесть (постепенное удлинение) волоса под действием постоянной нагрузки. При этом был использован релаксометр системы научно-исследовательского института метрологической службы, предназначенный для испытания растяжения упруго-эластичных объектов. Установлено, что относительное удлинение волос разных доноров колеблется в интервале от 5 до 20 мм; ползучесть зависит от возраста: с возрастом она уменьшается. Для исследования берут 5 волос с каждой области головы, измеряют в пяти участках каждого волоса его толщину, вычисляют среднюю максимальную этих измерений и площадь сечения волос. Делением величины груза на площадь сечения находят действующее начало. Отмечают динамику прироста волоса через определенный промежуток действия груза, не доводя волос до разрыва. По средним результатам строят кривые, характеризующие ползучесть.

Определение скорости погружения. Методика предложена А.Н.Кишиневским [12] и заключается в измерении времени погружения отрезков волос длиной 4 мм (3–10 кусочков одного волоса) на стандартную глубину 10 см в цилиндр с дистиллированной водой. Волосы при этом располагаются строго горизонтально и должны быть примерно одинаковой толщины и структуры (наличие сердцевины). Колебание среднего времени погружения у разных лиц составляет от  $24,6 \pm 0,7$  до  $58,8 \pm 1,8$  с (размах 34,2 с), с разных областей головы одного человека – от  $41,9 \pm 1,3$  до  $44,1 \pm 1,3$  с (размах 3,2 с), достигая в редких случаях 16 с. Корреляционная зависимость между толщиной и скоростью погружения волос отрицательна и равна  $0,77 \pm 0,07$  с ( $t=2$ ). Седые волосы погружаются более медленно ( $44,6 \pm 1,3$  с). Цвет волос не влияет на скорость их погружения.

Определение коэффициента рефракции. Величину рефракции измеряли иммерсионным способом путем наблюдения за световой полоской Бекке и эффектом косого освещения (по Шредер Ван-дер-Кольку). Измерение проводят с помощью микроскопа МП-3 и набора стандартных иммерсионных жидкостей с различными показателями рефракции. Рефракция стандартных жидкостей проверяется предварительно на рефрактометре. Погружая волос в жидкость с различными показателями рефракции, подбирают жидкость, светопреломление которой наиболее близко к светопреломлению волоса и таким образом устанавливают коэффициент рефракции волоса. Величина преломления волос с головы у разных лиц варьирует от 1,5442 до 1,5563 (разница 0,0121), волос подмышечной области – 0,0102, лобковой области – 0,097), волос разных областей головы одного человека – 0,0008-0,0045. Таким образом, разница коэффициентов реф-

ракции волос с головы разных людей превышает показатель рефракции волос с одной головы в 3 раза [12].

### **Фотометрические свойства**

**Микрофотометрия.** Метод микрофотометрии основан на объективной регистрации степени пропускания света различными участками волоса. Изучаемое оптическое свойство волос можно рассматривать лишь условно, так как волос представляет собой необычайно сложную оптическую систему, не обладающую правильной конфигурацией и вызывающую многократные преломления, отражения и рассеивания светового пучка по мере прохождения его через толщу волоса. На степень пропускания света влияют толщина, сердцевина, пигмент. А.Н. Кишиневский [12], Л.Е. Кузнецов [22] проводили микрофотометрию волос головы и региональных областей при ширине осветительной и измерительной щели 0,3 мм с верхним увеличением 8 и 10. Каждый волос измерялся в 10 участках с интервалом в 2 мм. Статистической обработкой результатов исследования установлено, что отклонения величины показателя светопропускания на протяжении одного волоса незначительны. Величина среднего коэффициента светопропускания волос, взятых с различных участков головы одного человека, не превышает 4%, волос с головы разных людей колеблется от  $5,9 \pm 0,4\%$  до  $14 \pm 1,4\%$ , т.е. в 2 раза превышает максимально возможные колебания величины светопропускания волос с различных участков головы.

### **Исследование удельного электрического сопротивления волос**

Интерес представляет работа З.М. Мамедова [27]. Работа основана на более ранних исследованиях электрических свойств волос [47].

Сущность метода сводится к измерению общего электрического сопротивления, напряжения и силы тока, проходящего через предварительно обезжиренные, промытые и просушенные волосы. При измерении общего сопротивления волос  $R_{об}$  для каждого участка создавались омические контакты из эвтектики галлия и индия (1:1). Сила тока измерялась с помощью электрометрического усилителя ВК 2-16. В основу его работы положен принцип измерения слабых токов по величине падения напряжения. Каждый волос измеряли в течение 3 минут с точностью до 10% в стационарном режиме в области выполнения закона Ома. Удельное электрическое сопротивление вычислялось по формуле

$$p = (R * S) / L,$$

где  $R$  – общее сопротивление,  $S$  – площадь поперечного сечения волоса,  $P$  – УЭС волоса,  $L$  – длина волоса. Полученные результаты обработаны на компьютере с применением методов дисперсионного анализа и критерия Стьюдента.

В [27] получены следующие выводы.

1. Удельное электрическое сопротивление волос может служить в качестве самостоятельного объективного признака, на основании которого возможно проведение судебно-медицинской экспертизы сходства волос.
2. Удельное электрическое сопротивление волос человека колеблется у различных индивидуумов в пределах от  $10^4$  до  $10^{10}$  Ом, а волос различных участков головы одного человека колеблется по коэффициенту вариации от 3 до 39%. Установлено статистически достоверное различие между удельным электрическим сопротивлением пигментированных и седых, тонких и толстых волос. Удельное электрическое сопротивление волос с сердцевиной к без нее, а также густо и слабо пигментированных статистически не различается.
3. Удельное электрическое сопротивление волос не коррелирует с возрастом человека, не связано с его половым диморфизмом и цветом волос, но достоверно зависит от их регионарного происхождения. Мало различаются между собой показатели удельного

электрического сопротивления волос с верхних а нижних конечностей, волосистой части головы и лица, различных участков тела (грудь, подмышечная впадина, лобок).

4. Удельное электрическое сопротивление волос существенно изменяется после применения хны и в меньшей степени – после использования красителей и обесцвечивающих средств («Лондаколор» № 211, 218, «Лондестон» № 16 «Блондоран ликвид»).

5. Различие удельного электрического сопротивления более чем на 40% позволяет объективно исключить принадлежность волоса к данному конкретному индивидууму; при различии значений этого показателя сравниваемых образцов менее чем на 20% принадлежность волоса не исключается и должна быть подтверждена дополнительно другими методами исследования. В каждом конкретном случае надежность экспертных выводов может быть установлена по величине *D*-критерия с оценкой вероятности ошибок первого и второго рода.

6. В сравнении с применяемыми методами экспертизы сходства волос предложенный метод имеет ряд преимуществ: посредством удельного электрического сопротивления представляется возможным исключать происхождения волос от конкретного человека даже при совпадении их групповой принадлежности и сходном морфологическом строении. Метод значительно сокращает сроки проведения экспертизы (особенно при большом количестве исследуемых образцов), и волос как вещественное доказательство не разрушается.

7. Исследование сходства волос на основе определения их удельного электрического сопротивления отличается высокой степенью достоверности, и при этом не требуется дорогостоящей аппаратуры и оборудования, а также специальной подготовки персонала.

## Заключение

В работе приведен обзор существующих физических, фотометрических и электрических методов (УЭС метод) изучения волос. Приводятся макроскопические свойства волос.

Приведен новейший метод исследования волос головы человека – метод газоразрядной визуализации (ГРВ), позволяющий взглянуть на волос не как на инертную ткань, а как на самостоятельно «живущий», после его срезания биологический объект.

Эксперименты, использующие технику ГРВ [17, 18], на человеческих волосах подняли важные вопросы о природе физической связи между волосами и скальпом. Эксперименты проводили с волосами на живых людях, когда волосы были присоединены к голове человека, и впоследствии после срезания. Результаты этих измерений ГРВ показали существенные различия между волосами в естественных условиях и срезанными волосами.

## Литература

1. Автандилов Г.Г. Морфометрия и патология. М., 1976, 246 с.
2. Бибииков В.В., Кисин М.В., Одшочкина Т.Ф. Исследование элементного состава волос при судебно-медицинской экспертизе. / Матер. 5-й Всесоюзн. конф. судебн.медиков."Т. 1. Л., 1969, С. 479-481.
3. Боровецкая Т.В. Матер, к вопросу о строении сердцевины волос животных. Автореф. канд. дисс. М., 1951. 24 с.
4. Володин С.А. Макро - и микроэлементный состав и некоторые физические свойства волос человека в зависимости от воздействия красителей в судебно -медицинском отношении. Автореф.канд.дис. Горький, 1970, 23 с.
5. Vainshelboim A., Momoh K.S., Korotkov K., Shigalev V.,Belyakov V. Response of human hair to physical separation observed with corona discharge analysis. // Congress in SPb "NEYROBIOTELECOM". 2004.
6. Громова Е.А.Электрические явления в организме. М., 1964.
7. Гусев В.Г. Информационные свойства электрических параметров кожного покрова. Уфа, 1998.
8. Elden D.V., Albelda S, Cotsarelis G. // 5 Cell Sci. 1998. 111. № 21. P.3179–3188.

9. Израелит А.С. Перспективы судебно-медицинской экспертизы волос по их релаксационным свойствам. / Матер. 1-го Всесоюзн. съезда судебных медиков. Киев, 1976. С.503-505.
10. Е.Кириленко, А.Кириленко, С.Лешин, Фус С. Мультиэлементарный анализ волос: новые возможности диагностики // Лікі України. 2001. № 12. С.28-29.
11. Кисин М.В., Паршиков Ю.И., Вартанесян Э.В., Булышова Л.К. Мате И. Исследование деструктивных изменений волос и искусственных волокон методом растровой электронной микроскопии. М., 1983. 48 с.
12. Кишиневский А.Н. О некоторых физических свойствах волос человека. Автореф. канд.дисс. Кемерово, 1960, 23 с.
13. Кишиневский А.Н. О судебно-медицинском значении объективной микрофотометрии волос человека. / Сб. матер. 4-8 Всесоюзн. конф. судеб, медиков. Рига, 1962. С.400+403.
14. Козлов Н.А., Яглов В.В. Гистология кожи и некоторых производных кожного покрова млекопитающих. М., 1999. 27 с.
15. Колосова В.М. Лабораторные и специальные методы исследования в судебной медицине. М., 1975, С.П8-31б.
16. Корниаш В.А. Инфракрасные спектры волос головы человека, их судебно-медицинское значение. Автореф. канд. дисс. М., 1981, 27 с.
17. Korotkov K.G. Measuring energy fields: state of the Science: GDV Bioelectrography series Vol. I, Ed., Backbone Publishing Co. Fair Lawn, USA, 2004.
18. K.Korotkov, D.Korotkin // J.Appl.Physics.2001. 89. 4732.
19. K.Korotkov et al. // J.Appl.Physics. 2004. 95. 3334.
20. K.Korotkov, B.Williams, L.A.Wisneski, J. Aaltem. // Comolement.Med. 2004. 10. 49.
21. Crocer E. James // Microscope. 1998. 46. № 3. P.169-173.
22. Кузнецов Л.Е. Судебно-медицинское исследование влажных ми-нерализатов волос головы человека (комплексное спектрофотометрическое, фотоэлектроколориметрическое и микрофотометрическое исследования). Автореф. канд. дисс. Барнаул, 1973. 23 с.
23. Кулин Е.Т. Биоэлектрический эффект. Минск, 1980.
24. А.Н., Кузнецов Л.Е., Каукуль В.Г. Фотометрия волос человека в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. / Вопр.теории и практики судебн.медицины. Казань, 1973. С.200-203.
25. Кузнецов А.Н. Биофизика ЭМ воздействий. М., 1994 Kunisada T., Ketsudo S. Система стволовых клеток эпидермиса. // Tissue. 2001. 33. № 4. P.301-308.
26. Кухорьков Ю.В. Исследование ДНК и кератинов при судебно-медицинской экспертизе единичных волос. Минск, 1998.
27. Мамедов М.З. Удельное электрическое сопротивление волос при экспертизе их сходства. // Суд.мед.эксперт. 1986. № 4. С.45-47.
28. Monteiro J. Влияние пищеварения, гниения и токсической обработки на морфологию волос. // Filho ELR J.ZOOL . 1998. 224. № 3. P.331-334.
29. Morioka K., Satosubata K., Kavashina H., Ueno T. Localization of katepsins B,D,L,LAMP-1 and  $\mu$ -calpain in developing hair follicles. // Acta Histochem and Cytochim. 2001. 34. № 5. P.337-339.
30. Мельская Т.Н., Ларский Э.Г. Исследование содержания микроэлементов и ферментов в волосах как новый подход к изучению метаболизма на тканевом уровне. // Лаб.дело. 1983. № I. С.3-10.
31. Михайлов У.С. Повышение эффективности судебно-медицинских исследований некоторых физических свойств волос.
32. Минаков П.М. О волосах в судебно-медицинском отношении. Дисс. докт. М., 1994, 136 с.
33. Muller, Barth // Dtsch. Z. ges gericht Med. 1956. Bd. 15. P.127.
34. Одиночкина Т.Ф. Атомно-абсорбционный анализ мышьяка и селена в волосах человека. / Физико-технические методы исследования в судебной медицине. М. - Ставрополь, 1972. С.143-144.
35. O'Connell T.C., Hedeges R.E.M. // Amer.J.Phys Antropol. 1999. 108. №4. P.409-425.
36. Петросян Н.Г. О физико-химических свойствах волос человека. // Суд.-мед.экспертиза. 1975. № 4. С.22-24.
37. Петросян Н.Г., Туманов А.К. Исследование волос человека атомно-абсорбционным методом. // Суд.-мед.экспертиза. 1974. № I. С.22-25.
38. Павлов Ю.В., Алисиевич В.Я., Еремина Е.И. Исследование кутикулы волос с головы жителей СССР и некоторых стран Азии методом, сканирующей электронной микроскопии. // Суд.-мед, экспертиза. 1983. № 2. С.36-38.
39. Павлов Ю.В. Морфологические особенности волос головы и других областей тела у жителей Азии. // Суд.-мед. экспертиза. 2002. 45. № 5. С.26-29.
40. Павлов Ю.В. Изучение типа рисунка линий кутикулы волос головы человека методом растровой электронной микроскопии. // Суд.-мед. экспертиза. 2000. 43. №4. С 31-32.
41. Павлов Ю.В. и др. О применении метода рентгено-структурного анализа для дифференцирования волос представителей разных национальностей. // Суд.-мед. экспертиза. 1997. 40. № 2. С.26-27.
42. Павлова А.З. Судебно-медицинское исследование волос. М., 1986. 38 с.

43. C.Robbins, *Cemical and physical Behavior of human hair*. Springer, New York, 1994.
44. Спицин В.А. и др. *Строение волос* М., 1996.
45. Туманов А.К. *Основы судебно-медицинской экспертизы*. М., 1976. С.308–382.
46. Чернова О.Ф. Архитектоника сердцевины остевых волос и ее значение для идентификации таксона. // *Доклады РАН*. 2001. 376. №4. С.569–573.
47. Юсуфов Р.М., Селимханов Ш.А., Тагиев Б.Г., Асланов Г.Н. Исследование удельного сопротивления волос, подвергшихся косметическим воздействия. / *Лабораторная диагностика на службе судебной медицины*. Харьков, 1985. С.169–170.
48. Yan Xin, Hu Zhi-qi. Культивирование и последовательное наблюдение волосяных фолликулов человека. // *J.First Mil.Med.Univ*. 2003. 23. № 2. P.138–140.
49. Walter F. Universal medulla morphology in human hair. // *Microscope*. 2002. 50. № 4. P.155–157.
50. Wang Chin-Thin, Tsai Yung-Yueh. Concentrations of potassium, sodium, magnesium, calcium, copper, zinc, manganese and iron in black and gray hairs in Taiwan. // *J.Helth Sci*. 2000. №1. P.46–48.
51. C.Zviak, Ed. *The Science of Hair Care*. Marcel Dekker, New York, 1986.



# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРА «ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТОТ» ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ВЛАЖНОСТИ

А.Ю. Грищенко, Д.А. Нечаев

Научный руководитель – д.т.н., профессор К.Г. Коротков

Статья посвящена исследованию зависимости показаний прибора ИПЧ от относительной влажности в помещении.

## Введение

Бурное развитие метода газоразрядной визуализации (ГРВ), с применением приборов ГРВ и ИПЧ требует для сопоставления и анализа результатов, полученных различными исследователями, стандартизации не только выходных данных, но и допустимых условий проведения эксперимента. Данная работа посвящена выявлению зависимости показаний ГРВ приборов от изменения влажности окружающего воздуха, а также определению рекомендуемого диапазона относительной влажности для корректной работы ГРВ приборов.

Известно, что зависимость напряжения пробоя ( $U_{пр.}$ ) от влажности проявляется только при разряде по поверхности раздела твердого диэлектрика (изолятора) и газа и выражается в уменьшении  $U_{пр.}$  с ростом влажности, особенно при некотором уровне влажности, когда образуется пленка на поверхности. В соответствии с кривой Пашена зависимость  $U_{пр.}$  от атмосферного давления при обычных условиях пренебрежимо мала. Зависимость  $U_{пр.}$  от температуры (при  $t=0-40^\circ$ ) составляет не более 7% [1, 2].

В ходе целого ряда исследований было подтверждено, что на показания приборов ГРВ и ИПЧ наибольшее влияние оказывает относительная влажность, гораздо меньшее влияние вносит температура и еще меньшее влияние оказывает давление [1]. Результаты исследований можно будет использовать для всех видов ГРВ приборов.

## Результаты эксперимента

Учитывая, что рекомендуемых диапазонов работы ГРВ-прибора по давлению, температуре и влажности пока не существует, выберем диапазон изменения температуры, исходя из требований к электромеханическим элементам прибора  $+5 - +40^\circ\text{C}$ , и диапазон давлений, моделирующий перепады от 650 мм рт.ст. (высоко над уровнем моря) до 800 мм рт.ст. (на уровне моря).

Исследовался титановый тест-объект цилиндрической формы ( $h=30\text{мм}$ ,  $d=10\text{мм}$ ) пакетами высокочастотных импульсов тока с параметрами: длительность импульса  $T=3\text{ мкс}$ , частота импульсов 1 кГц, длительность пакета 0.5 с, скважность пакетов 5 с. Для экспериментов электрод прибора был накрыт колпаком, под которым поднимали влажность путем испарения теплой воды.

Каждый эксперимент включал достаточное (не менее 40) число пакетов импульсов для проведения статистического анализа. Испытание проводилось 14 раз при различных, искусственно созданных значениях относительной влажности (%). На рис.1 приведены данные, полученные в ходе эксперимента.

Построение графиков проводилось по точкам средних значений тока, рассчитанным по (1), в зависимости от влажности.

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число испытаний,  $\omega_i$  – значение тока на  $i$ -ом пакете. Также проведен расчет зависимости отношения стандартного отклонения (СО) [3, 4] к среднему значению тока, от влажности воздуха (эта зависимость является наиболее показательной характеристикой разброса значений в процентном отношении):

$$\delta = \frac{1}{\bar{\omega}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2} * 100\% . \quad (2)$$

Результаты расчетов нанесены на график (см. рис. 2).

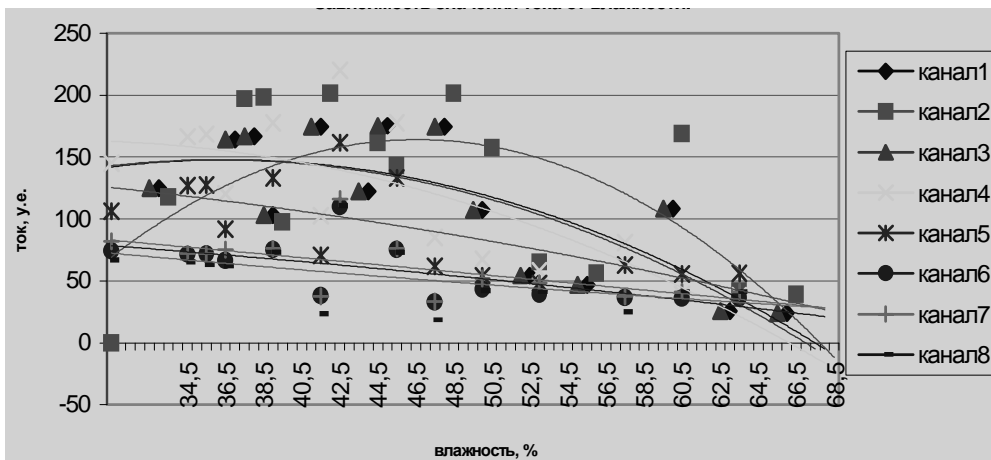


Рис. 1. Зависимость значений тока от влажности воздуха

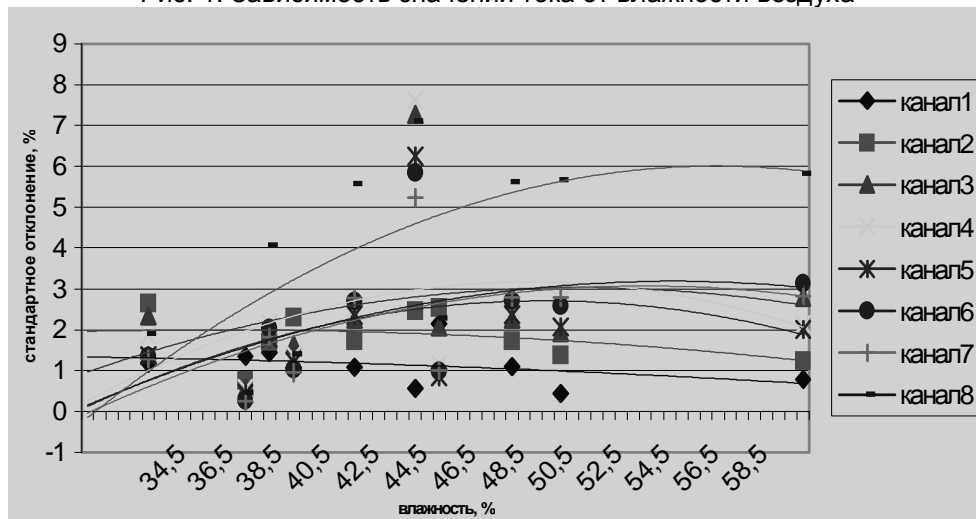


Рис. 2. Зависимость стандартного отклонения от влажности

Значения среднего тока и СО, выраженного в процентах, для холостого хода (т.е. работы прибора без тест-объекта при относительной влажности 33–42%) приведены в табл. 1.

|                            | Канал1 | Канал2 | Канал3 | Канал4 | Канал5 | Канал6 | Канал7 | Канал8 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Среднее значение тока шума | 196,18 | 54,53  | 24,35  | 40,56  | 55,22  | 37,20  | 43,87  | 44,48  |
| Стандартное отклонение %   | 8,49   | 3,76   | 1,77   | 0,57   | 0,23   | 0,61   | 0,62   | 0,69   |

Таблица 1. Режим холостого хода

По значениям тока шума (табл. 1) можно сделать вывод, что наибольший уровень шума равен 196,18 и 54,53 на первом и втором каналах, соответственно. Поэтому эти каналы будут исключены из дальнейшего исследования.

Построим график зависимости токов от влажности. Каждый из токов будем относить к соответствующему значению тока шума (см. табл.1) в этом канале (см. рис. 3). Это позволит

выявить отношение уровней сигнал/шум по всем каналам для различных уровней относительной влажности.

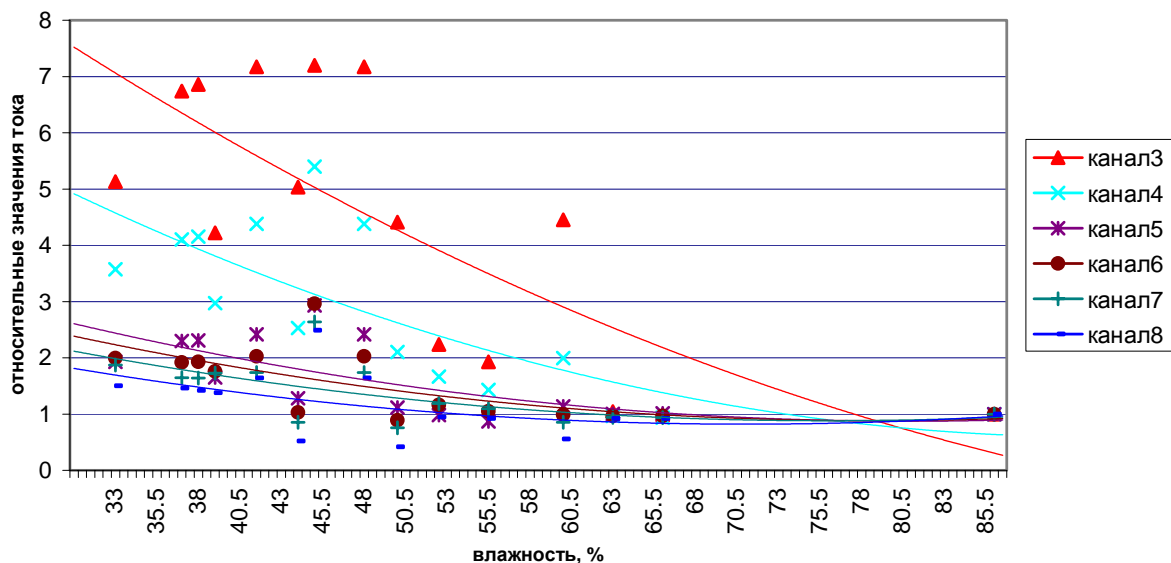


Рис. 3. Зависимость относительных значений тока от влажности

Наглядным будет график зависимости суммы (по каналам) относительных значений токов (см. рис. 3) от влажности. Ясно, что при сумме, близкой к единице, токи на всех каналах принимают значения шума.

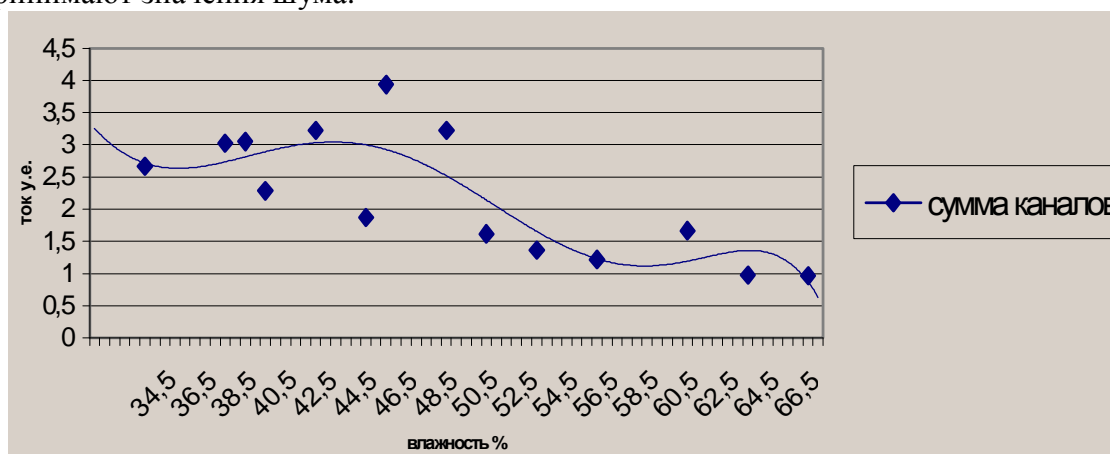


Рис. 4. Зависимость суммы токов от влажности

Анализ показаний прибора в зависимости от влажности будем делать для каждого канала в отдельности, а затем проведем обобщение по всем каналам. Так как внешние условия подвержены большим изменениям, чем внутренние (свойства электрических контуров прибора,) они оказывают наибольшее действие на протекающие токи. Следовательно, при некоторых уровнях влажности можно ожидать наибольшего СШ (см. рис. 2) и предполагать максимальную информативность канала при этой влажности. Имеется восемь каналов, полученных при помощи частотной фильтрации:

1 канал (0,94–1,32 МГц). Наибольшие амплитудные значения при самом высоком уровне шума, по сравнению с другими каналами, максимальное отношение сигнал/шум (СШ) 2,02 при 41%. При повышении влажности от 33 до 42–46% уровень сигнала незначительно нарастает, при 42–46% имеется максимум, далее резкий спад и уже при 62% остается только шум. Наибольшее СШ при 45%.

2 канал (1,38–1,9 МГц). При повышении влажности с 33 до 41–47% нарастание сигнала, при 45% достигается максимум отношение СШ=3.69, затем резкий спад, и при 60% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СШ при 45%.

- 3 канал (1,92–2,9 МГц). Наблюдается наибольшее по отношению к другим каналам отношение СШ=7,17. При увеличении влажности от 33 до 38–41% нарастание сигнала, 38–45% максимум, далее резкий спад, при 62% значение СШ близко к 1. Наибольшее СО при 44%.
- 4 канал (3,0–4,58 МГц). Второе по величине значение СШ=4,37 среди всех каналов. При повышении влажности с 33 до 38–45% нарастание сигнала, при 38–48% достигается максимум, затем резкий спад, и при 60% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СО при 44%.
- 5 канал (4,7–7,62 МГц). При повышении влажности с 33 до 41–47% нарастание сигнала, при 41–47% достигается максимум отношения СШ=2,41, затем резкий спад, и при 60% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СО при 44%.
- 6 канал (6,9–9,94 МГц). При повышении влажности с 33 до 41–47% нарастание сигнала, при 41–47% достигается максимум отношения СШ=2,02, затем резкий спад, и уже при 50% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СО при 44%.
- 7 канал (10,2–15,4 МГц). При повышении влажности с 33 до 43% нарастание сигнала, при 43% достигается максимум отношения СШ=1,73, затем резкий спад, и уже при 50% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СО при 44%.
- 8 канал (15,6–22,4 МГц). При повышении влажности с 33 до 41–47% нарастание сигнала, при 41–47% достигается максимум отношения СШ=1,64, затем резкий спад, и уже при 49% уровни сигнала и шума практически сравниваются. Наибольшее СО при 44%.

Для удобства и наглядности сведем полученные данные в табл. 2.

| КАНАЛ | Наибольшее значение СШ при влажности % |             | Влажность, %, при наибольшем СО | Влажность, при которой значение СШ близко к 1 |
|-------|--|-------------|---------------------------------|---|
|       | СШ                                     | Влажность % |                                 |   |
| 1     | 2,02                                   | 41          | 45                              | 62  |
| 2     | 3,69                                   | 45          | 45                              | 60  |
| 3     | 7,17                                   | 41,5 – 48   | 44                              | 62  |
| 4     | 4,37                                   | 45          | 44                              | 60  |
| 5     | 2,41                                   | 41 – 47     | 44                              | 60  |
| 6     | 2,02                                   | 41 – 47     | 44                              | 50  |
| 7     | 1,73                                   | 43          | 44                              | 50  |
| 8     | 1,64                                   | 41 – 47     | 44                              | 49  |

Таблица 2. Показания в различных каналах

## Заключение

Очевидно, что с нарастанием влажности до 38–47% значение сигналов по каналам нарастают и примерно при 42% имеют максимумы, далее при повышении влажности до 50–60% уровень сигнала понижается, сравниваясь с шумом. При влажности более 60% сигнал не отличим от шума по всем каналам. Можно отметить, что на третьем канале отношение сигнал/шум наибольшее среди всех 7,17 при влажности 41,5–48%, этот же канал имеет наибольшее значение стандартного отклонения выраженного в процентах (14%) при той же влажности.

## Литература

1. Коробейников С. М. Диэлектрические материалы // <http://sermir.narod.ru/tyrd/Posob/element.htm>, 2000.
2. Коротков К. Г. Влажность объекта // Основы ГРВ биоэлектрографии. СПб: СПбГУ ИТМО, 2001. С.58–59.
3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: Мир, 1981.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985.

# ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СОЗНАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

И.Б. Стражмейстер

Научный руководитель – д.т.н., профессор Г.Н. Дульнев

Рассматривается способ определения энергоинформационных потоков в сознании человека и оценка степени его хаотичности. Последняя позволяет судить о состоянии сознания перципиента до, в ходе и после экзогенного или эндогенного воздействия на него индуктора. В случае, когда индуктором является человек, с ним проводятся те же измерения и расчеты, что и с перципиентом.

Уровень упорядоченности или хаотичности системы принято в физике оценивать величиной энтропии [2]. Известны естественнонаучные подходы, используемые при регистрации различных состояний энергоинформационных процессов человеческого сознания. Например, открытый Гансом Бергером в 1929 году электроэнцефалографический способ, реализуемый в электроэнцефалограммах (ЭЭГ), позволяет по ритмам головного мозга зафиксировать различные состояния человеческого сознания в условиях активного, бодрствующего состояния (бета-ритм), при релаксации, медитации, вхождении в гипнотический транс (альфа-ритм), состоянии сна (тета-ритм) и бессознательном состоянии (дельта-ритм). С помощью ЭЭГ можно также зарегистрировать телепатическую передачу сигнала от индуктора к перципиенту [13]. Однако этот способ не позволяет производить оценки степени хаотичности и упорядоченности энергоинформационных потоков в организмах индуктора и перципиента.

Известен способ прогнозирования изменений функционального состояния организма человека, основанный на изменениях интегральных показателей деятельности организма перципиента электрической, тепловой и механической природы (ЭКГ, ЭЭГ, быстрые движения глаз и др.), пересчитанных в информационную энтропию [9, 10]. Данный способ является косвенным, в нем используются интегральные показатели деятельности организма как единой системы. Интегральный подход дает обобщенные энтропийные оценки, но не позволяет оценить степень хаотичности энергоинформационных потоков организма по параметрам в локальных областях тела перципиента. Этим способом также одновременно невозможно зарегистрировать энергоинформационные взаимодействия группы лиц.

Близким по технической сущности является способ оценки факта переноса информации от индуктора (человека) к перципиенту нетрадиционным способом с помощью регистрации плотности локального теплового потока и температуры кожи лба индуктора и перципиента с последующим пересчетом их в термодинамическую и информационную энтропию. Измерения реализуют преобразователями теплового потока (тепломеры Геращенко) со встроенными медно-константановыми термопарами с помощью лабораторного измерительного комплекса «Эниотрон-2», позволяющего проводить комплексные измерения полей различной физической природы [5, 6].

Значения теплового потока  $q(\tau)$  с площади  $A$  температуры  $T$  для промежутка времени  $\Delta\tau$  позволяют получить в реальном масштабе времени текущие значения удельной термодинамической энтропии  $\Delta S$  на выбранном участке тела по известной формуле [15]

$$\Delta S = \frac{q(\tau) \cdot \Delta\tau}{T \cdot A}, \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}, \quad (1)$$

где  $q(\tau)$  – плотность теплового потока за промежутки времени  $\Delta\tau$ ;  $T$  – абсолютная температура датчика;  $A$  – площадь поверхности, с которой производится измерение теплового потока.

Для открытой системы, которой является человек, полная энтропия складывается из производства энтропии  $\Delta_i S$  и обмена энтропией с окружающей средой  $\Delta_e S$  [4]:

$$\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S. \quad (2)$$

Величина производства удельной энтропии для человека (средняя площадь поверхности тела которого около  $2 \text{ м}^2$ ) хорошо изучена и составляет  $\Delta_i S = 0,16 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  [2]. Поэтому величину обмена удельной энтропии находят по формуле

$$\Delta_e S = \Delta S - \Delta_i S = \Delta S - 0,16. \quad (3)$$

Переход от термодинамической удельной энтропии  $\Delta_e S \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  к удельной информационной энтропии  $\Delta I \text{ бит}/\text{м}^2$  производят по формуле Шенона [2]

$$\Delta_e S = k \cdot \Delta I, \quad \Delta I = \frac{\Delta_e S}{k}, \quad (4)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана.

Исследование энергоинформационных потоков обычно производится в три этапа: состояние перципиента и индуктора до воздействия (фон), период экзогенного воздействия индуктора (человека) на перципиента, состояние перципиента и индуктора после воздействия (последствие).

В настоящей работе оценка степени хаотичности энергоинформационных потоков производится в относительных единицах и осуществляется путем регистрации энергоинформационных потоков с различных областей тела перципиента(ов) при воздействии на его (их) организм индукторов различной физической природы (экзогенных и эндогенных), а также оценки по энергоинформационным показателям взаимного влияния друг на друга двух или более лиц, влияние на человека таких индукторов, как ментальное и эмоциональное усилие, произведения искусства, молитва, дыхательная гимнастика и другие системы психотренинга, КВЧ терапия.

Указанная задача решается следующим образом. В способе определения локального энергоинформационного потока, включающем измерение плотности теплового потока и температуры поверхности исследуемой зоны тела перципиента до, в ходе и после воздействия на него индуктора, рассчитывается величина приращения удельной термодинамической энтропии, по которой рассчитывают величину приращения обмена удельной термодинамической энтропией перципиента с окружающей средой. Измерения плотности теплового потока и температуры производят в одной или более биологически активных зонах одного или более перципиентов, измерения осуществляют при экзогенном или эндогенном воздействии индуктора на перципиента(ов), выбирают текущее, минимальное и максимальное приращения величины обмена удельной термодинамической энтропией перципиента(ов) с окружающей средой, по которым рассчитывают степени хаоса  $K_x$  и порядка  $K_n$  и оценивают исследуемый относительный энергоинформационный поток по формулам

$$K_x = \frac{\Delta_e S - \Delta_e S_{min}}{\Delta_e S_{max} - \Delta_e S_{min}}, \quad K_n = \frac{\Delta_e S_{max} - \Delta_e S}{\Delta_e S_{max} - \Delta_e S_{min}}, \quad K_x + K_n = 1, \quad (5)$$

где  $\Delta_e S$ ,  $\Delta_e S_{max}$ ,  $\Delta_e S_{min}$  – текущее, максимальное и минимальное приращение удельной термодинамической энтропии обмена с внешней средой. В случае экзогенного воздействия индуктора-человека на перципиента указанные выше измерения и расчеты осуществляют и для индуктора.

Для определения упорядоченности состояния системы используются меры порядка  $\Pi$  и хаоса  $X$ . Согласно Л. Бриллюэну [12], степень порядка в системе равна разнице между максимальным  $\Delta_e S_{max}$  и текущим  $\Delta_e S$  значениями энтропии,

$$\Pi = \Delta_e S_{max} - \Delta_e S, \quad (6)$$

а степень хаоса – разнице между текущим  $\Delta_e S$  и минимальным  $\Delta_e S_{min}$  значениями энтропии. По аналогии с формулой (6) выводим выражение для величины хаоса  $X$  системы:

$$X = \Delta_e S - \Delta_e S_{min} . \quad (7)$$

Действительно, для случая  $\Delta_e S = \Delta_e S_{min}$  степень хаоса равна нулю, для случая  $\Delta_e S = \Delta_e S_{max}$  степень порядка равна нулю, что и следовало ожидать.

Степени порядка  $\Pi$  и хаоса  $X$  в психофизиологическом состоянии индуктора и перципиента, найденные по формулам (6) и (7), затрудняют сопоставление разнородных и разномасштабных изменений состояния сознания и соответствующих им энергоинформационных потоков, возникающих в различных областях тела индуктора и перципиента при эндогенных и экзогенных воздействиях. Это происходит потому, что абсолютные значения  $\Pi$  и  $X$  трудно сопоставимы, так как могут существенно отличаться для разных перципиентов и индукторов. Для устранения этого недостатка предлагается использовать относительные нормированные оценки хаоса  $K_x$  и порядка  $K_\Pi$  для отдельных областей тела индуктора и перципиента. Для этого значения хаоса  $X$  и порядка  $\Pi$  делят на общий знаменатель, представляющий собой разницу между максимальным  $\Delta_e S_{max}$  и минимальным  $\Delta_e S_{min}$  значениями приращения обмена энтропией с внешней средой, и для оценки состояния сознания принимаются сами коэффициенты  $K_x$  или  $K_\Pi$ .

В способе, согласно которому производится измерение теплового потока и температуры с нескольких областей человеческого тела, предлагается осуществлять выбор областей съема информации по принципам школ восточной и западной медицины, т.е. в биологически активных точках и зонах [1, 7].

Под биологически активными точками (БАТ) понимаются дермальные акупунктурные точки, расположенные в подкожной клетчатке, в области которых электрическое сопротивление (электрическая проводимость) и температура отличаются от расположенных рядом участков тела. Под биологически активными зонами понимаются зоны Захарьина-Гедда. В области данных точек и зон отмечается усиленное поглощение кислорода и повышенные обменные процессы. Они также отличаются болезненностью при пальпации. С помощью ЭЭГ показано, что подъем и снижение проводимости в БАТ тесно связано с деятельностью головного мозга [7, 13]. Поэтому именно они выбраны для оценки упорядоченности, или хаотичности энергоинформационных потоков сознания человека.

Предлагаемый способ может быть реализован с помощью устройства, включающего преобразователь теплового потока, выходы которого соединены с многоканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), соединенным со стандартной компьютерной установкой.

Преобразователь теплового потока содержит последовательно соединенные медно-константановые термопары и дополнительную медно-константановую термопару размещенные в корпусе, залитом эпоксидной смолой [6]. Последовательно соединенные термопары генерируют термоЭДС, пропорциональную тепловому потоку, проходящему через преобразователь теплового потока, а дополнительная встроенная термопара генерирует термоЭДС, пропорциональную температуре поверхности, на которой расположен преобразователь. Чувствительной стороной преобразователя является та, при которой измеряемые значения теплового потока являются положительными, если температура поверхности выше температуры окружающей среды.

Аналоговые электрические сигналы, поступающие с последовательно соединенных термопар и дополнительной термопары на АЦП, преобразуются в цифровую форму и поступают на ЭВМ, где в реальном масштабе времени отображаются на экране монитора и сохраняются в виде файла числовых данных на жестком диске.

Оценки энтропии производят по результатам воздействий на перципиента различными эндогенными (внутренними) и экзогенными (внешними) индукторами.

Экзогенным (внешним) воздействием на сознание перципиента(ов) может быть психотерапия, лечение методами нетрадиционной медицины, гипноз, прослушивание лекций и уроков; восприятие на слух научного текста, решение задаваемых задач на

устный счет, вызывающие интеллектуальную нагрузку; восприятие на слух художественного текста, молитв, воздействие танца и театральных представлений, вызывающих эмоциональную нагрузку. При этом индуктором является другой человек. Экзогенным воздействием также является прослушивание музыки или просмотр фильмов, при этом музыка или фильмы выполняют роль индуктора. Экзогенным является воздействие приборов и полей различной природы (например, КВЧ-излучение, фотостимуляция) и т. д. При этом приборы и поля выполняют роль индуктора.

Эндогенным (внутренним) воздействием на сознание перцепиента(ов) может служить самостоятельное решение задач, устный счет и проработка учебного материала в уме, вызывающие интеллектуальную нагрузку; внутренняя молитва, самогипноз, медитация, физические, в том числе дыхательные упражнения, положительные и отрицательные мысленные образы и воспоминания, вызывающие эмоциональную нагрузку; а также прием внутрь перцепиентом различных химических и лекарственных препаратов. Способ позволяет также регистрировать энергоинформационные потоки нескольких взаимодействующих лиц. Результат представлен в виде зависимости степени хаоса  $K_x$  от времени. Энергоинформационные потоки более хаотичны при больших значениях  $K_x$  и более упорядочены при малых значениях этого параметра.

До воздействия, в ходе и после воздействия производятся непосредственные измерения плотности теплового потока и температуры на локальных участках тела человека. Затем производится пересчет полученных данных относительных нормированных значений хаоса и порядка в соответствии с формулами (1), (3), (5).

Проведенные исследования демонстрируют возможность проведения оценки состояния энергоинформационных процессов в организме, как при эндогенном (внутреннем), так и при экзогенном (внешнем) воздействии. Из этих примеров следует, что различные процессы можно сопоставить между собой и оценить степень порядка или хаоса сознания человека.

## Литература

1. W. B. Lucas. Regression Therapy. CA. Deep Forest Press, 1993, Volume 1 606 p., Volume 2 542 p.
2. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука, 1986, 192 с.
3. Дульнев Г.Н. Энергоинформационный обмен в природе. СПб.: ИТМО, 2000, 135 с.
4. Дульнев Г.Н. Введение в синергетику. СПб.: Проспект, 1998, 256 с.
5. Дульнев Г.Н., Ипатов А.П. Исследование явлений энергоинформационного обмена: экспериментальные результаты. СПб.: ГИТМО (ТУ), 1998, 70 с.
6. Геращенко О.А. Основы теплотрии. Киев: Наукова думка, 1971, 191 с.
7. Гаваа Лувсан. Традиционные и современные аспекты восточной рефлексотерапии. М.: Наука, 1986, 575 с.
8. Кораблёв В.А., Тахистов Ф.Ю., Шарков А.В. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2003, 44 с.
9. Коваленко А. Н., Носырев С. П., Григорьев В. А., Горячев Ю. П. Синергетический подход к диагностике критических состояний человека. Медицина экстремальных состояний, 1999, № 3, стр. 72 – 74.
10. Дульнев Г.Н. и др. Регистрация нетрадиционного способа передачи информации. // Сознание и физическая реальность. 2002. № 6.
11. Попов В.П., Крайнюченко И.В. Управление, эволюция, информация. Эссенцуки: ЕИУБиП, 2001, 254 с.
12. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. М.: Иностранная литература, 1968.
13. Хлуновский Н., Латышев С.Н., Васильева Г.Н. Исследование информационных процессов между субъектами. Приборостроение. Известия ВУЗов, Тематический выпуск «Исследование биоэнергоинформационных процессов», СПб.: ГИТМО, т. 36, № 6, 1993.
14. Дульнев Г.Н. В поисках тонкого мира. СПб.: Весь, 2004, 286 с.



# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СКАНИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ЯМР-ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.О. Казначеева

Научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина

В статье рассматриваются параметры сканирования при исследованиях на ЯМР-томографах и их влияние на пространственное разрешение получаемого изображения и интенсивность регистрируемого сигнала. Рассмотрено влияние на качество изображения таких параметров, как толщина среза, матрица изображения, количество повторений, время релаксации и др.

В общем случае качество регистрируемого изображения в МР-томографии зависит преимущественно от соотношения сигнал/шум. Отношение сигнал/шум зависит как от параметров импульсной последовательности (ИП), так и от параметров, определяющих область сканирования (поля зрения, толщины среза, расстояния между срезами, матрицы изображения, числа повторений).

Время появления эхо-сигнала ( $T_E$ ) представляет собой время между центром первого возбуждающего импульса и пиком эхо-сигнала. Задавая минимальное  $T_E$  с полным снятием эхо-сигнала, можно увеличить соотношение сигнал/шум по сравнению с изображениями, полученными при минимальном  $T_E$  с частичным снятием эхо-сигнала. Снятие частичного эхо-сигнала позволяет сократить время приложения считывающего градиента и уменьшить время появления эхо-сигналов. Поскольку время действия градиента уменьшено, расфазированная часть эхо-сигнала считывается не полностью, отношение сигнал/шум увеличивается за счет уменьшения полосы частот, а влияние артефактов потока и магнитной восприимчивости на качество изображения уменьшается. В параметрах исследования можно задать количество эхо-сигналов. Каждому эхо-сигналу будет соответствовать изображение, а изображения, соответствующие последним эхо-сигналам, характеризуются низким соотношением сигнал/шум и повышенной контрастностью на  $T_2$ -изображениях. С другой стороны, получение данных с различным числом эхо-сигналов позволяет получать изображения с различной взвешенностью.

Период повторения ( $T_R$ ) представляет собой интервал между двумя возбуждающими радиочастотными (РЧ) импульсами и определяет значение восстанавливающейся продольной намагниченности. Уменьшение времени  $T_R$  приводит, с одной стороны, уменьшению времени сканирования и влияния артефактов потока, а с другой стороны – к уменьшению числа срезов и отношения сигнал/шум (рис. 1).

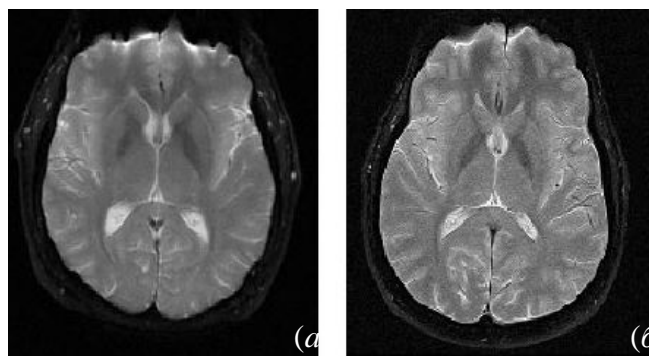


Рис. 1. Влияние периода повторения на качество изображения (а)  $T_R=2500$  мс; (б)  $T_R=3500$  мс

Для некоторых ИП (например, инверсия-восстановление) можно задать длину эхотрейна (ETL), представляющую собой число эхо-сигналов в течение одного установленного периода  $T_R$ . Изменение длины эхотрейна может в несколько раз (от двух до шестнадцати) увеличить объем получаемых данных за один период  $T_R$ , что сокра-

щает время сканирования. При получении каждого эхо-сигнала в такой ИП используется фазокодирующий градиент с определенной амплитудой, при этом каждый эхо-сигнал записывается в одну строку К-пространства. Параметр ETL позволяет получать изображения с высоким разрешением при сверхдлинных периодах TR за приемлемое время сканирования. Этот способ используется при получении изображений в миелографии, изображениях головного мозга с повышенными T2-взвешенностью и отношением сигнал/шум, изображений протонной плотности для структур с большим временем T1-релаксации и увеличивать число возможных срезов. Недостатком увеличения параметра ETL является нечеткость контуров на получаемом изображении.

В ИП «градиентное эхо» можно задавать угол поворота вектора намагниченности под воздействием РЧ-импульса. Выбор угла отклонения определяется в зависимости от требуемой взвешенности и отношения сигнал/шум и влияет на общую интенсивность сигнала, которая уменьшается со временем. Увеличение угла отклонения приводит к T1-взвешенности, а его уменьшение – к T2\*-взвешенности, поэтому изображения, полученные с помощью ИП «градиентное эхо», могут характеризоваться более низким соотношением сигнал/шум, чем изображения, полученные с помощью ИП «спин-эхо».

При сканировании можно задать полосу частот, т.е. диапазон частот, принимаемых МР-томографом. При уменьшении полосы частот уменьшается диапазон принимаемых частот МР-сигнала, что приводит к уменьшению количества регистрируемых шумов и способствует увеличению отношения сигнал/шум. При этом увеличивается время регистрации данных, а на качество получаемого изображения больше влияния оказывают артефакты движения и химического сдвига.

Поле зрения (FOV) представляет собой визуализируемую анатомическую область и должно соответствовать области сканирования. Для обеспечения оптимального пространственного разрешения размер FOV должен превышать общее количество срезов за один скан, умноженное на толщину одного среза. Размер пиксела (пространственное разрешение) можно рассчитать, разделив размер FOV на размер матрицы сбора данных в направлении фазового или частотного кодирования. По мере уменьшения размера пиксела отношение сигнал/шум снижается, так как меньшее число протонов создает сигнал для каждого пиксела (рис. 2). При прочих равных условиях отношение сигнал/шум пропорционально квадрату FOV. Для компенсации снижения отношения сигнал/шум можно увеличить число повторений (NEX), изменить период TR или толщину среза. Можно также уменьшить размер матрицы или время TE, т.е. повысить интенсивность сигнала, и, соответственно, качество изображения.

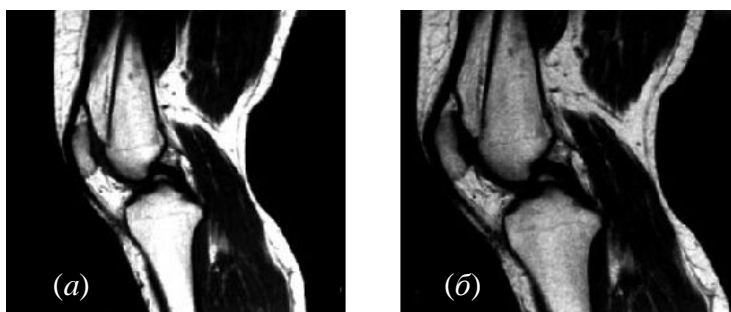


Рис. 2. МР-изображения, полученные с FOV 25 см (а) и 20 см (б)

Качество получаемого изображения зависит и от толщины среза. В общем случае с уменьшением толщины среза улучшается разрешение, но ухудшается отношение сигнал/шум. Минимально допустимая толщина среза зависит от режима сканирования и возможностей МР-томографа. При установке этого параметра сканирования необходимо принимать во внимание характер исследуемой структуры. Так, при сканировании мелких анатомических структур (гипофиз, внутреннее ухо), чтобы избежать потерь информации, сле-

дует использовать тонкие срезы, а при сканировании, например, брюшной полости – более толстые срезы. При этом следует принимать во внимание, что чем толще срез, тем сильнее объемный парциальный эффект, поэтому некоторые структуры могут быть неразличимы на изображении. С другой стороны, у более толстого среза будет выше отношение сигнал/шум. Если же необходимо сканирование тонкими срезами, то, чтобы избежать зернистости изображения, связанной со слабым сигналом, можно увеличить размер поля зрения, число повторений или время TE. Следует отметить, что в одной ИП можно задать только одну толщину среза.

Для всех режимов, кроме визуализации сосудов, задается расстояние между срезами. При этом, задавая большое расстояние между срезами, мы можем расширить область визуализации и границы сканирования. Если заданы небольшие промежутки между срезами (обычно 20% от толщины среза), то это позволит снизить перекрестные помехи, связанные с частичным возбуждением прилегающих срезов и их рефокусированием  $180^\circ$  РЧ-импульсом. Эти помехи снижают контрастность изображений и отношение сигнал/шум из-за расхождения ожидаемого и действительного значений периода TR.

Число срезов, получаемых в течение одного сканирования, автоматически рассчитывается МР-томографом на основе заданных толщины среза и расстояния между срезами. За заданное время сканирования можно получить ограниченное число срезов. Если задано слишком много срезов, система автоматически увеличивает число сканов. Соответственно, увеличится и время сканирования. Для уменьшения времени сканирования можно увеличить период TR, сократить время TE или уменьшить использование импульсов преднасыщения, но такие меры могут ухудшить контрастность исследуемых тканей на изображении. Другой способ уменьшения времени сканирования – использовать не наклонную, а ортогональную плоскость. Также можно задать меньшую область сканирования, чтобы уменьшить число срезов, увеличить FOV, толщину среза или расстояние между срезами, чтобы выполнить сканирование нужной области с использованием меньшего числа срезов.

На разрешение изображения влияет матрица сбора данных, которая показывает число шагов фазового и частотного кодирования. Чем больше точек считывания данных (шагов фазового и частотного кодирования), тем выше разрешение. Матрица может быть квадратной или асимметричной. При этом число шагов частотного кодирования может составлять 256 или 512, а число шагов фазового кодирования можно задать в диапазоне от 128 до 512 с шагом 32. Уменьшение размера матрицы способствует снижению времени сканирования, но приводит к ухудшению разрешения (рис. 3). Стандартное разрешение обеспечивается при матрице размером  $256 \times 256$ . Увеличение размера матрицы повышает разрешение, но при этом сканирование занимает больше времени. Высокое разрешение обеспечивается при матрице размером  $512 \times 512$ .

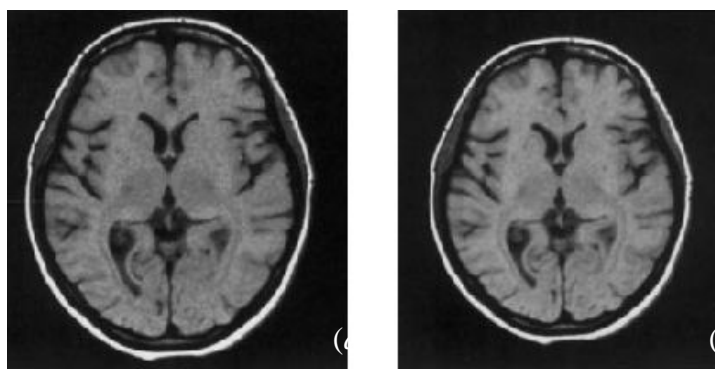


Рис. 3. Влияние матрицы на пространственное разрешение и отношение сигнал/шум:  
(а) матрица  $256 \times 256$ , (б) матрица  $192 \times 192$

Размер матрицы, размер поля зрения и фазовый коэффициент поля зрения (коэффициент размера FOV в направлении фазового кодирования), определяют размер и форму пиксела, которые, в свою очередь, определяют разрешение изображения. При этом размер пиксела по каждой из осей будет равен отношению поля зрения к размеру матрицы. Если выбрана опция визуализации «квадратный пиксел», форма пиксела всегда будет квадратная, а его размер определяется только числом шагов частотного кодирования. Асимметричная матрица формирует прямоугольный пиксел. Для того чтобы получить приемлемое изображение исследуемой области, необходимо правильно подобрать значения размера и формы матрицы, поля зрения, формы пиксела и фазового коэффициента поля зрения. Если фазовый коэффициент поля зрения меньше 1 и выбрана симметричная матрица, то пиксел будет квадратным, а поле зрения – прямоугольным. Если фазовый коэффициент поля зрения меньше 1 и выбрана асимметричная матрица, то и пиксел, и поле зрения будут прямоугольными. Если фазовый коэффициент поля зрения равен 1 и выбрана асимметричная матрица, то пиксел будет прямоугольным, а поле зрения – квадратным.

Число повторений (NEX) представляет собой количество повторов операций фазового кодирования при получении данных. Отношение сигнал/шум пропорционально квадратному корню из числа повторений. Так, увеличение числа повторений с 2 до 4 приводит к увеличению отношения сигнал/шум на 40% и удвоению времени сканирования. Как правило, при увеличении разрешения необходимо увеличить и число повторений (исключением является трехмерное получение данных). Поэтому важно выбрать число повторений, при котором обеспечивается приемлемое для исследования отношение сигнал/шум (рис. 4). Слишком высокое отношение сигнал/шум приводит к лишней потере времени, а слишком низкое – к получению недостоверных изображений.

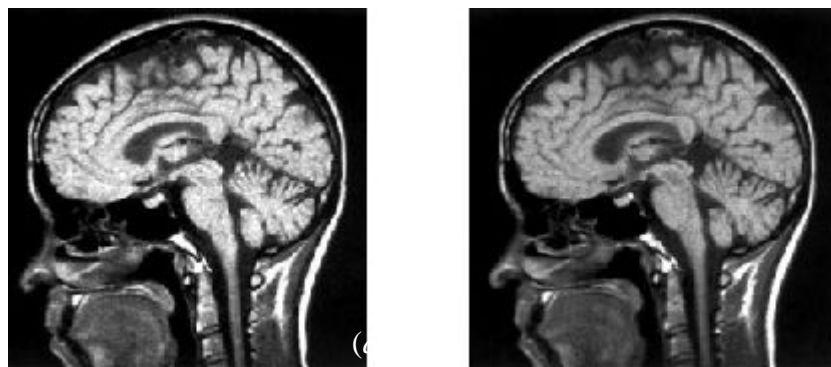


Рис. 4. Влияние числа повторений на качество изображений: (а) NEX=1, (б) NEX=2

Таким образом, целый ряд параметров сканирования влияет на качество получаемого изображения. Однако не всегда изменение параметров сканирования и увеличение соотношения сигнал/шум приводит к заметному повышению качества изображения. Чаще всего, чтобы добиться оптимального соотношения качества изображения и времени исследования, необходимо учитывать влияние целого ряда параметров на качество получаемых данных и оценивать степень влияния каждого параметра на соотношение сигнал/шум и время исследования.

## Литература

1. Stark D.D., Bradley W.G. Magnetic resonance imaging. (3rd ed.). St. Louis: Mosby. Stiris, MG, 2000.
2. Teitelbaum G.P., Bradley W.G., Klein B.D. MR imaging artifacts, ferromagnetism, and magnetic torque of intravascular filters, stents, and coils. // Radiology. 1988. V. 166. P. 657–664.
3. Ринк П.А. Магнитный резонанс в медицине. М.: Издательский дом «ГЭОТАР-МЕД», 2003.

# СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МР-ТОМОГРАФОВ

А.О. Казначеева

Научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина

В статье рассмотрены особенности работы нескольких сверхпроводящих магнитно-резонансных томографов производства различных фирм, рассчитаны основные эксплуатационные расходы. Приведены рекомендации по особенностям использования различных моделей сверхпроводящих томографов.

На современном рынке магнитно-резонансной аппаратуры представлено множество различных моделей магнитно-резонансных (МР) томографов. Основным признаком, по которому различают МР-томографы, это тип источника основного магнитного поля. Существует три основных вида МР-томографов: на постоянных, резистивных и сверхпроводящих магнитах.

Системы на постоянных магнитах не требуют энергии для поддержания магнитного поля и, соответственно, не требуют охлаждения. Капитальные и эксплуатационные затраты на постоянные магниты невелики, а качество получаемого изображения достаточно, несмотря на низкое соотношение сигнал/шум. К недостаткам таких систем надо отнести их большой вес (около 20 тонн), чувствительность к колебаниям температуры. Напряженность поля таких систем, как правило, не превышает 0,3 Тл, а само поле направлено вертикально, что влияет на использование приемопередающих катушек.

Резистивные магниты потребляют большую мощность и, следовательно, для них нужна мощная охлаждающая система. Верхний предел напряженности магнитного поля составляет до 0,7 Тл. Для таких магнитов характерны наличие поля рассеяния, которое можно почти полностью убрать с помощью экрана, но за счет дополнительного увеличения веса. Такие системы удобны для пациента, не требуют криогенных жидкостей, а их поле можно выключать. Они позволяют реализовывать более сложные методы получения изображения, но имеют низкое соотношение сигнал/шум.

Но наибольшими возможностями обладают МР-системы на основе сверхпроводящих магнитов. Они обеспечивают высокую однородность магнитного поля, высокое соотношение сигнал/шум и позволяют реализовывать сложные методы получения изображений (например, ангиографию). Лишь сверхпроводящие магниты позволяют реализовать ЯМР-спектроскопию в силу их способности создавать очень сильные магнитные поля в больших объемах.

К недостаткам сверхпроводящих систем можно отнести их высокую стоимость (\$1,5–2,5 млн.), и, хотя они не потребляют электроэнергию, но расходуют дорогие криогенные жидкости (азот, гелий), что увеличивает эксплуатационные расходы. Эти недостатки могут препятствовать использованию сверхпроводящих МР-томографов в отдаленных населенных пунктах и частных клиниках, где требуется быстрая окупаемость техники. С другой стороны, высокие цены на электроэнергию и воду удорожают эксплуатацию резистивных томографов.

В настоящее время в Санкт-Петербурге установлены и эксплуатируются более 20 МР-томографов различных видов, и больше половины из них составляют модели на основе сверхпроводящих магнитов.

Сравним эксплуатационные расходы различных моделей сверхпроводящих МР-томографов, основываясь на их паспортных данных. При этом затраты на амортизацию учитывать не будем, поскольку точные данные о цене изделия отсутствуют. Затраты на печать снимков, накладные расходы и зарплату персонала будем считать примерно равными для всех типов МРТ и в силу сравнительной оценки учитывать не будем.

Загрузка МР-томографов колеблется от 1,5 до 2,5 смен в день в зависимости от стоимости обследования, удаленности от центра города, времени года и других обстоятельств. Данные приведены в расчете на 2-сменную работу при шести рабочих днях в неделю. Время работы сверхпроводящего МР-томографа составляет 12 часов в день.

| Характеристика                       | Модель томографа |                 |                   |        |            |                |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|--------|------------|----------------|
|                                      | Magnetom Impact  | Magnetom Vision | Magnetom Symphony | Vectra | Open Speed | Signa Infinity |
| Изготовитель                         | Siemens          | Siemens         | Siemens           | GE     | GE         | GE             |
| Год выпуска                          | 1993             | 1993            | 1997              | 1993   | 2002       | 2003           |
| Напряженность поля, Тл               | 1,0              | 1,5             | 1,5               | 0,5    | 0,7        | 1,5            |
| Потребление гелия, л/час             | 0,3              | 0,075           | 0,075             | 0,075  | 0,03       | 0,03           |
| Средний интервал заправки, мес       | 4                | 6               | 18                | 4      | 6          | 36             |
| Поле обзора, м                       | 0,4              | 0,4             | 0,5               | 0,4    | 0,4        | 0,48           |
| Длина магнита, м                     | 1,6              | 1,6             | 1,7               |        | -          | 1,6            |
| Максимальный градиент, мТл/м         | 15/20            | 25              | 30                | 8,5    | 15         | 33             |
| Удельный расход электроэнергии, кВт: |                  |                 |                   |        |            |                |
| - градиентная система                | 40               | 45              | 45                | 10     | 32         | 38             |
| - криокулер и кондиционер            | 7                | 8               | 8                 | 7      | 7,9        | 8              |
| Срок службы головки криокулера, лет  | 2                | 2               | 2                 | 2      | 3          | 3              |
| Эксплуатационные расходы, руб/мес    | 45237            | 27804           | 27804             | 16572  | 19051      | 20954          |
| Пропускная способность, чел/мес      | 460              | 600             | 620               | 400    | 400        | 620            |

Основные характеристики рассматриваемых томографов приведены в таблице.  
Таблица. Основные характеристики сверхпроводящих МР-томографов

При расчете потребления гелия всеми сверхпроводящими МР-томографами следует учитывать разницу между объемомкупаемого гелия и его фактическим расходом (датчик уровня). Эта разница вызвана технологическими потерями при заливке гелия в криостат и может достигать 10–15%.

Для сравнения экономической эффективности проведения исследования на сверхпроводящем МР-томографе необходимо учитывать затраты на электроэнергию, потребляемую градиентной подсистемой и криокулером, а также срок службы самого криокулера. Таким образом, в соответствии с таблицей, ежемесячные затраты на среднеполюсных (поле 0,2–0,5 Тл) томографах будут примерно одинаковы, а на высокополюсных (поле более 0,5 Тл) томографах будут тем ниже, чем более современен томограф.

Затраты времени можно рассчитать условно разделив обследование на следующие этапы: подготовка пациента к исследованию, подготовка МР-системы, проведение сканирования, анализ полученных результатов и постобработка полученных данных. Приведем анализ временных затрат на выполнение этих этапов.

Подготовка пациента включает в себя проверку на наличие металлических предметов, беседу с пациентом о процедуре обследования, позиционирование пациента и транспортировку его в изоцентр магнита. Временные затраты при этом определяются, в основном, типом используемого магнита и требованиями техники безопасности и, как правило, несколько возрастают с увеличением магнитного поля.

Подготовка системы заключается в установке необходимой радиочастотной катушки и ее настройке на пациенте. В ряде моделей настройка катушек может выполняться более упрощенно или вообще отсутствовать.

Сканирование пациента является важнейшим и неотъемлемым этапом обследования. Как правило, реализуется не менее четырех стандартных исследовательских программ для получения T1- и T2-изображений в 3-х ортогональных плоскостях, а в более сложных случаях для определения характера патологии возникает необходимость выполнения дополнительных специфических программ. Временные затраты на выполнение этого этапа, главным образом, зависят от типа используемой системы и диагностической задачи. Например, при выполнении рутинного исследования высокопольные системы дают преимущество во времени по сравнению с низкопольными при том же качестве и параметрах получаемых изображений. Однако возможное только в высокопольных системах уменьшение толщины среза и размера пиксела изображения (уменьшение площади сканируемого слоя, увеличение матрицы изображения) с целью воспроизведения мелких анатомических структур приводит к резкому ухудшению качества изображений из-за падения отношения сигнал/шум, компенсация которого возможна только за счет увеличения длительности сканирования. Следует отметить, что к низкопольным и высокопольным томографам предъявляются разные требования по качеству диагностики, и не все виды томографических исследований (ангиография, миелография) возможны на низкопольных МР-томографах. Для высокопольных МР-томографах выше доля пациентов с заболеваниями, требующими углубленного, иногда эксклюзивного, исследования. Сложившийся на практике контингент обследуемых с наиболее сложными для диагностики заболеваниями, когда требуется получение томограмм лучшего качества (толщина слоя до 1 мм, матрица 256×512) и использование дополнительных режимов сканирования, не позволяет значительно сократить время сканирования на высокопольных МР-томографах. Таким образом, среднее время сканирования при обследовании по стандартной программе на высокопольных МР-томографах составляет в среднем 25 минут, а на среднепольных – 45 минут.

Последний этап, связанный с анализом результатов обследования, не требует дополнительных затрат времени работы основного оборудования МР-томографа (при наличии дополнительного рабочего места). Практически все современные томографы оснащены дополнительной рабочей станцией, позволяющей реконструировать изображения с помощью специализированного программного обеспечения.

Пропускная способность томографа определяется временем, затрачиваемым на обследование одного пациента, и для среднепольных систем составляет 45–50 минут, а для высокопольных систем – около 30 минут. При 2-сменной загрузке для томографов с полем менее 1 Тл поток составит 380–450 человек, а для систем с полем 1,5 Тл – около 600 исследований в месяц. Экономические характеристики эксплуатации сверхпроводящих МР-томографов лучше для современных высокопольных систем, загруженных более чем на 2 смены. Это объясняется более низким расходом криогенных веществ в современных аппаратах и отсутствием зависимости их расхода от степени загрузки МРТ.

Таким образом, наиболее эффективной является эксплуатация современных высокопольных МР-томографов различных фирм за счет сокращения времени исследования, снижения потребления криогенных жидкостей и увеличения срока службы некоторых компонент системы. Следует также отметить, что более высокая стоимость исследования на высокопольных системах оправдывается высоким качеством получаемых томограмм и возможностью проведения сложных, нестандартных исследований, которая часто невозможна на низкопольных системах.

## Литература

1. GE Healthcare: Magnetic resonance Imaging [http://www.gemedicalsystemseurope.com/euen/rad/mri/homepage\\_mr.html](http://www.gemedicalsystemseurope.com/euen/rad/mri/homepage_mr.html)
2. Siemens: Medical Solutions. <http://www.medical.siemens.com>

# АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ТОМОГРАФИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

А.О. Казначеева

Научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина

В статье сравнивается информативность данных, получаемых при исследованиях различных структур некоторыми томографическими методами. Рассмотрены основные преимущества и недостатки таких исследований, приведены рекомендации по повышению информативности исследований.

Современный уровень медицинской техники позволяет проводить широкий спектр исследований на одной медицинской установке. Зачастую выявить структурные и функциональные изменения одного и того же органа можно с помощью устройств, имеющих различный принцип действия, при этом достоверность полученных данных будет сопоставима. В подобных условиях на первое место выходит информационная составляющая исследований.

На данном этапе наиболее информативными считаются томографические методы: магнитно-резонансная, рентгеновская компьютерная и позитронно-эмиссионная томография. Популярность этих методов, несмотря на их высокую стоимость, связана с возможностями исследования объектов с различным химическим составом и построения трехмерных моделей по полученным данным. На информативность метода и достоверность получаемых данных влияет целый ряд факторов, зависящих, в первую очередь, от физико-технических принципов реализации метода. Рассмотрим основные томографические методы получения информации и сравним их информативность.

Наибольший процент в парке томографической техники приходится на рентгеновские компьютерные томографы. Это связано с их относительно низкими эксплуатационными затратами при высокой пропускной способности. Исследование здесь длится менее двух минут, тогда как в других томографических методах его продолжительность может достигать часа. Основным недостатком этого метода является наличие рентгеновского излучения, влияние которого на пациентов и персонал необходимо учитывать.

Рентгеновская томография является наиболее универсальным методом, поскольку позволяет исследовать не только биологические, но и промышленные объекты, хотя размер последних ограничен диаметром апертуры гентри. Регистрируемый сигнал измеряется в единицах Хаунсфилда. Современный рентгеновский томограф позволяет регистрировать интенсивности сигналов в диапазоне от -3000 до +3000 единиц Хаунсфилда. Для стандартного тестового объекта, состоящего из пластиковой формы, заполненной водой, яркости пикселей изображения находятся в диапазоне от -1000 (для воздуха) до +100 (для пластика) единиц Хаунсфилда, а отклонение интенсивности сигнала составляет около 3 единиц. Следовательно, в данном диапазоне можно говорить о погрешности 0,27%. Вместе с тем, интенсивности сигналов для большинства биологических тканей лежат в узком диапазоне от -100 до +75 единиц и в этом случае ошибка составит 3,4%.

Ограничения в использовании рентгеновской томографии связаны с конструкцией самого томографа, которая позволяет непосредственно получать изображения только в плоскости, поперечной основной оси томографа, что вносит существенные ограничения в информативность исследования. В последних моделях томографов конструкция позволяет наклонять гентри на угол до 30° и получать срезы под некоторым углом, а современное программное обеспечение позволяет реконструировать изображения в любой плоскости.

Информативность получаемых данных при исследованиях на рентгеновском томографе зависит от наличия ряда артефактов, в том числе и от металлических объектов. Ар-



тефакты от металла присутствуют только в срезе, непосредственно проходящем через сам металлический объект, и их довольно легко устранить или снизить, подобрав параметры сканирования. Другим фактором, влияющим на достоверность получаемых данных, является температура окружающей среды. Это связано с тем, что рентгеновский томограф с некоторой периодичностью нуждается в калибровке, которая зависит от условий внешней среды. Резкие перепады температуры приводят к повышению уровня шума на изображениях и снижению точности измерений. Этот артефакт устраняется повторной калибровкой аппарата, но при частом повторении процедуры калибровки снижается срок службы рентгеновской трубки – самого дорогого расходного материала.



Рис. 1. Изображения фантома в КТ и МРТ

В позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) патологически измененные клетки, поглощающие радиоактивные изотопы, дают на изображении сигнал большей интенсивности, чем клетки здоровых тканей. Это позволяет выявить функциональные изменения еще до возникновения каких-либо структурных изменений. Вместе с тем, даже здоровые клетки, участвующие в процессах нервной деятельности (например, мышления), также поглощают радиоактивный препарат более интенсивно и, соответственно, дают сигнал большей интенсивности. Все получаемые данные представляются по цветной шкале.

Использование в ПЭТ радиоактивных изотопов с коротким периодом полураспада одновременно является достоинством и недостатком этого метода. С одной стороны, они быстро выводятся из организма. С другой стороны, быстрый распад изотопов накладывает ограничения на область исследования и продолжительность его проведения.

Как и в рентгеновской томографии, свои ограничения на виды ПЭТ-исследований накладывает конструкция томографа. Как правило, апертура гентри ПЭТ-сканера имеет диаметр, позволяющий проводить исследования небольшой области. Увеличение диаметра приводит к повышению ошибки сбора данных в интенсивности сигнала и местоположении области интенсивного сигнала. Поэтому чаще всего этот вид томографов используется только для проведения исследований головного мозга, хотя томографы для исследований всего тела также существуют. Исследования промышленных объектов на ПЭТ-сканерах практически не ведутся.



Рис. 2. ПЭТ и КТ изображения и их совмещение

ПЭТ является единственным томографическим методом, позволяющим проводить исследования тканей на функциональном уровне, что является его несомненным пре-

имуществом. Но при этом получаемые данные не дают достоверной информации о самой структуре исследуемого объекта. Сравнительно недавно появился новый вид томографов, конструктивно представляющих собой два совмещенных томографа - рентгеновский и позитронно-эмиссионный. Этот томограф позволяет одновременно оценивать как структурные, так и функциональные изменения в некоторой конкретной области (рис. 2).

Наиболее часто используемый в силу своей высокой информативности метод – это магнитно-резонансная томография (МРТ). Он позволяет довольно точно разделить два сигнала, отличающихся по интенсивности менее чем на 1%. На МР-томограммах лучше, чем на рентгеновских томограммах, отображаются мягкие ткани, а для получения изображений сосудов не требуется введение контрастного препарата. В этом методе отсутствует ионизирующее излучение, поэтому исследования можно проводить с требуемой периодичностью. Несомненным преимуществом МРТ по сравнению с прочими томографическими методами является возможность непосредственного получения изображений срезов не только в трех ортогональных плоскостях, но и в любой плоскости, расположенной под произвольным углом.

Интенсивность регистрируемого сигнала на МР изображении и соотношение сигнал/шум зависят от целого ряда параметров (типа используемой импульсной последовательности, матрицы изображения, количества повторений сбора данных). При получении изображения тестового объекта, представляющего собой пластиковую форму, заполненную водным раствором, с помощью наиболее часто используемой спин-эхо последовательности интенсивность сигнала от воды составляет около 1300 единиц, а среднее значение шума составляет менее 0,5 %. К недостатками МРТ можно отнести высокую продолжительность исследования, в течение которого пациент должен лежать неподвижно. Продолжительность сложных нестандартных исследований может достигать часа.

Препятствием для проведения МР томографии является наличие металла у отображаемого объекта. Металл вносит существенные искажения в однородность магнитного поля, поэтому на всех отображаемых срезах возникают артефакты от металла, которые тем сильнее, чем ближе к металлическому объекту находится отображаемый срез (рис. 3). Артефакты от металла могут проявляться не только в отсутствии сигнала, но и в появлении ложных изображений.



Рис. 3. Изображение объекта, содержащего металл в КТ и МРТ

В МР томографии существует целый ряд других артефактов [1], связанных с настройками самого томографа, алгоритмами обработки регистрируемого сигнала и свойствами самого отображаемого объекта. Поскольку любой объект, вносимый в магнитное поле, имеет свою магнитную восприимчивость, он искажает однородность поля, что, в свою очередь, снижает точность полученных данных. При исследованиях пациентов существенные искажения вносятся артефакты от пульсации крови в крупных сосудах и дыхания.

Исследования промышленных объектов с помощью МРТ затруднено, так как любой объект, помещаемый в МР-томограф, должен содержать парамагнитное вещество и

не содержать металлических частиц. С другой стороны, МР-томография является незаменимым методом неразрушающего контроля качества продуктов питания и проведения анализа спектрального состава.

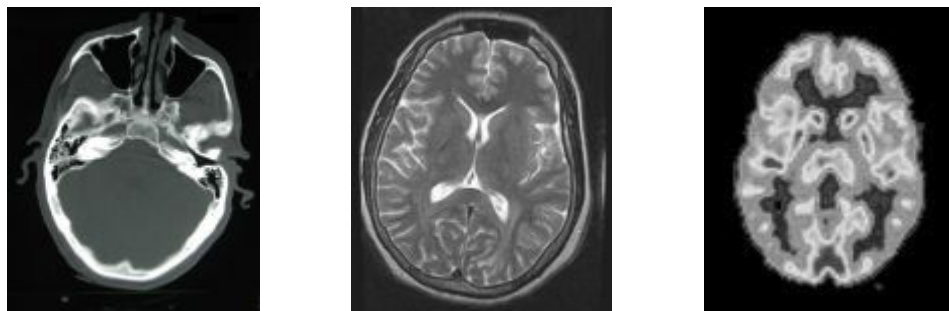


Рис. 4. Изображения головного мозга, полученные на различных томографах (КТ, МРТ, ПЭТ)

Таким образом, наиболее эффективным томографическим методом при исследованиях биологических тканей является МР-томография [2–3]. Компьютерная томография более информативна в случае исследования промышленных объектов и необходимости быстрого проведения исследования. Информативность ПЭТ велика при функциональных исследованиях в случае отсутствия структурных изменений области интереса.

## Литература

1. Казначеева А.О. Устранение искажений МР-изображений. / Современные технологии. Сборник статей. Под ред. С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. С.140–145.
2. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Устройства для контроля качества изображений в ЯМР-томографии. / Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 243–246.
3. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Информационная совместимость данных в томографии: / Материалы IX Международной конференции «Региональная информатика - 2004», СПб.: 2004. С. 333–334.

# ЛАЗЕРНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ – НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

А.В. Ефименко, Ю.С. Монахов

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

Статья посвящена рассмотрению средств реализации биологической обратной связи для сканирующих лазерных медицинских установок. Подробно рассмотрены механизмы реализации указанных схем на базе контроля пульса и артериального давления. Также рассмотрены возможности построения обратных связей с использованием оптической когерентной томографии.

Находящиеся сегодня на отечественном рынке установки, осуществляющие процедуру лазеротерапии, в своем большинстве не имеют технических средств для контроля за проведением процедуры облучения. Их режим работы основан на некоторых эмпирических данных, заложенных производителем или вводимых врачом, проводящим процедуру. Такой подход имеет очевидные недостатки, так как он не учитывает индивидуальных особенностей каждого пациента. Эффективность воздействия в таком режиме зависит от опыта и, в некоторой мере, от интуиции врача-оператора, задающего параметры работы установки.

Это можно пояснить на примере. До сих пор рекомендуемые параметры плотности мощности излучения в разных руководствах отличаются в сотни раз и более (от 0,5 до 200 мВт/см<sup>2</sup>), а рекомендуемые дозы варьируют от 0,1 до 120 Дж/см<sup>2</sup>. Анализируя сложившиеся представления об оптимальных параметрах лазерной терапии и параметры выпускаемых разными фирмами лазеров, некоторые авторы пришли к выводу, что «в медицинской практике по существу используется неконтролируемое воздействие лазерного излучения на пациента».

Отсюда встает вопрос о необходимости разработки технических систем для реализации обратных связей от пациента к установке, называемых биологическими обратными связями (БОС).

Проведенные совместно с учеными из ОрелГТУ исследования механизмов взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения (НИЛИ) с тканями человека на основе изучения схем поглощения, отражения и преломления (НИЛИ) показали возможность построения систем БОС на основе учета пульса и артериального давления [1-4].

В основе терапевтического эффекта – сложного биомеханизма взаимодействия низкоэнергетического электромагнитного излучения с живым организмом – лежат фотофизические и фотохимические реакции, связанные с резонансным поглощением энергии излучения биотканью, а также с восприятием энергии излучения и переносом эффекта воздействия жидкими средами организма на нескольких уровнях воздействия. Характер и уровни этих взаимодействий зависят как от спектра излучения, так и от спектральных характеристик биотканей.

В прямых экспериментах на тканевом уровне доказано, что фазы усиления энергетики клеток совпадают с увеличением кровенаполнения ткани. Следовательно, благоприятные моменты лазерного терапевтического воздействия должны приходиться на фазы систолы и вдоха самого больного. Технически это оказалось возможным реализовать в автоматическом режиме биоуправления сигналами с датчиков пульса и дыхания, расположенных на теле пациента. При расположении датчика на меньшем расстоянии от сердца, чем область облучения (патологии), вводится задержка с учетом скорости распространения пульсовой волны. Таким образом, относительно рекомендуемого уровня интенсивности (мощности) лазерного воздействия во время выдоха и во время диастолы уровень интенсивности (мощности) синхронно снижается. Этим достигается устранение относительно сильных воздействий в неблагоприятные моменты, когда из-за уменьшения энергетического обеспечения возможны пессимальные и парабактерные реакции клеток. Наоборот, в моменты увеличения кровенаполнения, увеличения транспорта энергетических метаболитов

и диффузии кислорода в клетки уровень лазерного воздействия достигает рекомендуемого (методикой, утвержденной Минздравом) уровня. Благодаря такой синхронизации изменений интенсивности лазерного воздействия и изменений кровенаполнения ткани резко расширяется диапазон положительных реакций клеток, увеличивается их чувствительность и уменьшается вероятность передозировки лазерного воздействия. Сигналы датчиков пульса (оптическая пара светодиод-фотодиод в виде прищепки на палец) и дыхания (термосопротивления возле носа реагируют на изменение температуры при дыхании) в автоматическом режиме синхронно изменяют в ритмах кровотока интенсивность лазерного излучения.

Обычная глубина амплитудной модуляции суммарного сигнала с датчика пульса и с датчика дыхания составляет 30 %. Однако при определенных видах патологии и локализации патологического очага, когда известно о преимущественном ослаблении микроциркуляции в венозной или в артериальной части капиллярного русла, нарушениях функции преимущественно артериол или венул, соотношение глубин модуляции изменяется в соответствующую сторону.

Термин "биоуправление" используется разными авторами для совершенно разных случаев использования обратных связей и сигналов от биологического объекта. Все предложенные методы используют известные из теории автоматического управления способы регуляции по отклонению или по возмущению, имея целью стабилизировать или удержать в нужном диапазоне регулируемые по обратной связи те или иные параметры биообъекта. Так, например, обеспечивается изменение тока стимуляции биологически активной точки в зависимости от каких-либо ее характеристик (электропроводности, тонуса ткани и др.), нагрузки на организм в зависимости от изменения частоты пульса и т.д. В случае лазерной терапии решается принципиально новая задача синхронизации воздействия с усилением кровенаполнения ткани, что равноценно внутренним многочастотным контурам управления естественных регуляторных систем организма. Согласование путем перестройки местного кровотока в области патологии с центральным кровотоком усиливает взаимосвязь и интегральную целостность всего организма. Решается задача не увеличения стабильности отдельной подсистемы, а усиления взаимозависимости и интеграции центра и периферии за счет искусственной внешней связи. Попытки некоторых авторов использовать лишь отдельные составляющие такого биоуправления, например, использовать сигналы для модуляции лазерного и иного воздействия только с датчика пульса или только с датчика дыхания, в принципе противоречат идеи такого биоуправления. Использование только сигналов датчика пульса или только сигналов датчика дыхания больного может усугубить разбаланс артериального притока и венозного возврата крови в капиллярном русле органа и ткани в месте патологии и затруднить лечение.

Приведенные выше методы контроля проведения процедуры лазеротерапии оказались довольно сложными и недостаточно объективными.

В качестве информационного канала для контроля за состоянием пациента предлагается использование оптической когерентной томографии, позволяющей получать информацию и оценивать состояние тканей человека, подвергающихся воздействию лазерного излучения [5].

Сама оптическая когерентная томография (ОКТ) появилась относительно недавно, примерно 15–20 лет назад. В последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в этой области, обеспечивающей разрешение до единиц микрометров при восстановлении томографических изображений. Технология ОКТ успешно используется для клинической медицинской диагностики состояния кожных покровов человека, в кардиологии, зубоврачебной медицине и некоторых других областях медицины.

Принцип ОКТ состоит в освещении объекта оптическим излучением с определением степени отражения излучения по глубине среды от каждого отдельного слоя. С технической точки зрения основной частью ОКТ является двухлучевой интерферометр, освещаемый источником излучения с широким спектром. В интерферометре излучение разделяется на из-

мерительную волну, освещающую объект, и опорную волну, оптическая длина пути которой может изменяться при управляемом перемещении опорного отражателя.

При формировании трехмерных изображений внутренней структуры среды необходимо учитывать характеристики оптической системы: особенности фокусировки пучка, сканирования, регистрации отраженного излучения и др.

В заключение хочется еще раз отметить, что оптическая когерентная томография является довольно молодым и, вместе с тем, достаточно перспективным направлением развития техники, особенно медицинской, поэтому исследования в области практического применения этого направления кажутся весьма оправданными.

## Литература

1. Евстигнеев А.Р., Дунаев А.В. Медицинские лазерные устройства. Учебное пособие // Орел: изд-во ОрелГТУ, 2005. - 122с.
2. Шалобаев Е.В., Подмастерьев К.В., Корндорф С.Ф., Монахов Ю.С., Дунаев А.В., Ефименко А.В. Лазерная медицинская техника // Сборник трудов Конференции «Оптика и образование – 2004». / Под общей редакцией А.А.Шехонина. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2004. С.85.
3. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Юркова Г.Н., Ефименко В.Т., Ефименко А.В., Корндорф С.Ф., Дунаев А.В. Проблемы создания биологических обратных связей и их применение в сканирующих лазерных медицинских установках // Известия ОрелГТУ. Машиностроение, приборостроение. 2003. Выпуск 4. С.93-97.
4. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Леонтьева Н.В., Ефименко А.В. Некоторые аспекты разработки медицинского сканирующего лазерного стимулятора для проведения физиотерапевтических процедур // Труды 4-й Международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 111-115.
5. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы, перспективы // Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПб.: ГУ ИТМО, 2004. - С.6–30.

# **ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ЭРИТРОЦИТОВ**

**А.Ю. Москалева, О.А. Смирнова**

**Научные руководители –**

**д.т.н., профессор В.А. Тарлыков, д.м.н., профессор С.С. Бессмельцев**

В результате экспериментального исследования деформируемости красных клеток крови в условиях их гипоосмотического набухания обнаружена зависимость жесткости эритроцитарных мембран от плотности мощности лазерного излучения.

## **Введение**

Контроль реологических показателей крови является важным элементом диагностики целого ряда заболеваний и оценки эффективности применяемой терапии, так как многие патологические состояния и заболевания сопровождаются нарушениями реологических свойств крови, приводящими к развитию таких осложнений, как изменения в системе микроциркуляции, гипервискозный синдром, нарушение суспензионной стабильности крови и др.

Одним из основных реологических показателей крови является деформируемость эритроцитов, характеризующая способность красных клеток крови изменять свою форму под действием внешних сил. При различных заболеваниях системы крови (множественной миеломе, истинной полицитемии, анемиях и др.), ишемической болезни сердца, гипертонии и других патологиях отмечается ухудшение деформируемости эритроцитов.

К настоящему времени разработаны различные методы исследования деформируемости эритроцитов. К прямым методам относятся микропипеточные методы, измерения деформации мембраны при различных механических воздействиях на нее [1, 2]. Применение косвенных методов позволяет судить о степени деформируемости эритроцитов по изменению различных параметров, отражающих способность эритроцитов к деформации (фильтрационные, гравиметрические и др. методы) [1–4]. Также деформируемость может быть определена по резистентности эритроцитов к различным воздействиям (химическим, осмотическим и др.), приводящим при превышении порога устойчивости к гемолизу эритроцитов [1, 5, 6]. Все большее распространение в биологии и медицине получают когерентно-оптические методы регистрации, наибольший интерес среди которых представляет применение дифракционного метода.

Для лечения и диагностики заболеваний в последнее время все чаще применяется лазерное излучение. При этом вследствие сложных процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, возможны структурные изменения биологических сред, а также изменения их механических и физических свойств. В связи с этим представляется необходимым выявить характер влияния, оказываемого лазерным излучением на эритроциты и их деформируемость.

## **Методика исследования деформируемости эритроцитов в условиях гипоосмотического набухания**

Исследование влияния плотности мощности лазерного излучения на деформируемость эритроцитов проводили в условиях гипоосмотического набухания эритроцитов, вызванного помещением красных клеток крови в гипоосмотические растворы различной осмолярности.

В изотоническом растворе (концентрация NaCl 0,85%) эритроцит имеет двояковогнутую дискоидную форму. При уменьшении концентрации NaCl в растворе проис-

ходит увеличение объема эритроцитов. Процесс набухания эритроцитов в гипоосмотических растворах за счет поступления внутрь них воды включает в себя два этапа (рис. 1). На первом дискоцит трансформируется в сферу без изменения площади поверхности мембраны до момента сферуляции. На втором этапе сферулированный эритроцит продолжает увеличиваться в объеме за счет растяжения мембраны, испытывая избыточное внутреннее осмотическое давление, вплоть до момента наступления гемолиза [5, 6].

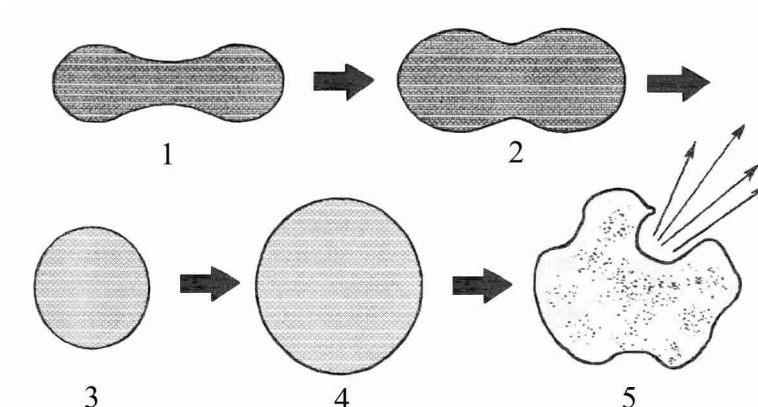


Рис. 1. Трансформация эритроцита при гипоосмотическом набухании: 1 – дискоцит; 2 – набухание дискоцита; 3 – превращение дискоцита в сфероцит; 4 – набухание сфероцита; 5 – гемолиз

Было исследовано 22 образца крови больных множественной миеломой. При множественной миеломе, а также ряде других заболеваний системы крови наблюдаются осложнения, в основе которых лежит нарушение реологических свойств крови с расстройством микроциркуляции, недостаточность кровообращения, острая и хроническая почечная недостаточность и другие, существенно ухудшающие течение болезни. У больных с множественной миеломой при увеличении концентрации патологического белка парапротеина в крови наблюдается снижение деформируемости и усиление агрегационной способности эритроцитов [6, 7].

Кровь для исследования брали из локтевой вены с помощью инъекционной иглы в сухую центрифужную пробирку с антикоагулянтом (гепарин или цитрат натрия в соотношении 1:10). Затем содержимое пробирок дважды подвергали центрифугированию при ускорении 1500g для удаления плазмы и лейкоцитарной пленки.

Для исследования деформируемости полученный осадок эритроцитов помещали в пробирки, которые содержали гипоосмотические растворы с концентрацией NaCl в диапазоне 0,4–0,65%. Пробирки выдерживали при комнатной температуре до наступления стационарного состояния (2 часа). Затем каплю суспензии из каждой пробирки помещали в камеру Горяева.

Относительное изменение среднего диаметра совокупности эритроцитов определяли по изменению линейного размера дифракционных колец на лазерном дифрактометре.

Метод лазерной дифрактометрии, основанный на явлении дифракции лазерного излучения на одиночных и множественных биологических микрообъектах, характеризуется высокой точностью, чувствительностью, быстродействием, минимальным воздействием на объект исследования, возможностью одновременной регистрации большого количества малых частиц. Параметры дифракционной картины однозначно связаны с параметрами микрообъектов, что позволяет определять их размеры, форму, внутреннюю структуру.



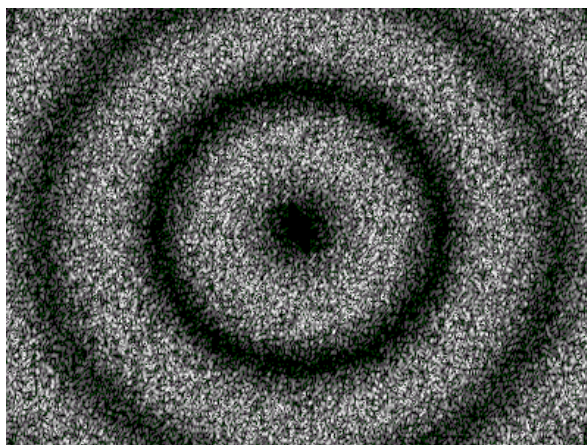


Рис. 2. Распределение интенсивности в дифракционной картине

В случае дифракции на совокупности эритроцитов дифракционная картина имеет вид системы концентрических колец (рис. 2). Расстояние между кольцами связано со средним размером эритроцитов, характеризующим данную совокупность [8]. Эта зависимость является обратно пропорциональной, т.е. чем меньше измеряемый размер  $D$ , тем больше диаметр дифракционного кольца  $l$ . Относительное изменение среднего размера эритроцитов равно по модулю относительному изменению диаметра дифракционного кольца:

$$\frac{\Delta D}{D} = -\frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

где  $\Delta D$  и  $\Delta l$  - изменения среднего размера эритроцитов и диаметра дифракционного кольца соответственно.

Экспериментальная установка, используемая для исследования деформируемости эритроцитов, включает в себя He-Ne-лазер ЛГН 215 ( $\lambda = 0,63$  мкм); оптический аттенюатор, с помощью которого изменяли плотность мощности лазерного излучения в диапазоне  $1 \div 70$  мВт/см<sup>2</sup>; столик для образца; объектив, выполняющий Фурье-преобразование; фотоприемное устройство; персональный компьютер (рис. 3).

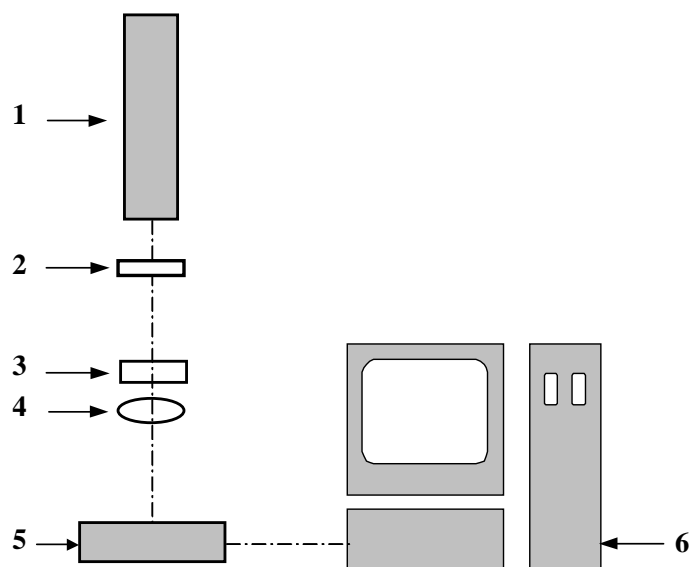


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – He-Ne-лазер ( $\lambda=0,63$  мкм), 2 – оптический аттенюатор, 3 – образец, 4 – объектив, 5 – фотоприемное устройство, 6 – персональный компьютер

## Результаты экспериментального исследования влияния плотности мощности лазерного излучения на деформируемость эритроцитов

Исследование резистентности эритроцитов к воздействию силы осмотического давления, возникающей при помещении эритроцитов в гипосмотическую среду, позволяет рассчитать жесткость эритроцитарных мембран и оценить деформируемость эритроцитов. При гипосмотическом набухании наибольшее влияние на изменение относительного радиуса эритроцита на второй стадии процесса, когда внутри клетки возникает избыточное осмотическое давление [5], оказывает величина жесткости эритроцитарной мембраны [6].

Для каждого образца крови были построены графики изменения относительного радиуса эритроцита в зависимости от концентрации NaCl в растворе во второй фазе гипосмотического набухания при различных значениях плотности мощности лазерного излучения (рис. 4). Для определения жесткости эритроцитарных мембран полученные кривые преобразовывали к линейному виду путем введения нового масштаба по оси абсцисс  $X = \exp^2(C)$ , где  $C$  – концентрация NaCl в растворе.

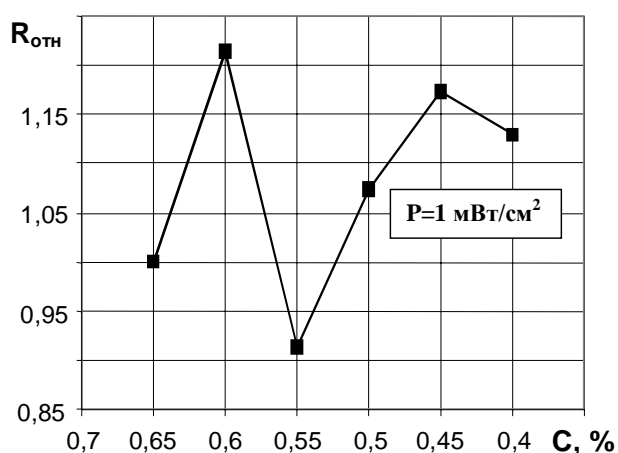


Рис. 4. Изменение относительного радиуса сферулированного эритроцита в зависимости от концентрации NaCl в гипосмотическом растворе для одного из значений плотности мощности лазерного излучения (1 мВт/см<sup>2</sup>)

При выводе выражения для жесткости было сделано предположение о предельных значениях жесткости эритроцитарной мембраны, равных  $\infty$  и 0 соответственно при отсутствии и при бесконечно большом набухании эритроцита. Для нахождения жесткости мембраны использовалась величина прироста радиуса эритроцита на втором этапе гипосмотического набухания, связанная с величиной жесткости эритроцитарной мембраны следующим образом:

$$K(\alpha) = \frac{1}{0,04 - 6,04\alpha + 124,64\alpha^2}, \quad (2)$$

где  $K$  – жесткость эритроцитарной мембраны,  $\alpha$  – коэффициент наклона преобразованной гипосмотической кривой.

Для каждого образца жесткость измерялась при различных значениях плотности мощности лазерного излучения (диапазон изменения 1÷70 мВт/см<sup>2</sup>). Характерный вид полученной зависимости жесткости эритроцитарных мембран от плотности мощности лазерного излучения приведен на рис. 5. Большинство графиков имеют сходный характер изменения жесткости при увеличении плотности мощности лазерного излучения. При этом наблюдается максимум данной зависимости в области 50 мВт/см<sup>2</sup>, для ряда образцов крови максимум смещается в диапазоне величин плотностей мощности от 40 до 60 мВт/см<sup>2</sup>.

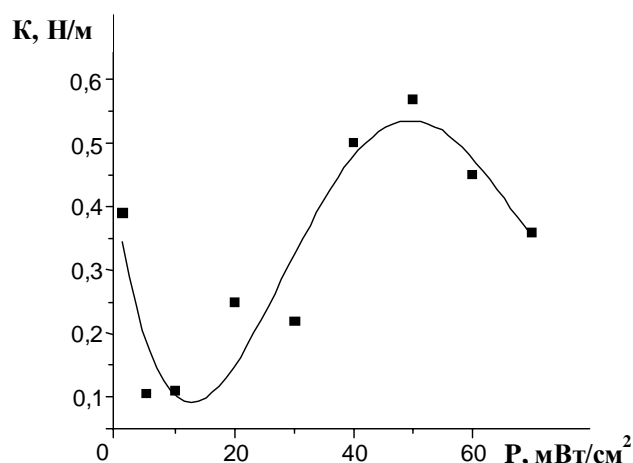


Рис. 5. Зависимость жесткости эритроцитарных мембран от плотности мощности лазерного излучения

При воздействии лазерного излучения на образец крови происходит его поглощение эритроцитами, причем поглощает как эритроцитарная мембрана, так и внутреннее содержимое эритроцита, представленное в основном гемоглобином. Поглощение излучения гемоглобином эритроцита приводит к фотоиндуцированному нагреву внутреннего содержимого эритроцита, что усиливает гипоосмотическое набухание, вызванное помещением эритроцитов в гипоосмотический раствор определенной концентрации [9, 10]. Поглощение лазерного излучения мембраной эритроцита приводит к ее нагреву и структурным перестройкам белков и липидов эритроцитарной мембраны (изменяется проницаемость мембраны, происходят термические денатурационные переходы белков клеточной мембраны, например, спектрина [4, 11]), что вызывает изменение жесткости эритроцитарных мембран и деформируемости эритроцитов.

## Заключение

Экспериментально обнаруженная зависимость жесткости эритроцитарных мембран от плотности мощности лазерного излучения имеет важное значение для изучения механизмов влияния лазерного излучения на биологические объекты и, в частности, на эритроциты и их свойства, а также для выявления областей минимального и максимального воздействия лазерного излучения на эритроцит. Подобные исследования необходимы для изучения изменения функционального состояния эритроцитов при воздействии на них лазерного излучения различной плотности мощности. В дальнейшем это может быть использовано в комплексной терапии больных множественной миеломой, включающей облучение крови лазерным излучением с оптимально подобранными параметрами, с целью повышения деформируемости эритроцитов.

## Литература

1. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрин 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. Козинец Г.И., Сарычева Т.Г. Оценка деформабельности эритроцитов методом фильтрации // Лабораторное дело. 1990. № 11. С.15.
4. 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.
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. Гематологические синдромы в общей клинической практике: Справочник / Абдулкадыров К.М., Рукавицын О.А., Шилова Е.Р., Удальева В.Ю. СПб.: Специальная литература, ЭЛБИ, 1999.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
9. Морозов И.И. Термическое повреждение клеток и их осмотический гомеостаз // Медицинская радиология. 1992. Т.37. № 11-12. С. 39 – 42.
10. Москалева А.Ю. Использование фотоиндуцированного термогемолиза для измерения механических характеристик эритроцитов // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. Т.2. С. 276 – 282.
11. Волков Е.И., Полежаев А.А. Плазматическая мембрана как мишень действия гипертермии // Успехи современной биологии. 1983. Т.96. № 3(6). С. 353 – 365.

# ПЭТ И МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Е.Н. Терещенко

Научный руководитель – ст.н.с. Г.В. Катаева (ИМЧ РАН)

В статье дано краткое описание позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) как метода неинвазивного изучения функционального состояния организма человека, а также некоторые методов и средств работы с получаемой в ПЭТ информацией.

## Введение

Метод позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) – одна из немногих возможностей изучения не анатомии, а функционального состояния организма и биохимии *in vivo*. Он основан на использовании свойства неустойчивости ядер ультракороткоживущих изотопов, в которых количество протонов превышает количество нейтронов. При переходе ядра в устойчивое состояние оно излучает позитрон, свободный пробег которого заканчивается столкновением с электроном и их аннигиляцией. Аннигиляция сопровождается образованием двух  $\gamma$ -квантов с энергией 511 кЭв, разлетающихся под углом  $180^\circ$ , которые и регистрируются датчиками камеры.

## Суть метода ПЭТ

В Институте мозга человека, где ведется научная работа студентов кафедры ИТ и КТ СПбГУ ИТМО, работает ПЭТ модели РС 2048-15В (рис. 1).

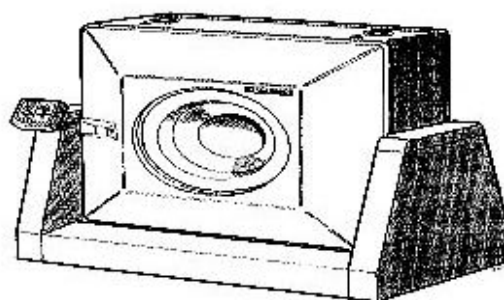


Рис. 1. ПЭТ-камера РС 2048-15В

Данный томограф имеет следующие технические характеристики:

- диаметр кольца – 270 мм;
- количество колец детекторов – 8;
- общее количество детекторов – 2048;
- пространственное разрешение – 6,5 мм;
- количество одновременно получаемых срезов – 15;
- размеры кристаллов –  $6 \times 12 \times 30$  мм.

С технической точки зрения позитронно-эмиссионный томограф измеряет распределение радиоактивного трейсера в исследуемом объекте. Поэтому для исследования различных биохимических процессов требуются специально выбранные радиофармпрепараты (РФП), поведение которых может быть аналитически осмыслено и для которых может быть построена адекватная математическая модель, связывающая доступные для измерения величины (такие как накопление трейсера или концентрация РФП в плазме артериальной крови) с исследуемыми параметрами.

Поскольку среди позитронных эмиттеров имеются изотопы основных элементов-органогенов (углерода, азота и кислорода), существует принципиальная возможность использовать в качестве радиотрейсеров самые разнообразные биологически важные

соединения, как содержащиеся в нормально функционирующем живом организме, так и ксенобиотики [1].

В связи с вышесказанным 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 в исследованиях живого мозга появляется возможность количественной оценки важнейших функциональных физиологических параметров: мозгового и коронарного кровотока (т.е. кровотока в сердечной мышце), метаболизма глюкозы и аминокислот, 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 между образованиями опухолевого и неопухолевого характера и т. д. [2].

По данным о распределении радионуклида в обследуемом участке тела могут быть с помощью соответствующей фармакокинетической модели вычислены значения физиологических или биохимических параметров [2].

Наибольшее распространение получили:

- линейная модель, когда в качестве оценки исследуемого параметра используется уровень накопленной активности;
- компартментные модели, в которых различные физико-химические состояния веществ, участвующих в метаболических процессах, и их меченых аналогов рассматриваются как отдельные компартменты. В этом случае возможна оценка как скоростей перехода веществ из одного компартмента в другой, так и других параметров процесса;
- нелинейные аппроксимации серии динамических данных, полученных за время исследования, не требующие априорных предположений относительно исследуемых процессов.

На рис. 2 представлена однокомпарментная модель, используемая для расчета мозгового кровотока (название модели определяется числом различных компартментов в ткани, так как компартмент, который условно можно назвать “плазма крови” (blood pool), присутствует во всех фармакокинетических моделях).

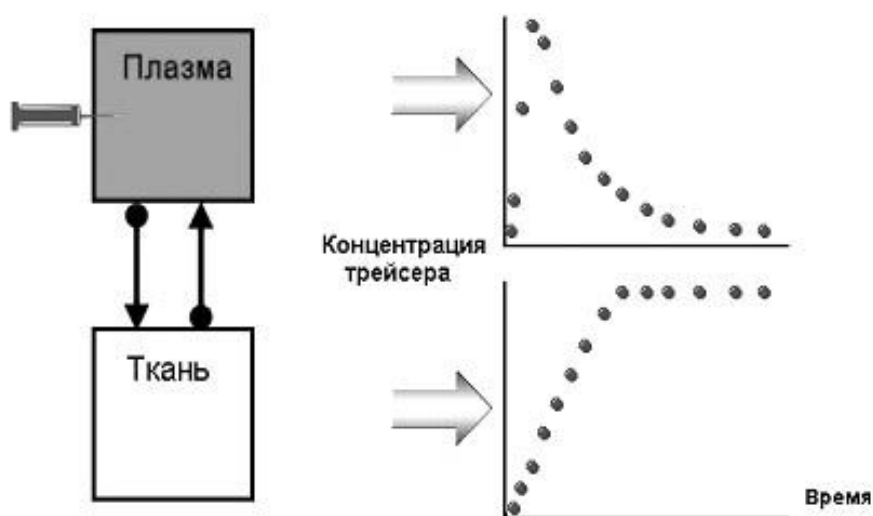


Рис. 2. Однокомпарментная модель

В любом случае для расчета интересующих параметров недостаточно данных, получаемых при помощи позитронно-эмиссионного томографа (т.е. уровня накопленной активности в ткани), уравнение требует знания и так называемой входной функции, т.е. уровня активности в плазме крови в течение исследования. В настоящее время известны методы как инвазивного, так и неинвазивного определения входной функции. Речь идет об определении входной функции путем измерения активности в артериальной крови и анализе ПЭТ-изображений.

Если рассматривать первый метод (метод определения входной функции путем измерения активности в артериальной крови), то, несмотря на то, что он дает возможность непрерывного измерения, данный метод имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, это довольно болезненный метод, во-вторых, существует временная погрешность, которая возникает за счет сдвига времени прихода болюса в мозг и артерии, из которой берутся пробы крови, (значение активности в артерии все равно будет отличаться от значения входной функции в головном мозге) [3], в-третьих, возникает необходимость кросс-калибровки прибора для измерения активности в плазме крови и томографа. Нельзя забывать и о человеческом факторе – погрешность в измерения может быть внесена и медицинскими работниками, осуществляющими забор крови из артерии.

Метод анализа входной функции по ПЭТ-изображению лишен перечисленных недостатков. Единственным известным в настоящее время недостатком данного метода может являться недостаточное пространственное разрешение томографа.

На рис. 3 показаны изображения, получающиеся при динамическом сканировании – т.е. серии 10-ти секундных сканов, стартующих в момент инъекции РФП.

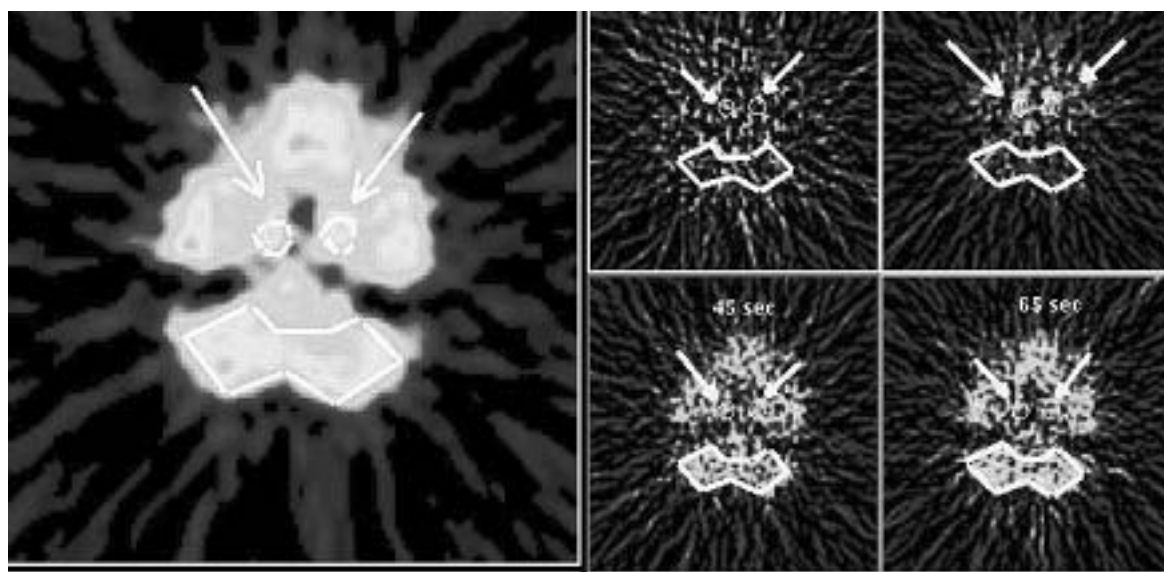


Рис. 3. Серия 10-ти секундных сканов

Ясно различимы сифоны сонных артерий, несмотря на то, что их диаметр (приблизительно 4 мм) чуть меньше величины пространственного разрешения томографа (6,5 мм). Это позволяет (с учетом так называемого коэффициента восстановления, вычисляемого на основании фантомных исследований) определять входную функцию. Приведенные ниже графики показывают, что при качественном анализе кривые накопления активности в мозге здорового человека (рис. 4) и пациента (рис. 5), а также значения накопленной в тканях во время исследования активности у пациента до и после лечения существенно не отличаются. Однако вычисление числового значения транс-

портной константы поглощения  $K$  позволяет выявить и оценить различия между состоянием пациента (уровнем мозгового кровотока) до и после лечения.

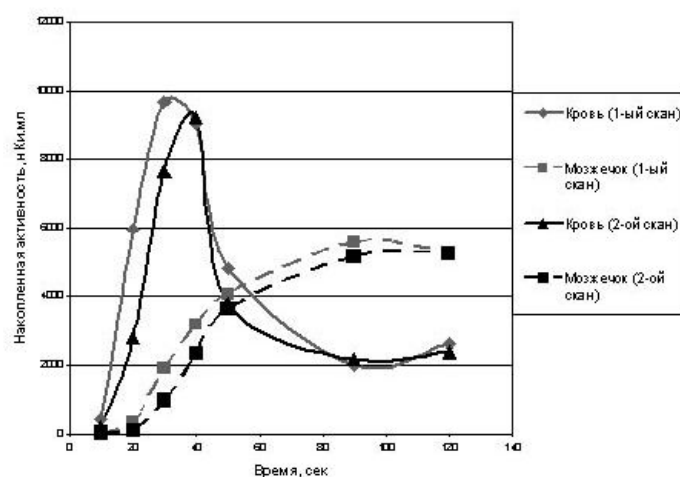


Рис. 4. Динамика накопления активности (доброволец, 2 скана через 45 секунд)

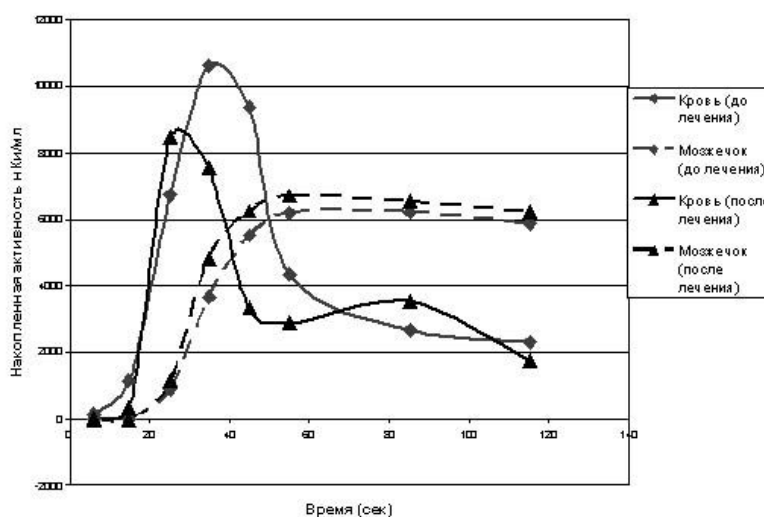


Рис. 5. Динамика накопления активности (пациент, сканирование до и после 3-ех-мес. курса лечения)

### Экспериментальная часть

В настоящее время идет работа по написанию программы, которая должна автоматизировать процесс определения входной функции непосредственно на ПЭТ-изображении. Входные данные, с которыми работает программа, представляют собой файлы изображений, создаваемые стандартным программным обеспечением ПЭТ и содержащие информацию об изображении в виде трехмерной числовой матрицы, а также заголовок, содержащий справочные данные об обследуемом. Каждое числовое значение в данной матрице соответствует величине накопленной активности РФП в конкретной точке поля зрения камеры. 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 элемент 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.

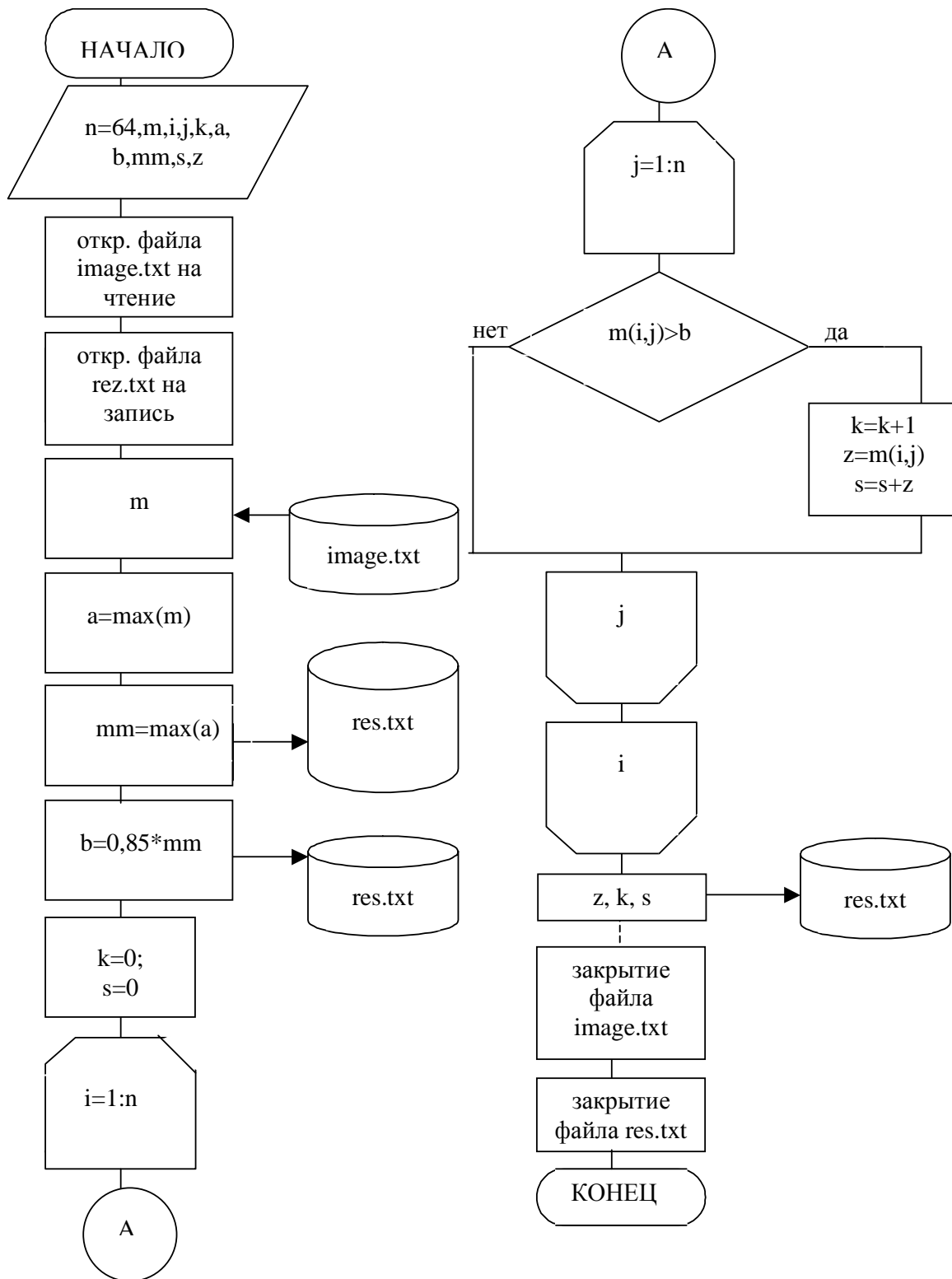


Рис. 6. Алгоритм программы

## **Заключение**

В результате работы программы автоматически определяются координаты и максимальное значение накопленной активности в интересующей нас области, а также средние значения в областях, накопленная активность в которых выше некоторого порогового значения. В качестве пороговых значений выбираются точки от 50 до 95% от значения максимума.

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.

Полученные значения служат исходными данными для дальнейшей статистической обработки (на основании как фантомных исследований, так и изображений исследований пациентов) с целью выявления наиболее устойчивого показателя, который и будет в дальнейшем использоваться в качестве входной функции для фармакокинетических расчетов, что будет следующим шагом в развитии программы.

## **Литература**

1. Blau M, Nagler W, Bender MA. A new isotope for bone scanning. //J Nucl Med. 1962. P.332–334.
2. Hawkins RA, Choi Y, Huang SC, et al. Evaluation of skeletal kinetics of fluorine-18-fluoride ion with PET. // J Nucl Med. 1992. P.633–642.
3. 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. P.949–955.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Д.С. Щекотин

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.С. Сизиков

Рассмотрен вопрос о включении априорной информации в методы реконструкции томографических изображений. Предложен метод нахождения границ реконструируемого объекта по исходным данным. Приведены результаты компьютерного моделирования.

## Введение

Обычно включение априорной информации в метод реконструкции рассматривается в связи с восстановлением томографических изображений по неполным данным. Для такого вида задач реконструкции дополнительная априорная информация может существенно улучшить качество получаемого изображения, поскольку восстановление по неполным данным – это не просто задача обращения, а задача аппроксимации и оптимизации. Тем не менее, использование априорной информации может быть также полезно и при решении задачи с полными данными.

В большинстве случаев описываются лишь виды априорных данных и предлагаются методы включения их в процедуру реконструкции, а вопрос о способах нахождения априорной информации не исследуется. Зачастую предлагается предварительно реконструировать изображение каким-либо методом восстановления, визуально определить априорную информацию и включить ее в вычисления на следующем шаге [1].

В данной работе предлагается метод нахождения границ реконструируемого объекта по исходным данным, т.е. по измеренным интегральным проекциям изображения. Рассмотренный метод может быть применен для включения априорной информации в различные методы реконструкции как в случае задачи с полными данными, так и в случае задачи с неполными данными. Метод позволяет снизить временную сложность восстановления и увеличить качество получаемых изображений.

## Определение границ исследуемого объекта

Задача рентгеновской томографии заключается в нахождении коэффициентов поглощения рентгеновских лучей  $f(x, y)$  во всех точках области сканирования. Функция  $f(x, y)$  связана с полученными по результатам измерений значениями  $q(s, \varphi)$  интегральным уравнением Радона [2–5, 7], или теневым уравнением:

$$R f \equiv \int_{L(s, \varphi)} f(x, y) dl = q(s, \varphi), \quad (1)$$

где  $R$  – оператор преобразования Радона (оператор теневого преобразования), а интегрирование ведется по лучу в виде прямой  $L(s, \varphi)$ , уравнение которой  $x \cos \varphi + y \sin \varphi = s$ .

Как известно [6, 7],

$$q(s, \varphi) = -\ln \frac{I(s, \varphi)}{I_0}, \quad (2)$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность рентгеновских лучей, а  $I(s, \varphi)$  – значения интенсивности, измеренные детекторами после частичного поглощения рентгеновского излучения веществом. Отношение  $\frac{I(s, \varphi)}{I_0}$  принято называть прозрачностью, а функцию  $q(s, \varphi)$  – поглощением [7, с. 19] или тенью.

Заметим, что  $q(s, \varphi) = 0$  означает, что  $I(s, \varphi) = I_0$ , т.е. луч прошел через область сканирования без поглощения. Это, в свою очередь, означает, что во всех точках области сканирования, которые пересек данный луч, вещество отсутствует. Поэтому заранее можно сказать, что значения коэффициентов поглощения в данных точках равны нулю и восстановление искомой функции  $f(x, y)$  в этих точках избыточно. Если включить эту априорную информацию в вычислительный алгоритм, то можно не только уменьшить время восстановления, но и увеличить качество восстанавливаемого изображения.

Математически полученный вывод можно записать как уравнение ограничений

$$Cf(x, y) = g(x, y), \quad (3)$$

где  $C$  – оператор ограничения, который устанавливает значение изображения равным единице, если оно отлично от нуля, а  $g(x, y) = 0$  для всех  $\{(x, y) : x \cos \varphi + y \sin \varphi = s\}$ , для которых  $q(s, \varphi) = 0$ , и  $g(x, y) = 1$  во всех остальных случаях. Искомая функция  $f(x, y)$  должна удовлетворять уравнению (3).

Однако уравнение ограничений в таком виде будет справедливо лишь для идеальных условий. В реальных же условиях невозможно точно измерить интенсивности  $I(s, \varphi)$ , поскольку, во-первых, число квантов, испускаемых источником излучения за единицу времени, является случайной величиной, а во-вторых, поглощение квантов веществом тоже происходит случайным образом. Таким образом, измеренные интенсивности  $I(s, \varphi)$  неизбежно будут содержать в себе компоненту шума, а именно: измеряться будут не идеальные значения  $I(s, \varphi)$ , а некоторые  $\tilde{I}(s, \varphi) = I(s, \varphi) + \delta I$ , где  $\delta I$  – случайная погрешность измерения. Поэтому равенство  $q(s, \varphi) = 0$  следует заменить неравенством  $q(s, \varphi) \leq \delta$ , где  $\delta > 0$  – некоторое значение, определяемое условиями измерений. Для оценки  $\delta$  мы можем использовать, например, информацию о минимальном коэффициенте поглощения исследуемого объекта или о значении случайной погрешности.

Переформулировав уравнение ограничений (3) и учитывая случайную погрешность, получаем, что искомая функция  $f(x, y)$  равняется нулю на всем множестве точек

$$M = \{(x, y) : x \cos \varphi + y \sin \varphi = s; q(s, \varphi) \leq \delta\}. \quad (4)$$

Фактически мы нашли границы исследуемого объекта, вне которых коэффициенты поглощения равны нулю.

### Использование информации о границах объекта

В качестве примера использования описанного выше подхода применим его к распространенному методу свертки и обратной проекции. Решение задачи томографии этим методом имеет вид [6, 9, 10]:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi d\varphi \int_{-\infty}^\infty q(s, \varphi) p(x \cos \varphi + y \sin \varphi - s) ds, \quad (5)$$

где

$$p(t) = \int_{-\infty}^\infty |\omega| e^{i\omega t} d\omega \quad (6)$$

– так называемая импульсная реакция фильтра с частотной характеристикой  $|\omega|$ .

Однако решение (5)–(6) расходится. Действительно, используя формулу Эйлера и записав (6) в виде

$$p(t) = 2 \int_0^{\infty} |\omega| \cos(\omega t) d\omega, \quad (7)$$

видим, что  $p(t)$  расходится при любом  $t \in (-\infty, \infty)$ . Чтобы устранить расходимость, в [5, 6] вводится предельная частота  $\omega_{\max} = \frac{\pi}{h}$ , где  $h$  – шаг дискретизации, в результате [6, с. 156, 171]

$$p(t) = 2 \left[ \omega_{\max}^2 \operatorname{sinc}(\omega_{\max} t) - \frac{\omega_{\max}^2}{2} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega_{\max} t}{2}\right) \right]. \quad (8)$$

Такой устойчивый алгоритм часто называют решением в пространстве  $S_{\pi/h}$  [8, с. 259].

С использованием априорной информации (4) решение (5) принимает вид

$$\begin{cases} f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\pi} d\varphi \int_{-\infty}^{\infty} q(s, \varphi) p(x \cos \varphi + y \sin \varphi - s) ds, & (x, y) \notin M \\ f(x, y) = 0, & (x, y) \in M \end{cases} \quad (9)$$

Решение в форме (9) имеет следующие преимущества. Во-первых, вычислять значения коэффициентов поглощения требуется не для всей выборки точек  $(x, y)$ , а только для подмножества точек, не входящих в  $M$ , что уменьшает временную сложность восстановления. Во-вторых, для всех точек из  $M$  значения коэффициентов поглощения известны точно, что сокращает ошибку восстановления и повышает качество получаемого изображения.

Отметим, что включать априорную информацию (4) можно и во многие другие методы восстановления.

## Моделирование

В качестве характеристик точности полученного изображения будем использовать среднеквадратическое отклонение полученного изображения от исходного изображения в процентах:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1 \dots N} \sum_{j=1 \dots M} (x_{ij} - x'_{ij})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1 \dots N} \sum_{j=1 \dots M} x'_{ij}{}^2}}, \quad (10)$$

где  $x_{ij}$  – точки восстановленного изображения,  $x'_{ij}$  – точки исходного изображения, и среднюю гладкость полученного изображения [11, 12]:

$$\theta = 1 - \frac{\sum_{i=1 \dots N} \sum_{j=1 \dots M-1} |x_{ij} - x_{ij+1}| + \sum_{i=1 \dots N-1} \sum_{j=1 \dots M} |x_{ij} - x_{i+1j}|}{255 \cdot ((N-1) \cdot M + (M-1) \cdot N)}, \quad (11)$$

где  $N$  – количество точек изображения по горизонтали;  $M$  – количество точек изображения по вертикали;  $x_{ij}$  – точки восстановленного изображения.  $\theta = 1$  для полностью однородного изображения (все точки изображения имеют одинаковую яркость),  $\theta = 0$ , если в каждой точке происходит переход от минимального к максимальному разрешенному уровню яркости.

На рис. 1 показано исходное изображение размером  $100 \times 100$  пикселей. В процессе вычислительного эксперимента проекционные данные рассчитывались для 100 углов с 100 параллельными лучами в каждой проекции. Далее восстановление производилось как для идеальных данных, так и для данных, искаженных 5% шумом с равномерным распределением.



Рис. 1. Исходное изображение ( $\theta = 0.976$ )

На рис. 2 и 3 показаны изображения, восстановленные методом свертки и обратной проекции без использования априорной информации (5) в идеальных условиях и при наличии 5% шума соответственно.



Рис. 2. Изображение восстановлено в идеальных условиях без учета априорной информации ( $\theta = 0.950$ ,  $\sigma = 0.401$ )



Рис. 3. Изображение восстановлено при наличии 5% шума без учета априорной информации ( $\theta = 0.947$ ,  $\sigma = 0.458$ )

На рис. 4 и 5 представлены изображения, восстановленные методом свертки и обратной проекции с использованием априорной информации о границах объекта (9). Рис. 4 относится к восстановлению в идеальных условиях (выбрано  $\delta = 0$ ), а рис. 5 – к восстановлению при наличии 5% шума ( $\delta = 0.0125 \cdot (\max q(s, \varphi) - \min q(s, \varphi))$ ).



Рис. 4. Изображение восстановлено в идеальных условиях с учетом априорной информации ( $\theta = 0.967$ ,  $\sigma = 0.14$ )

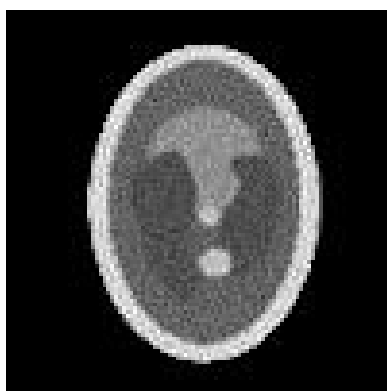


Рис. 5. Изображение восстановлено при наличии 5% шума с учетом априорной информации ( $\theta = 0.963$ ,  $\sigma = 0.136$ )

Сравнение изображений, восстановленных с использованием информации о границах объекта, с изображениями, восстановленными без использования априорной информации, показывает, что учет априорной информации повышает гладкость и уменьшает среднеквадратическое отклонение получаемых изображений, т.е. улучшает их качество.

### **Заключение**

Результаты моделирования показывают, что предложенный метод определения границ исследуемого объекта и включения этой информации в метод восстановления существенно улучшает качество получаемых изображений, а также снижает временную сложность метода реконструкции. Метод показал свою эффективность как в идеальных условиях, так и при наличии погрешностей в исходных данных. В этом случае подбор значения  $\delta$  позволяет получать результаты, сопоставимые с результатами восстановления в идеальных условиях.

Рассмотренный метод был применен для включения априорной информации в метод свертки и обратной проекции, но он также может быть использован и для других методов восстановления, в том числе и в случае задачи с неполными данными.

### **Литература**

1. Medoff В. Р. Image reconstruction from limited data: theory and applications in computerized tomography // Image Recovery: Theory and Application, editor H. Stark. Orlando: Academic Press, 1987. С. 9. Р. 321–368.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Рубашов И. Б., Тимонов А. А. Первый советский компьютерный томограф // Природа. 1984. № 4. С. 11–21.

3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я., Тимонов А. А. Математические задачи компьютерной томографии. М.: Наука, 1987.
4. Троицкий И. Н. Статистическая теория томографии. М.: Радио и связь, 1989.
5. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
6. 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.
7. Сизиков В. С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001.
8. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986.
9. Bracewell R. N., Riddle A. C. Inversion of fan-beam scans in radio astronomy // *Astrophys. J.* 1967. Vol. 150. P. 427–434.
10. 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.
11. Воскобойников Ю.Е., Колкер А.Б. Адаптивный алгоритм фильтрации изображений и преобразования их в векторный формат.// *Автометрия* 2002, том 38, №4
12. Колкер А.Б. Взвешенные и рекурсивные алгоритмы векторной медианной фильтрации. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000 Вып.5 (22).



# ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОСМОТРА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ТОМОГРАФЕ

А.Н. Серегин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Неронов

Приводится краткое описание структуры приложения, позволяющего просматривать изображения, полученные на магнитно-резонансном томографе, и удовлетворяющего ряду специфических требований.

## Введение

С развитием компьютерной томографии, в связи с ростом числа фирм, выпускающих томографы, а также программное обеспечение для них, появилась необходимость в создании единого стандарта. В 1983 г. Американским институтом радиологии (ACR) и Национальной ассоциацией производителей электрооборудования США был создан объединенный комитет, в задачи которого входила разработка стандарта, обеспечивающего передачу цифровых медицинских изображений, не зависящую от производителей диагностического оборудования, и способствующую развитию систем архивирования и передачи изображений (PACS), обеспечению их взаимодействия с автоматизированными больничными информационными системами, а также созданию баз данных, содержащих диагностическую информацию, получаемую с помощью большого числа удаленных друг от друга устройств различных типов. Первая версия этого стандарта была опубликована в 1985 г., а в 1988 г. – вторая. Новая, третья версия стандарта была выпущена в 1991 г. и перерабатывалась до 1993 г. Она получила название DICOM 3.0 (английская аббревиатура от Digital Imaging and Communications in Medicine (Standard)) и используется до сих пор. Естественно, для того, чтобы просмотреть информацию, хранящуюся в этом формате, требуется специальное ПО.

## Содержание работы

Задача работы заключается в создании свободно-распространяемого ПО для получения медицинских изображений формата DICOM. При этом оно должно удовлетворять ряду требований:

- работа на IBM-совместимой машине;
- воспроизведение изображений, полученных на магнитно-резонансном томографе;
- построение многослойные изображения (псевдо-трехмерные) из набора двумерных изображений отдельных слоев;
- вывод абсолютных координат любой точки изображения в системе координат томографа.

Для решения этой задачи было использовано: описание стандарта DICOM [1], алгоритм кодирования файлов формата DICOM, написанный В. Кругом и К. Роденом на языке Delphi. Этот же язык визуального программирования был использован при написании данного приложения. Общий алгоритм работы представлен на блок-схеме (рис.1). Из-за большого объема программы приводится алгоритм лишь в общем виде.

Ниже приводятся пояснения к ней. В выбранной папке все файлы сканируются на предмет соответствия формату DICOM (Цикл 1). Далее проверяем текущий файл на соответствие какой-либо серии путем перебора всех известных серий (Цикл 2). В случае соответствия имя файла добавляется в двумерный массив (рис. 2.). Каждая строка этого массива представляет собой набор имен файлов, в которых хранятся изображения, принадлежащие одной серии, т.е. одному исследованию. В случае несоответствия в массив добавляется новая строка. После очередной итерации цикла на экран выводятся доступные серии с указанием номера серии, имени пациента и количества изображений. При выборе необходимого исследования программа, используя метод Шелла, сортиру-

ет изображения по номерам снимков и заносит их в память. Вывести необходимый слой из памяти можно при помощи бегунка. При этом будет вызван ряд подпрограмм, формирующих и выводящих на экран заголовок изображения и саму картинку. Координатная сетка берется из заголовков файлов, содержащихся в серии.

Для получения абсолютных координат из относительных были использованы последовательно три аффинных преобразования поворота. Значения углов поворота хранятся в DICOM-файле в виде косинусов углов наклона первого столбца и строки снимка относительно осей координат. При этом ось Z направлена вдоль тела пациента, ось X направлена слева направо, а ось Y – от лица к затылку.

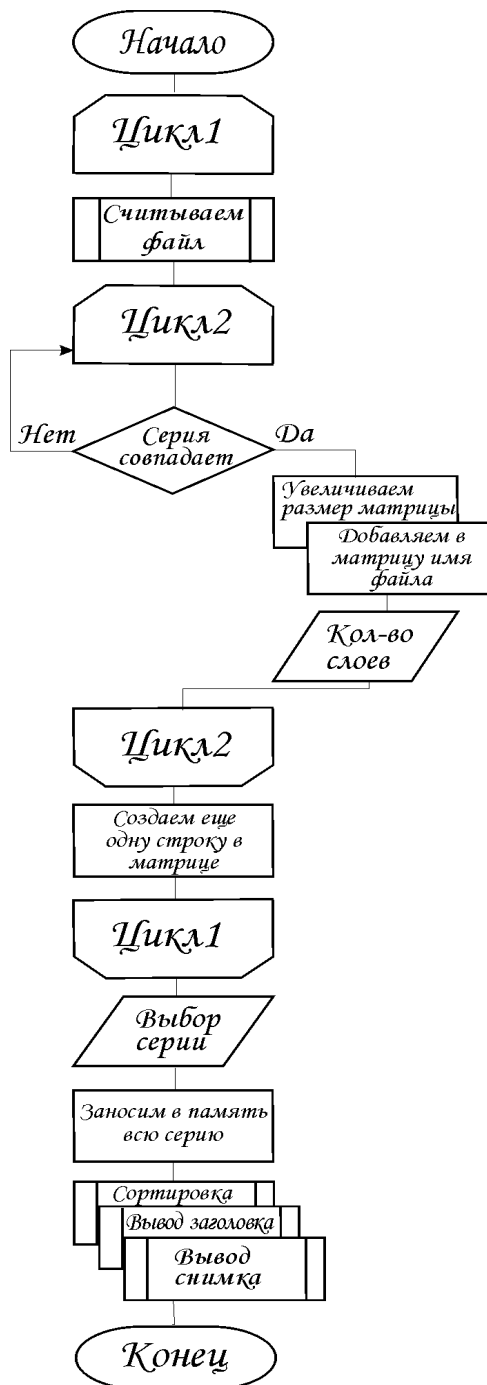


Рис. 1. Блок-схема программы

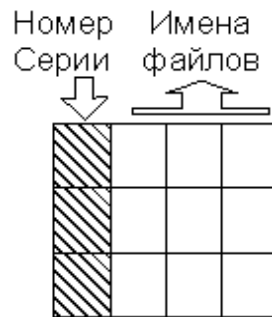


Рис. 2. Массив

## Заключение

Написанная программа строит и отображает на экране многослойные изображения из набора послойных, а также рассчитывает абсолютные координаты в каждой точке изображения.

В дальнейшем планируется использовать полученные и используемые алгоритмы при создании программного обеспечения для томографов, над которым в данный момент ведется работа.

## Литература

1. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) // NEMA Standards Publication. – 1992.

**ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ ФОТОННЫХ СТРУКТУР  
НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВОГО КРЕМНИЯ И ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА.  
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ****Ю.А. Жарова, А.В. Смелова****Научный руководитель – д.т.н., профессор А.М. Скворцов**

В работе рассказывается о возможности создания композитных одномерных фотонных кристаллов. Разработаны методы получения изолированных структур от подложки. Зафиксирован электрооптический эффект.

**Введение**

Периодические структуры с различными показателями преломления давно известны и давно применяются. Это различные диэлектрические покрытия, волноводы и т.д. Чаще всего подобные структуры выполняются в виде многослойных покрытий, в которых свет распространяется вертикально. Для самых разных применений в микроэлектронике более интересны структуры, в которых свет распространяется горизонтально. Такие структуры могут быть созданы с помощью глубокого анизотропного травления кремния ориентации (110). Они представляют собой систему глубоких кремниевых канавок с вертикальными оптически гладкими стенками (щелевой кремний). Эти структуры являются одномерными фотонными кристаллами. Управление положением фотонной зоны происходит с помощью изменения периода ( $A$ ) или количества периодов.

Вводя в данные структуры другой материал (например, жидкий кристалл (ЖК)), можно получить композитный одномерный фотонный кристалл. ЖК – это жидкость, в которой имеет место определенный порядок расположения молекул и, как следствие этого, анизотропия механических, электрических, магнитных и оптических свойств. Управление положением фотонной зоны в такой системе возможно за счет изменения показателя преломления заполнителя, т.е. в нашем случае ЖК.

В работе используется нематический ЖК – E7. Нематические ЖК характеризуются дальним ориентационным порядком и полной свободой перемещения центров тяжести отдельных молекул в пространстве. Это оптическая одноосная среда, кристаллографическая структура которой неполярна, т.е. направление концов молекул имеет равномерное распределение.

Композитные фотонные кристаллы впервые были описаны в работе [1]. Матрица макропористого кремния, заполненная ЖК, нагревалась до определенной температуры, и наблюдался термооптический эффект. Для микроэлектроники с практической точки зрения интереснее управлять оптическими свойствами ЖК и тем самым изменять свойства композитного фотонного кристалла с помощью электрического поля.

Макропористый кремний неудобен для приложения поля, так как он обладает высокой электропроводимостью.

**Эксперимент**

Данная работа посвящена разработке и изготовлению модельного чипа из кремния. Стояли задачи получить хорошие структуры на основе щелевого кремния (т.е. одномерного фотонного кристалла), которые можно было бы заполнять ЖК и подавать к электродам структуры напряжение.

Топологией элементов была выбрана встречно-штыревая структура, которая удобна для подачи напряжения на обкладки. По периметру структуры имеется отдельная от электродов рамка, препятствующая вытеканию ЖК из чипа.

Структуры должны быть изолированы от подложки, чтобы не было утечек тока по подложке.

Было предложено три решения этой проблемы.

1. Изоляция р-п-переходом (рис.1).



Рис.1. Схематическое изображение структуры изолированной от подложки р-п-переходом

В пластину кремния (110) производилась диффузия алюминия и бора на глубину 160–170 мкм, после этого пластину полировали, снимая верхний р-слой, при этом оставалось 30 мкм n-Si, а далее шел диффузионный слой в 160 мкм. После этих операций пластина окислялась, и на ней с помощью фотолитографии формировался рисунок экспериментальных структур. Производилось глубокое анизотропное травление на глубину более 30 мкм, чтобы структуры заходили по глубине в диффузионную область, таким образом достигалась изоляция встречно-штыревых обкладок структур. Но данный метод не дал хороших результатов: при подаче напряжения на обкладки наблюдались большие токи утечки, возможно, из-за плавного р-п-перехода.

2. Изоляция эпоксидным клеем («Эпокси» - технология) (рис.2).

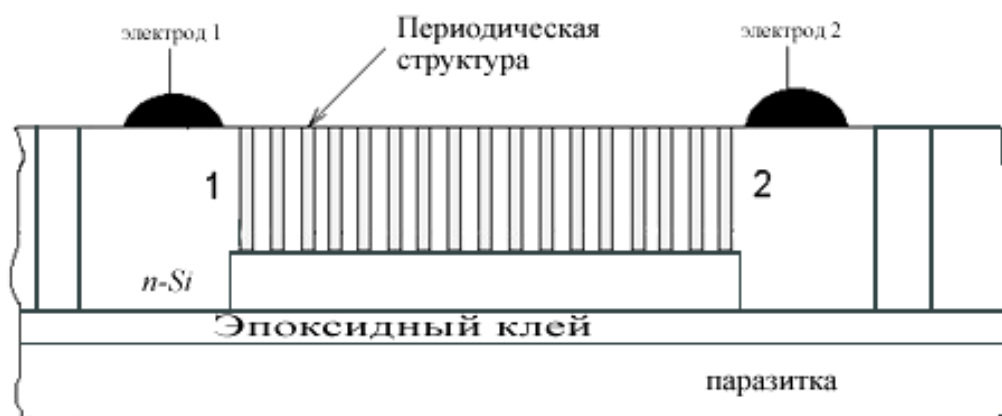


Рис.2. Схематическое изображение структуры изолированной от подложки эпоксидным клеем

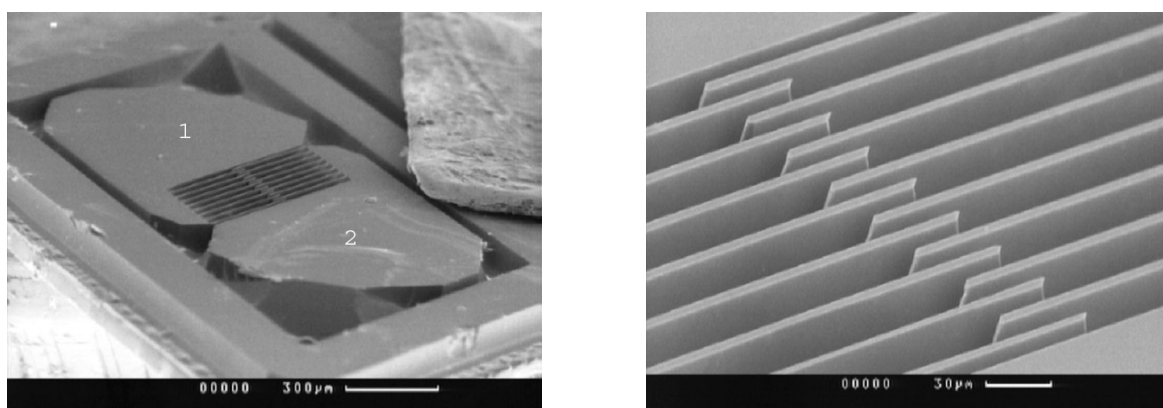
Сначала на рабочей пластине толщиной 200 мкм по обратной стороне делалась фотолитография полос. Эти полосы травилась в KOH на глубину 150 мкм, данная операция проводилась для утонения пластины в местах, где потом на лицевой стороне формировались структуры. Далее пластина окислялась, и на рабочей стороне формиро-

вался рисунок встречно-штыревых структур. Для прочности и раскортки пластина не-рабочей стороной приклеивалась эпоксидной смолой к паразитке, и проводилось травление структур до эпоксидной смолы, т.е. на 50 мкм. Данный метод оказался очень трудоемким с малым выходом годных структур.

3. Формирование встречно-штыревых структур на SOI- структурах (рис. 3).



Рис.3. Схематичное изображение структур на SOI-пластинах



а б

Рис. 4. Образец D8 со встречно-штырьевой структурой электродов до заполнения жидким кристаллом; период структуры  $A=16 \mu\text{m}$  (в щелей  $8 \mu\text{m}$ ): а – общий вид чипа, б– увеличенное изображение области перекрытия электродов

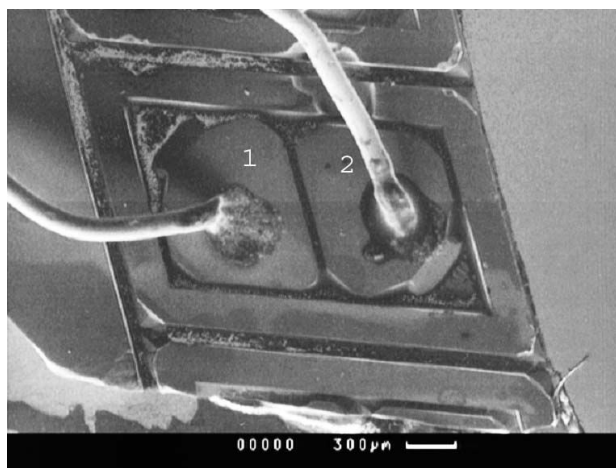


Рис. 5. Образец с электродами после заполнения жидким кристаллом (SEM-изображение)

Данный метод дал самые хорошие результаты. На SOI-структурах (Silicon On Isolation), у которых верхний слой – 40 мкм, слой  $\text{SiO}_2$  – 2 мкм и нижняя подложка – 525 мкм, после окисления и фотолитографии получали рисунок структур. Затем проводили глубокое анизотропное травление на 40 мкм до слоя оксида кремния. Таким образом были получены готовые структуры (рис 4).

К площадкам (1) и (2) (рис. 5) с помощью серебряной пасты присоединялись электроды. Далее образцы помещались под микроскоп (МЕТАМ Р-1). К обкладкам образца прикладывалось напряжение, и наблюдалось изменение яркости ЖК в отраженном поляризованном свете под микроскопом. Было отмечено изменение яркости ЖК в структуре при подаче напряжения и возврат к первоначальной яркости при снятии напряжения. Таким образом, был зафиксирован электрооптический эффект, происходящий в ЖК в области сильного электрического поля, т.е. в области перекрытия электродов

### **Заключение**

В эксперименте были разработаны и изготовлены структуры с изолированными электродами. На данных структурах проверена раскоротка и зафиксировано отсутствие токов утечки и пробоев. Далее структуры заполнялись ЖК, и проводилось визуальное фиксирование электрооптического эффекта. Полученные результаты требуют более детального изучения и исследования ориентации молекул ЖК в данной структуре, так как изменение яркости ЖК, возможно, наблюдалось за счет изменения их ориентации относительно стенок структуры.

Описываемые структуры перспективны как управляемые фотонные кристаллы.

### **Литература**

1. K.Busch, S.John. // Phys. Rev. Lett 1999. 83. 967.

# ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

А.В. Смелова, Ю.А. Жарова

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.М. Скворцов

Изучен новый класс материалов – фотонные кристаллы. Рассмотрены одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы, их характеристики, способы изготовления и возможности применения.

## Введение

Начиная с середины 90-х годов XX в., значительные усилия направлены на получение и исследование новых оптически активных материалов – фотонных кристаллов (photonic crystals). Термин «фотонные кристаллы» был введен в конце 1980-х гг. для обозначения, так сказать, оптического аналога полупроводников.

Фотонные кристаллы – материалы с меняющимся в пространстве показателем преломления среды. Луч света, проходя через такой кристалл, попадает в среды то с высоким, то с низким коэффициентом отражения. Благодаря этому в кристалле фотон оказывается примерно в тех же условиях, что и электрон в полупроводнике, и, соответственно, формируются «разрешенные» и «запрещенные» фотонные зоны (Photonic Band Gap). Другими словами, кристалл блокирует свет с длиной волны, соответствующей «запрещенной фотонной зоне», в то время как свет с другими длинами волн будет распространяться беспрепятственно [1].

## Фотонные запрещенные и разрешенные зоны

Для понимания процессов в фотонном кристалле его можно сравнить с кристаллом полупроводника, а распространение фотонов – с движением носителей заряда (электронов и дырок).

Свойства проводимости твердых тел связаны со структурой спектра электронных энергетических состояний и характером их заполнения электронами. Существует две группы методов описания такой структуры. В первом случае, иногда называемом кластерным подходом, изучают не все массивное тело, а некоторый его малый фрагмент, образованный небольшой совокупностью взаимодействующих атомов.

Второй подход, называемый волновым, основан на другой модели – представлении твердого тела в виде бесконечного идеального кристалла. Он заключается в рассмотрении движения частицы-волны в поле периодического потенциала и больше подходит для понимания общности механизмов образования энергетических зон в электронных и фотонных кристаллах. Если длина волны не попадает в резонанс с периодом решетки, частица совершает почти свободное движение. По мере роста энергии длина волны частицы приближается к значению, кратному периоду решетки. Из-за этого она испытывает сильное возмущение, объясняемое близостью к условию зеркального отражения волны от кристаллической плоскости (условие Брэгга). Интерференция прямой и обратной волн дает стоячую волну, из-за чего распространение частиц с энергиями, удовлетворяющими условию Брэгга, в идеальном кристалле невозможно. Так в спектре энергий образуются разрывы – запрещенные зоны. Волновой механизм образования запрещенных зон является общим для всех квантовых частиц. Существенные различия у частиц разного сорта могут проявляться при заселении ими разрешенных зон. Например, электроны подчиняются статистике Ферми, согласно которой в каждом разрешенном состоянии может находиться не более одной частицы. А вот фотоны, носители света, подчиняются статистике Бозе, и в каждом состоянии может находиться уже любое число частиц [2].



В идеальном кремнии атомы расположены в алмазоподобной кристаллической структуре, и, согласно зонной теории, электроны, распространяясь по кристаллу, взаимодействуют с периодическим потенциалом поля атомных ядер. Это является причиной появления разрешенных и запрещенных энергетических зон – квантовой механикой запрещается существование электронов с энергиями, соответствующими энергетическому диапазону, называемому запрещенной зоной. В реальных полупроводниках периодичность решетки может быть нарушена дислокациями, включениями междоузельных атомов примеси, и, соответственно, электроны могут иметь энергию в пределах промежутка зоны. Наиболее ярко квантовые свойства фотонных кристаллов проявляются тогда, когда фотонная запрещенная зона существенно перекрывает электронную запрещенную зону. Например, время жизни возбужденного атома, помещенного в такой кристалл, может быть увеличено во много раз [3].

Продолжая аналогию, фотонные кристаллы можно разделить на проводники, изоляторы, полупроводники и сверхпроводники. Фотонные проводники обладают широкими разрешенными зонами. Это прозрачные тела, в которых свет пробегает большое расстояние, практически не поглощаясь.

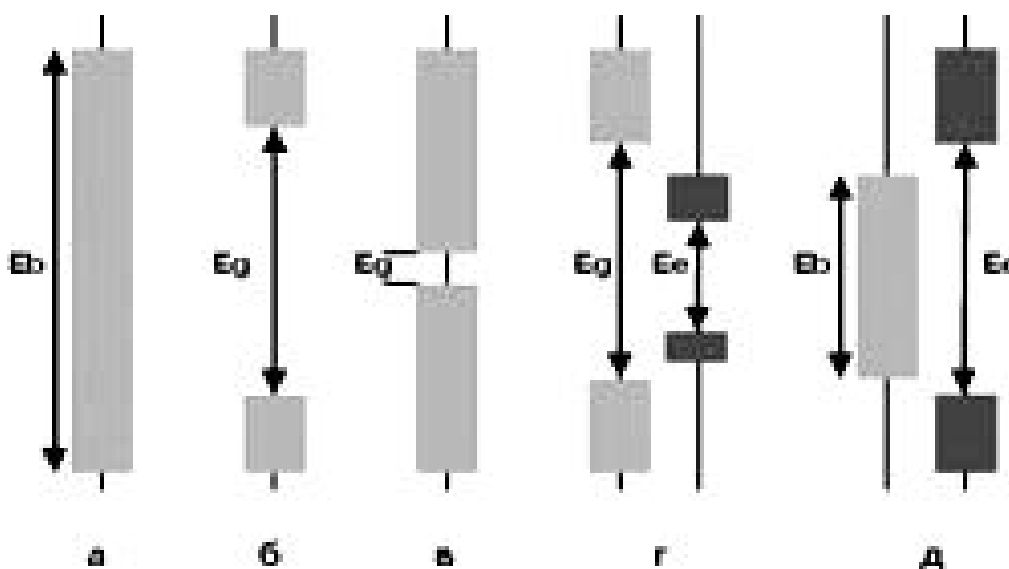


Рис. 1. Соотношение разрешенных и запрещенных энергетических зон, а) фотонный проводник, б) фотонный изолятор, в) фотонный полупроводник, г) подавитель спонтанного излучения и д) фотонный идеальный проводник (сверхпроводник) [2]

Другой класс фотонных кристаллов – фотонные изоляторы – обладает широкими запрещенными зонами. Такому условию удовлетворяют, например, широкодиапазонные многослойные диэлектрические зеркала. В отличие от обычных непрозрачных сред, в которых свет быстро затухает, превращаясь в тепло, фотонные изоляторы свет не поглощают. Что же касается фотонных полупроводников, то они обладают более узкими по сравнению с изоляторами запрещенными зонами. На рис. 1 показано соотношение разрешенных и запрещенных энергетических зон. Здесь  $E_b$  – ширина разрешенной фотонной зоны,  $E_g$  – ширина запрещенной фотонной зоны,  $E_e$  – ширина запрещенной электронной зоны, серым цветом показаны фотонные зоны, черным – электронные.

### Изготовление и применение фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы в природе – большая редкость. Примерами таких кристаллов могут служить кальцит, лабрадор, опал.

Кластерная сверхрешетка опала послужила прототипом для создания искусственных фотонных кристаллов.

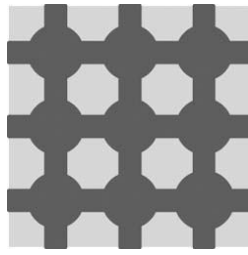


Рис. 2. Структура обычного опала [2]

Несмотря на то, что идея фотонных зон и фотонных кристаллов утвердилась в оптике лишь за последние несколько лет, свойства структур со слоистым изменением коэффициента преломления давно известны физикам. Одним из первых практически важных применений таких структур стало изготовление диэлектрических покрытий с уникальными оптическими характеристиками, применяемых для создания высокоэффективных оптических спектральных фильтров и снижения нежелательного отражения от оптических элементов (такая оптика получила название просветленной), и диэлектрических зеркал с коэффициентом отражения, близким к 100%. В качестве другого хорошо известного примера 1D-фотонных структур можно упомянуть полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью, а также оптические волноводы с периодической продольной модуляцией физических параметров (профиля или коэффициента преломления).

Рассмотрим периодическую структуру диэлектрических слоев толщиной в  $1/4 \lambda_0$  с двумя различными показателями преломления – одномерный фотонный кристалл (рис. 3). Такие структуры давно известны и хорошо изучены в когерентной и нелинейной оптике, они носят название брэгговских [3] и используются для изготовления высокоотражающих зеркал для лазерной техники. Для такой структуры и нормального угла падения можно построить график зависимости пропускания от длины волны, который имеет область, в которой коэффициент отражения близок к 1 (рис. 5). Это и есть запрещенная зона для одномерной структуры, причем следует отметить, что для одномерной структуры положение зоны смещается при изменении угла падения.

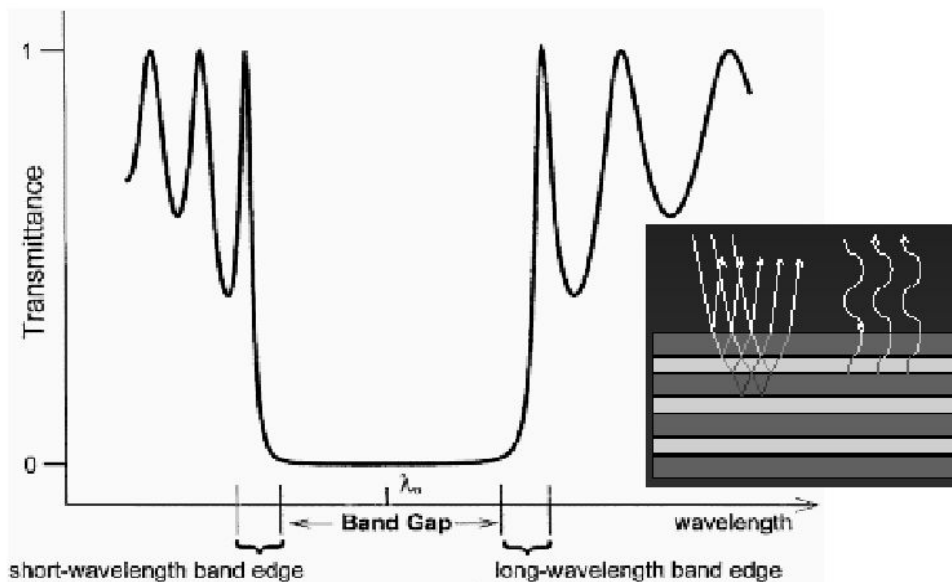


Рис. 3. Одномерная фотонная структура и зависимость её пропускания от длины волны [3]

Двумерная фотонная структура представляет собой объемную диэлектрическую среду, в которой периодическим образом расположены цилиндры с другим показателем преломления (рис. 4). Она реализуется в виде стеклянной матрицы, в которой располо-

жены ряды сквозных воздушных отверстий диаметром 200–500 нм на расстоянии 1–2 мкм друг от друга, причем каждый следующий ряд так сдвинут относительно предыдущего, что вид сверху образует гексагональную структуру. Данная структура также называется наноканальной пластиной, и технология её изготовления разработана в нескольких зарубежных научных центрах, включая Naval Research Laboratory (Вашингтон, США) и Research Institute for Electronic Science (Саппоро, Япония) [4].

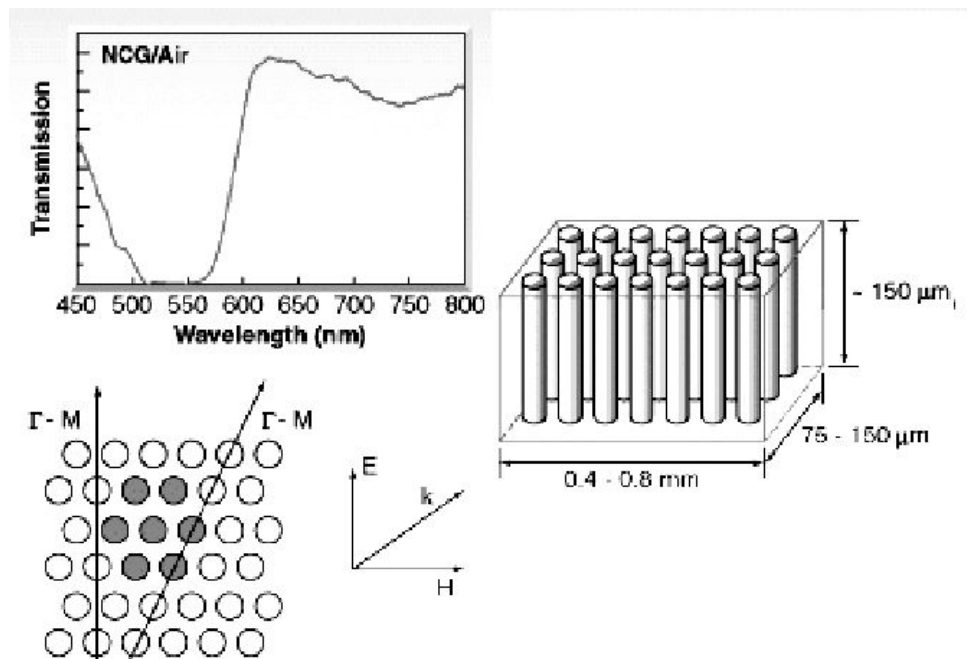


Рис. 4. Двумерный фотонный кристалл из цилиндров, расположенных в гексагональной симметрии, его пропускание в зависимости от длины волны, измеренное в направлении  $\Gamma$ -M первой зоны Бриллюэна [3]

Полностью трехмерную фотонную структуру можно построить из удлиненных параллелепипедов, расположенных в виде поленицы дров (рис.5).

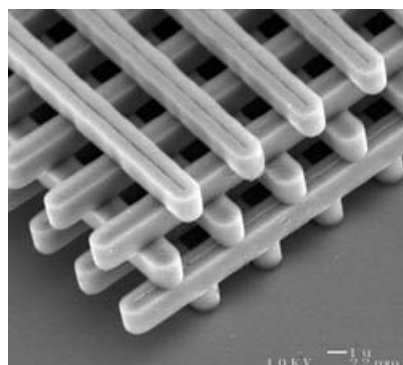


Рис. 5. Трехмерный фотонный кристалл и его элементарная ячейка [5]

При нарушении симметрии фотонного кристалла в каком-либо месте, например, при изменении периода структуры, возникает область, в которой могут существовать электромагнитные волны с частотами, соответствующими запрещенной зоне всей структуры. Таким образом, можно создать идеальный микрорезонатор, в котором электромагнитная волна ограничена в трех измерениях и убывает экспоненциально по интенсивности вглубь кристалла. Если расположить на расстоянии, соизмеримом с длиной волны, еще такой же точечный дефект, можно реализовать спектральный фильтр высокой добротности. Создавая широкополосный фотонно-кристаллический волновод

и располагая вдоль него различного размера точечные дефекты, соединенные с волноводами определенной частотной полосы, можно реализовать интегральные устройства демультиплексирования широкополосного спектрального сигнала [3]. Точечный дефект трехмерной излучающей фотонной структуры, созданный, например, в полупроводниковом слое, образует высокодобротный резонатор ( $Q \sim 10^9$ ), и, соответственно, возможно полное подавление спонтанной эмиссии и создание полупроводникового светодиода, излучающего в одной частотной моде. При туннелировании фотонов из соседнего волновода точечный дефект в излучающей области может работать как квантовый усилитель, доводя величину полезного светового сигнала до необходимой для дальнейшего распространения по интегрированной структуре. Линейный дефект в фотонном кристалле создает волновод, который, в отличие от волоконного или планарного, может изгибаться практически под любым углом со 100%-ным пропусканием.

В последнее время фотонно-кристаллические и микроструктурные волокна привлекают все большее внимание в связи с их уникальными свойствами [6]. Как правило, эти волокна включают периодическую структуру воздушных пустот в пределах кварцевой сердцевины, причем в центре находится либо кварцевое ядро, либо ядро в виде полого воздушного волновода (рис.6). Такое волокно в поперечном сечении является двумерным кристаллом с зонной структурой фотонного изолятора. При этом в продольном направлении волокно является идеальным проводником. Также большим преимуществом является то, что фотонно-кристаллические волокна менее чувствительны к изгибам волокна и к его кручению.

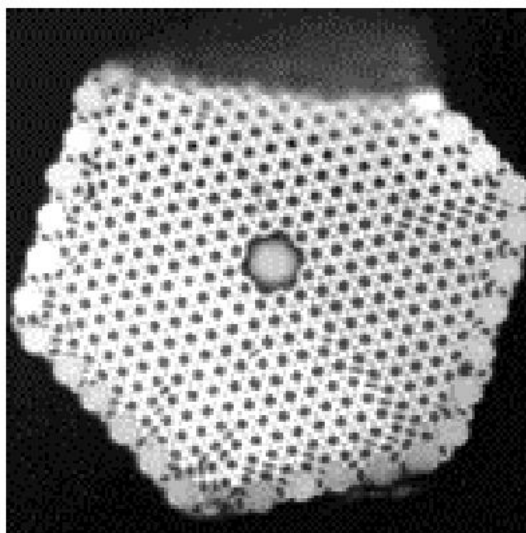


Рис. 6. Фотонно-кристаллическое волокно с воздушным ядром [6]

Используя двумерный фотонный кристалл, в котором показатель преломления структуры зависит от интенсивности падающего излучения, можно создать оптический ограничитель (лимитер). Если же воздушные промежутки кристалла заполнить жидкостью с показателем преломления, близким по величине показателю преломления стеклянной матрицы, то эффект фотонного кристалла исчезнет, и данная структура будет пропускать свет во всем диапазоне спектра. Заполнив каналы нелинейной средой с показателем преломления, соответствующим стеклянной матрице, можно получить управляемую светом структуру. Первые фотонно-кристаллические лимитеры использовали тепловую нелинейность, а в качестве нелинейной среды – поглощающую жидкость [3], сильно изменяющую показатель преломления при изменении температуры среды. Изменение показателя преломления было достаточно для появления фотонной запрещенной зоны при плотности мощности падающего излучения  $100\text{--}200 \text{ мДж/см}^2$ . Вследствие того, что тепловая нелинейность развивается достаточно медленно, данный лимитер эффективен для миллисекундных лазерных импульсов.

Нелинейно-оптические свойства фотонных структур можно использовать для создания оптических переключателей и логических ячеек. При одновременной подаче на такую ячейку малоинтенсивного сигнала с длиной волны, соответствующей краю запрещенной зоны, и мощного управляющего сигнала на частоте, несколько большей края запрещенной зоны, происходит смещение края зоны, частота малоинтенсивного сигнала попадает в запрещенную зону, и он полностью отражается. В отсутствие интенсивного управляющего сигнала пробный (логический) сигнал проходит, и таким образом можно осуществить управление световыми потоками. Комбинируя подобного рода фотонно-кристаллические ячейки, можно осуществить любые логические операции [3].

Фотонные кристаллы «обычной» пространственной размерности – одномерные дифракционные решетки (1D), двумерные матрицы неоднородностей (слои 2D) и, собственно, трехмерные кристаллы – по сути своей статичны, хотя и предоставляют разработчикам огромное разнообразие эффектов и свойств, реализуемых, как об этом обычно говорят, в пространственной области. Применение динамических неоднородностей, «уложенных» в структуру кристалла, позволяет добавить еще одну размерность – время. При этом мы расширяем понятие кристалла как периодической в пространстве структуры, вводя периодичность во времени. Полученный кристалл смело можно считать четырехмерной структурой (4D), где четвертым измерением является время. Расчет динамики таких структур сложен, однако их потенциальные возможности богаче свойств трехмерных.

Дополнив пространственное распределение неоднородностей временным распределением (попросту говоря, задав закон изменения во времени оптических свойств элементов фотонного кристалла), мы получим среду для фиксации полной пространственно-временной передаточной функции объекта [2].

## Заключение

Предсказания всегда трудны, однако прогнозы на будущее фотонно-кристаллических устройств оптимистичны. Уже сейчас создаются полупроводниковые лазеры и мощные одномодовые светодиоды с использованием трехмерных фотонно-кристаллических резонаторов, волноводные оптические цепи с 90°-ными поворотами, оптические лимитеры, суперпризмы, фотонные волокна. Через несколько лет большинство этих устройств появится на мировом рынке высокотехнологичных изделий. Но главная перспектива для таких структур – это интегральный фотонно-кристаллический процессор – фотонный микрочип. Основные предпосылки для его создания уже сделаны: определена структура логических ячеек, созданы фотонные цепи, в недалеком будущем обязательно появится фотонно-кристаллический аналог транзистора. Рассматривая развитие электронных микрочипов – от момента создания первого процессора фирмой Intel в 1970 г. до их повсеместного использования прошло 25–30 лет – можно предположить аналогичную тенденцию и для оптического компьютера. Тогда 2025–2030 . станут годами его расцвета.

## Литература

1. [www.membrana.ru](http://www.membrana.ru)
2. Жувикин Г. // [www.computerra.ru](http://www.computerra.ru)
3. Васильев В.Н., Беспалов В.Г. Информационные технологии, оптический компьютер и фотонные кристаллы / Проблемы когерентной и нелинейной оптики. Сб. статей. Под ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000. С.88-109..
4. Tonucci R. J., Justos B. L., Campillo A. J., Ford C. E. Fabricating nanochannel glass. // *Science*. 1992. V. 258. P. 782–783.
5. Kobayashi H., Okano M., Tomoda K. Optical properties of three-dimensional photonic crystals based on III-V semiconductors at infrared to near-infrared wavelengths. // *Appl.Phys. Lett*. 1999. V. 75. P. 905–907.
6. Joannopoulos J. D., Meade R. D., Winn J. N. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton U. Press, Princeton, N. J., 1995).

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВЫХ ФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ МИКРОЛАЗЕРОВ

В.А. Асеев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

Проведены комплексные исследования спектрально-люминесцентных и лазерных свойств высококонцентрированных фосфатных стекол с различным содержанием иттербия и эрбия. Установлены предельные концентрации эрбия, при которых наблюдается усиление, и выявлено влияние мощности накачки на коэффициент усиления.

## Введение

Волоконные усилители и микролазеры активно используются для задач телекоммуникации и телеметрии. Актуальной задачей является миниатюризация таких устройств. В последнее время опубликован ряд статей, посвященных изучению свойств микролазеров и оптических волноводных усилителей на основе иттербий-эрбиевого фосфатного стекла [1–6]. Одним из путей уменьшения габаритов и увеличения выходной мощности таких устройств является увеличение концентрации активаторов. Однако увеличение их концентрации приводит к росту потерь, связанных с кооперативными явлениями: миграцией возбуждения, ап-конверсией, кросс-релаксацией [7]. Поэтому необходимо оптимизировать концентрации ионов активаторов и их соотношения, а также определить их предельные концентрации в лазерном стекле. В данной работе были приведены результаты комплексных исследований спектрально-люминесцентных и лазерных свойств иттербий-эрбиевых фосфатных стекол с различным содержанием ионов эрбия и иттербия.

## Объект исследования и методика эксперимента

В работе исследованы две серии экспериментальных фосфатных стекол (системы  $\text{BaO-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ ) с различной концентрацией ионов активаторов. В первой серии при постоянной концентрации иттербия ( $1,9 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ) варьировалась концентрация эрбия в пределах  $(0,5-9,5) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Во второй серии при постоянной концентрации эрбия ( $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) изменялась концентрация иттербия в пределах  $(4,7-19) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Концентрации активаторов представлены в табл. 1. Измерения проведены на образцах размером  $10 \times 10$  мм и толщиной 0,5–3 мм. Толщина образцов выбиралась в зависимости от концентрации активатора так, чтобы уменьшить эффект реабсорбции.

| № образца | $N_{Er}, 10^{20} \text{ см}^{-3}$ | $N_{Yb}, 10^{20} \text{ см}^{-3}$ |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1         | 0,5                               | 19                                |
| 2         | 1                                 |                                   |
| 3         | 2,1                               |                                   |
| 4         | 4,2                               |                                   |
| 5         | 8,5                               |                                   |
| 6         | 9,5                               |                                   |
| 7         | 1                                 | 0                                 |
| 8         |                                   | 4,7                               |
| 9         |                                   | 9,5                               |

Таблица 1. Составы образцов

В работе определены: параметры Джадда-Офельта [8, 9], сечения поглощения из основного состояния, сечение вынужденного излучения, времена затухания люминесценции эрбия для перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  (1535 нм) и иттербия для перехода  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  (980 нм), квантовый выход люминесценции. По методике [10] проведены прямые измерения спектров усиления/потерь для различных уровней накачки.

Спектры поглощения стекол измерены с помощью УФ-ИК спектрофотометра (Cary 500 фирмы «Varian») в спектральном диапазоне 300–3000 нм. Анализ Джадда-Офельта проведен на основе определения сечений поглощения для электрических дипольных переходов и расчета трех параметров  $\Omega_t$  ( $t = 2, 4, 6$ ). При помощи этих параметров по формуле (1) была определена вероятность спонтанного перехода  $A_{ij}$ .

$$A_{ij} = \frac{64\pi^4 e^2 \nu^3}{2h(2J+1)} \cdot \frac{n(n^2+2)^2}{9} \cdot S(SLJ \rightarrow S'L'J'), \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота максимума полосы поглощения,  $n$  – показатель преломления,  $h$  – постоянная Планка,  $J$  – кратность вырождения уровня, с которого осуществляется переход,  $S(SLJ \rightarrow S'L'J')$  – сила линии перехода с уровня  ${}^4I_{13/2}$  на уровень  ${}^4I_{15/2}$ . Величина, обратная вероятности спонтанного перехода, – радиационное время жизни люминесценции.

Спектры флюоресценции возбуждались излучением  $\lambda_{\text{pump}} = 975$  нм перестраиваемого непрерывного титан-сапфирового лазера (модель 3900 фирмы «Spectra Physics»), управляемого неодимовым лазером с удвоением частоты  $\lambda_{\text{pump}} = 532$  нм (модель «Millennia-Xs» фирмы «Spectra Physics»). Излучение накачки модулировалось с частотой 12 Гц, его мощность измерялась пироэлектрическим приемником (Kimmon Electric Co). Спектры флюоресценции записаны с использованием монохроматора (модель «Acton-300» фирмы «Acton Research Corporation») и InGaAs-приемника (модель ID-441 фирмы «Acton Research Corporation») для ИК области. Сигналы от приемника усиливались и обрабатывались при помощи цифрового синхронного усилителя (модель SR850 фирмы «Stanford Research Systems»). Сечения вынужденного излучения были получены методом МакКамбера [11].

Для измерения кинетики затухания люминесценции использовано излучение импульсного лазера LQ 129 фирмы Solar Laser system ( $\lambda_{\text{pump}} = 975$  нм). Кривые затухания люминесценции зарегистрированы цифровым запоминающим осциллографом (модель «Infinium HP54830» фирмы «Agilent Technologies»). Время жизни определялось методом наименьших квадратов с простой или двойной экспоненциальной функцией. Все измерения проведены при комнатной температуре.

Накачка (отношение населенности уровня  ${}^4I_{13/2}$  ( $N_2$ ) к общему числу ионов эрбия  $N$ ) определена посредством измерения изменения поглощения ( $\Delta N_I$ ) из основного состояния для перехода  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4H_{11/2}$ , считая, что  $\Delta N_I = N_2$  [10]. Суть метода заключается в измерении отношения изменения коэффициента поглощения к сечению поглощения для данной полосы при изменении мощности накачки.

Спектры усиления/потерь были измерены путем регистрации прошедшего через накаченную область зондирующего излучения ( $\lambda = 1,4-1,7$  мкм) [10]. Для этого диафрагмой малого диаметра (0,2 мм) в образце выделялся объем, через который одновременно пропускались излучение накачки и зонд. В зависимости от мощности накачки излучение зонда либо ослабляется (спектры потерь), либо усиливается (спектры усиления).

## Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлены характерные зависимости сечения поглощения и излучения от длины волны, полученные методом МакКамбера.

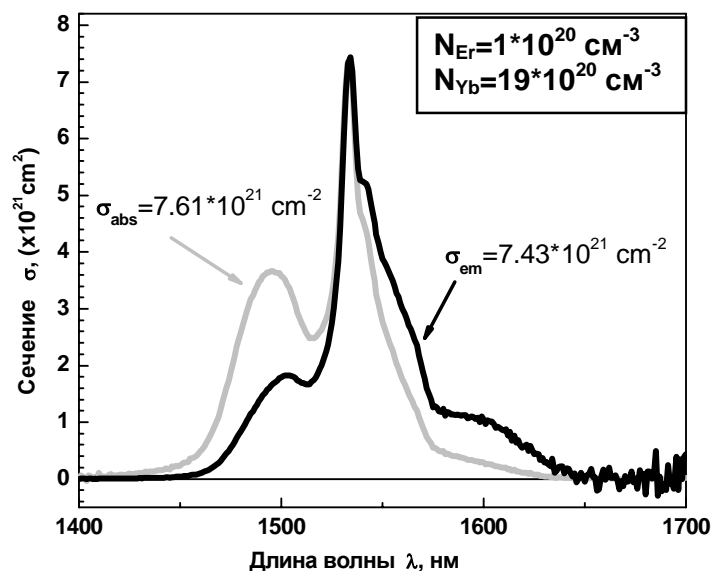


Рис. 1. Спектр сечения поглощения и излучения эрбия

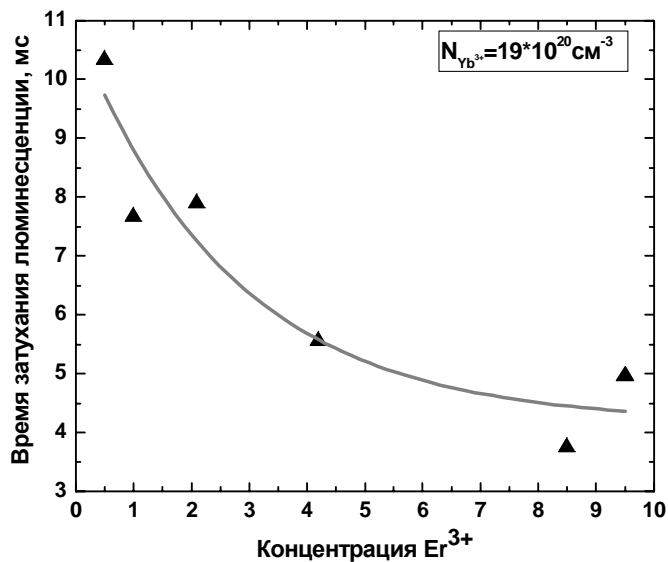


Рис. 2. Времена затухания люминесценции для лазерного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$

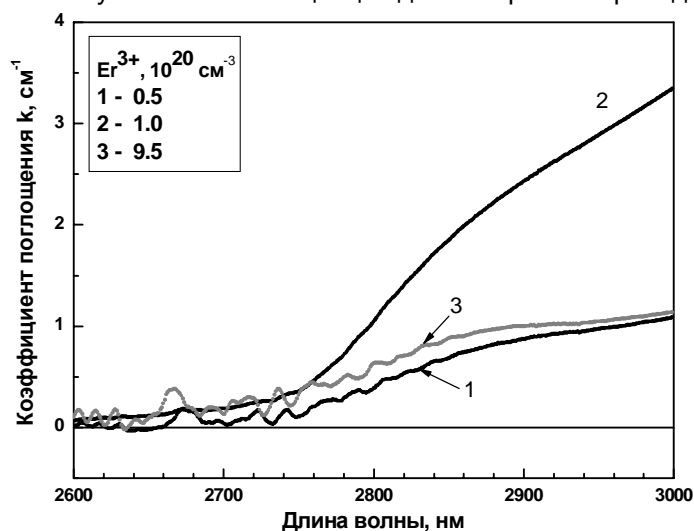


Рис. 3. Полосы поглощения OH групп

На рис. 2 представлены экспериментально измеренные времена затухания люминесценции лазерного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  для ряда с постоянным содержанием иттер-



бия  $19 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Из графика видно, что с увеличением концентрации  $\text{Er}^{3+}$  время жизни люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  уменьшается. Это обусловлено двумя факторами: тушением возбуждения на  $\text{OH}^-$  группе [7, 12] или нелинейным тушением люминесценции [13-15]. На рис. 3 представлена одна из полос поглощения для  $\text{OH}^-$  группы в районе 3 мкм. По коэффициенту поглощения  $k$  можно произвести оценку содержания  $\text{OH}^-$  групп в различных образцах, т.е. чем больше  $k$ , тем больше  $\text{OH}^-$  групп содержит образец. Из рис. 3 видно, что в образце 2  $\text{OH}^-$  значительно больше, чем в 1 (кривые 1 и 2). Следовательно, основным фактором уменьшения времени жизни люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  является тушение на  $\text{OH}^-$  группе. В образцах 1 и 6 содержание воды примерно одинаково (кривые 1 и 3), а концентрации эрбия различаются в 19 раз, в этом случае основным фактором уменьшения времени жизни люминесценции является нелинейное тушение люминесценции.

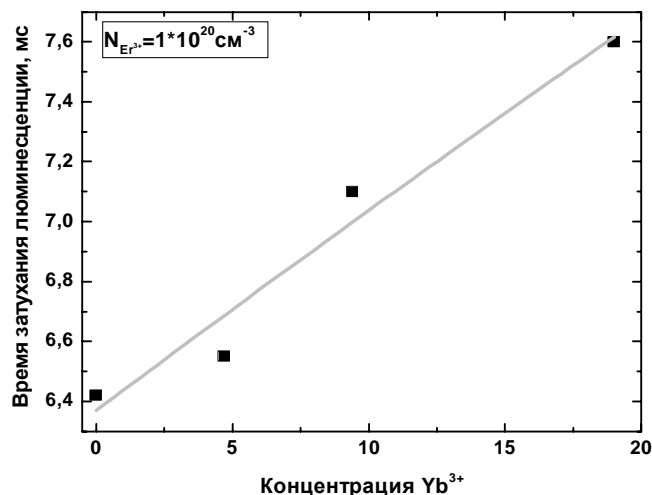


Рис. 4. Зависимость времени затухания люминесценции для лазерного перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  от концентрации ионов иттербия

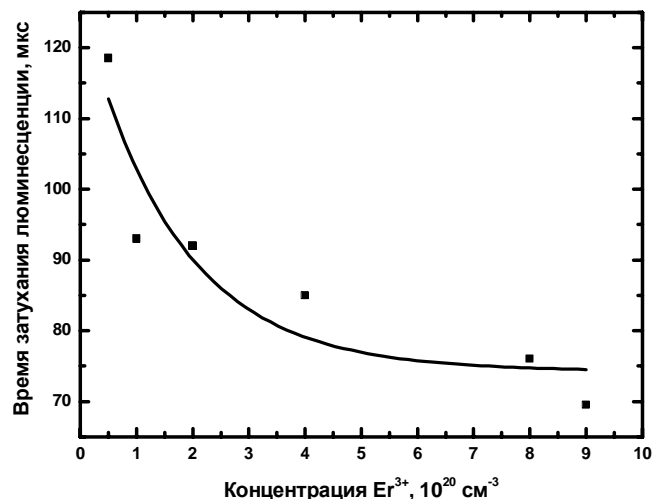


Рис. 5. Зависимость времени затухания люминесценции иттербия от концентрации ионов эрбия

Рассмотрим экспериментальные зависимости кинетики затухания люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  от концентрации иттербия (рис. 4). Из графика видно, что с увеличением концентрации ионов иттербия время жизни ионов эрбия увеличивается. Это может быть связано с тем, что положение редкоземельных ионов и  $\text{OH}^-$  в стекле коррелировано. При увеличении концентрации ионов иттербия вероятность тушения люминесценции эрбия  $\text{OH}^-$  группой уменьшается, поскольку увеличивается общее число редкоземельных ионов.

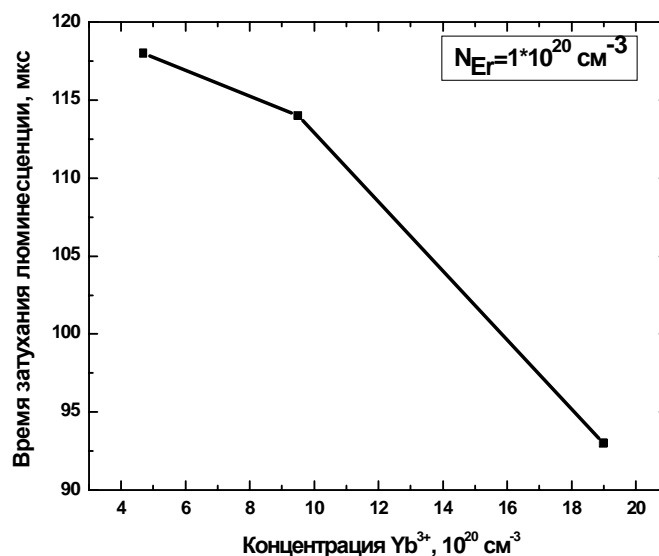


Рис. 6. Зависимость времени затухания люминесценции иттербия от концентрации ионов иттербия

Измерения зависимости времени затухания люминесценции для иттербия при различных концентрациях эрбия, показали что, время жизни уменьшается с ростом количества ионов эрбия (рис. 5), что обуславливается тем, что эрбий тушит ионы иттербия [7]. Время жизни ионов иттербия уменьшается и с увеличением концентрации иттербия (рис. 6). Это обусловлено более эффективной передачей возбуждения с иттербия на эрбий [13].

В табл. 2 приведены значения параметров Джадда-Офельта и рассчитанных из них радиационного времени и квантового выхода люминесценции перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ . Уменьшение квантового выхода люминесценции связано с тушением возбуждения на ОН-группе, а также с нелинейным тушением люминесценции.

| $N_{Er}$ ,<br>$10^{20} \text{ см}^{-3}$ | $N_{Yb}$ ,<br>$10^{20} \text{ см}^{-3}$ | Сила<br>линии,<br>$10^{-20}$ | Параметры Джадда-Офельта,<br>$10^{-20} \text{ см}^{-2}$ |            |            | $\tau_{\text{рад}}$ , мс | $\eta$ , % |
|---|---|------------------------------|---|------------|------------|--------------------------|------------|
|   |   |                              | $\Omega_2$  | $\Omega_4$ | $\Omega_6$ |                          |            |
| 0,5                                     | 19                                      | 1,82                         | 6,85  | 1,36       | 1,06       | 12,9                     | 80         |
| 1                                       |   | 1,78                         | 7,10  | 1,46       | 1,02       | 13,2                     | 58         |
| 2,1                                     |   | 1,84                         | 6,48  | 1,21       | 1,09       | 12,8                     | 61         |
| 4,2                                     |   | 1,63                         | 5,95  | 1,19       | 0,95       | 14,6                     | 38         |
| 8,5                                     |   | 1,60                         | 6,13  | 1,18       | 0,94       | 14,6                     | 25         |
| 9,5                                     |   | 1,57                         | 6,69  | 1,15       | 0,95       | 14,9                     | 33         |
| 1                                       | 0                                       | 1,27                         | 5,52  | 1,10       | 7,26       | 17,9                     | 37         |
|   | 4.7                                     | 1,47                         | 6,07  | 1,09       | 0,85       | 15,6                     | 41         |
|   | 9.5                                     | 1,47                         | 6,16  | 1,18       | 0,85       | 15,6                     | 45         |

Таблица 2. Параметры Джадда-Офельта

На рис. 7 показаны изменения полос поглощения из основного состояния от мощности накачки. Максимальные значения этих изменений мы использовали для получения значений населенности на уровне  ${}^4I_{13/2}(N_2)$ . На рис. 8 показана зависимость отношения  $N_2/N_{Er}$  от мощности накачки для ряда с переменным содержанием ионов эрбия. При увеличении мощности накачки происходит увеличение населенности на  $N_2$ , затем кривые выходят на насыщение. При этом только для образцов с концентрациями эрбия 0,5 и  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  удается получить инверсию населенности ( $N_2/N_{Er} > 50\%$ ). Времена жизни люминесценции для образцов с концентрациями эрбия более  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  недостаточны для создания инверсии населенности

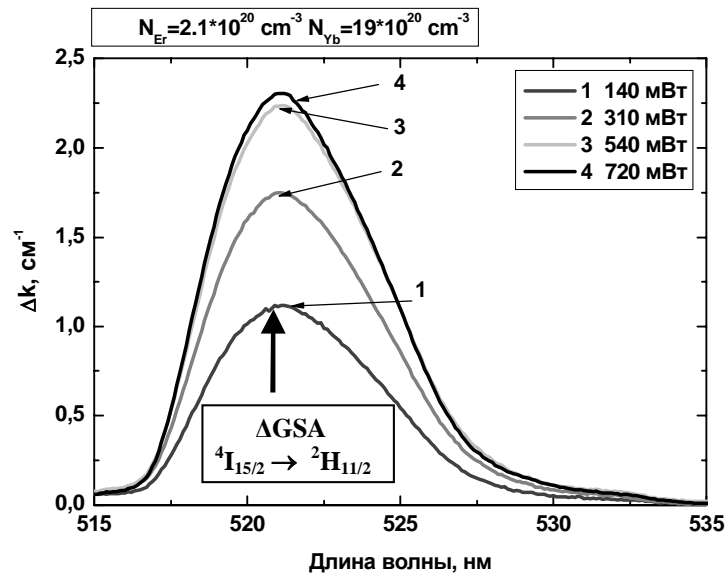


Рис. 7. Зависимость изменения полос поглощения из основного состояния ( $\Delta GSA$ ) от мощности

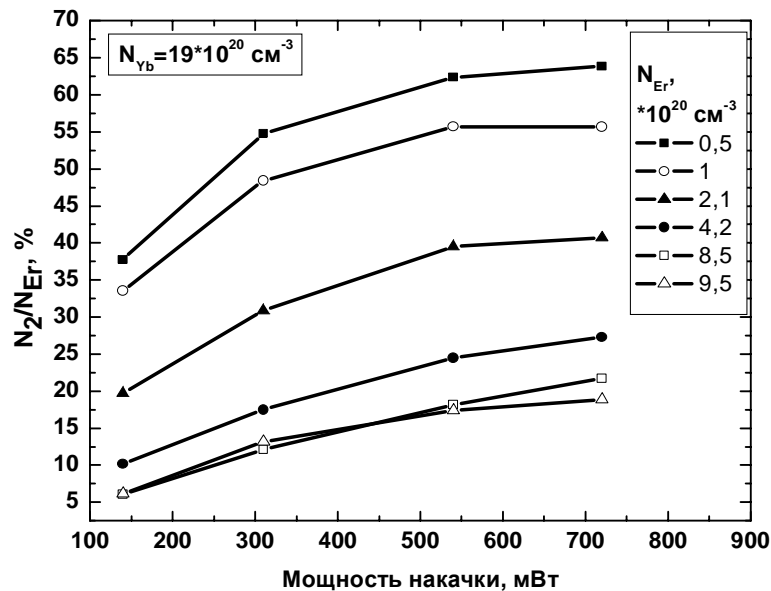


Рис. 8. Зависимость отношения населенности уровня  $4I_{13/2}$  к концентрации ионов эрбия от мощности накачки

Рассмотрим зависимость отношения  $N_2/N_{Er}$  от мощности накачки для ряда с переменным содержанием ионов иттербия (рис. 9). Из графика видно, что увеличение концентрации иттербия от  $4,7$  до  $19 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  приводит к увеличению населенности на  $N_2$ , поскольку увеличивается поглощение излучения накачки и эффективность переноса возбуждения с иттербия на эрбий [13].

Экспериментальные спектры усиления/потерь приведены на рис. 10. Определена предельная концентрация эрбия –  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при концентрации иттербия  $19 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , при которой наблюдается усиление ( $g = 0.18 \text{ см}^{-1}$ ). Увеличение концентрации ведет к уменьшению коэффициента усиления (рис 11). Одной из основных причин этого эффекта являются времена жизни люминесценции недостаточные для создания инверсии населенности. Исследовано влияние мощности накачки на коэффициент усиления (рис. 12). Установлено, что увеличение мощности накачки (от 500 до 700 мВт) приводит к малому увеличению коэффициента усиления ( $\sim 0,03 \text{ см}^{-1}$ ), то есть наблюдается эффект насыщения.

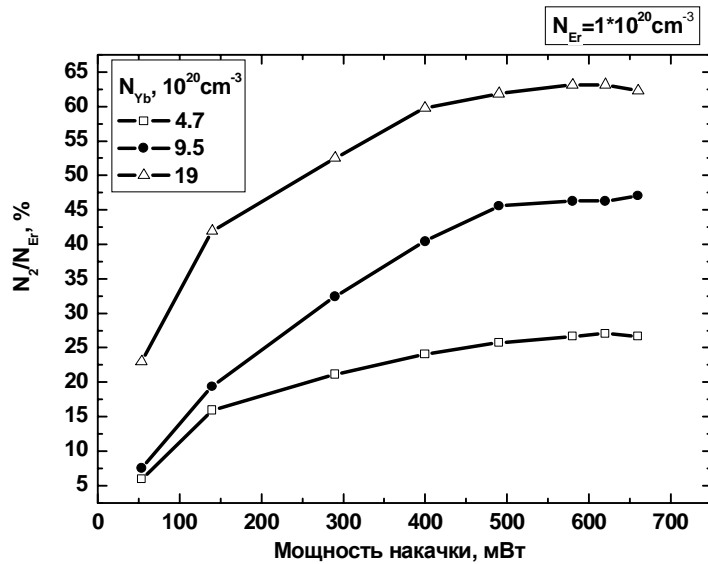


Рис. 9. Зависимость отношения населенности уровня  $^4I_{13/2}$  к концентрации ионов эрбия от мощности накачки

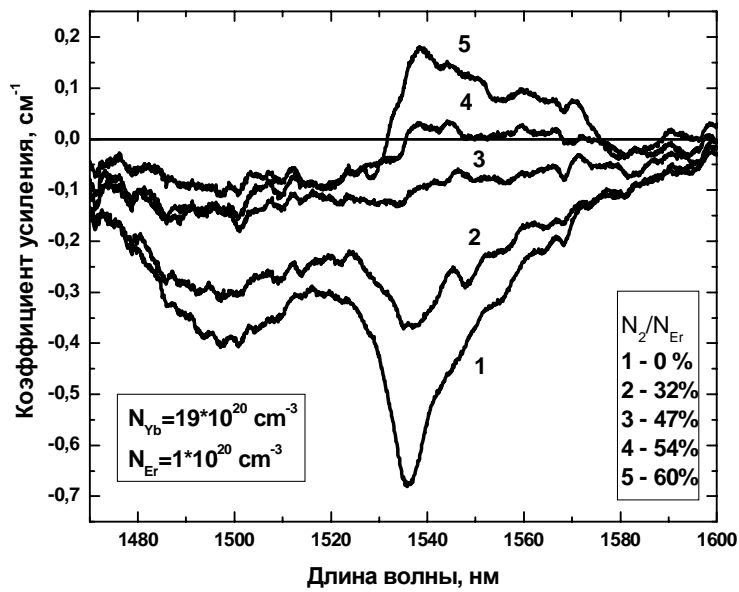


Рис. 10. Спектры усиления/потерь

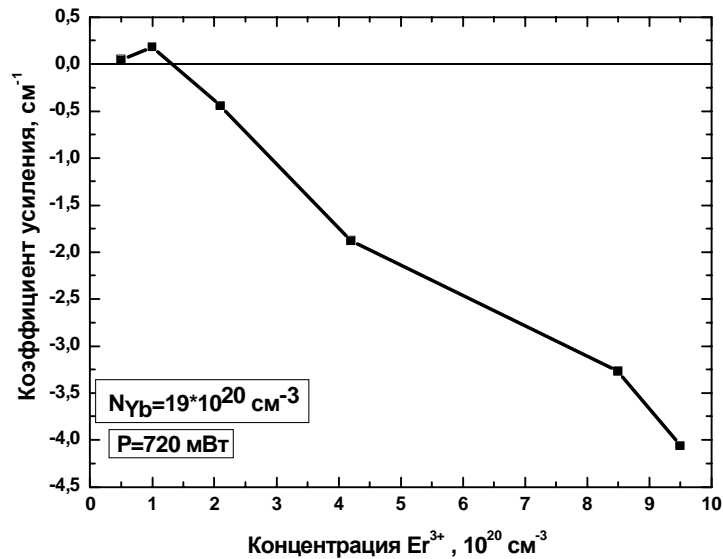


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления от концентрации ионов эрбия

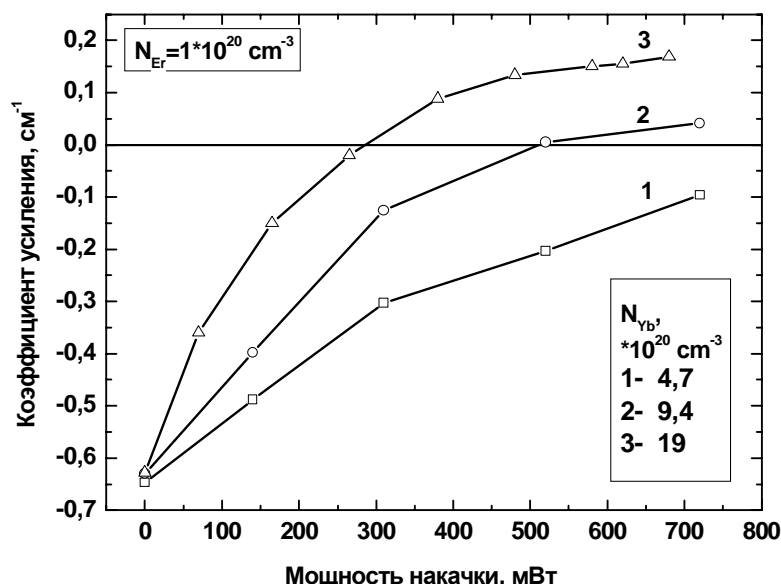


Рис. 12. Зависимость коэффициента усиления от мощности накачки для образцов с различной концентрацией ионов иттербия

## Заключение

Проведены комплексные исследования спектрально-люминесцентных и лазерных свойств иттербий-эрбиевых фосфатных стекол с различным содержанием ионов эрбия и иттербия. Определена предельная концентрация эрбия –  $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , при концентрации иттербия  $19 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , при которой наблюдается усиление ( $g=0.18 \text{ см}^{-1}$ ). На основе полученных данных можно провести оптимизировать концентрации ионов эрбия и иттербия и их соотношения, а также определить их предельные концентрации в лазерном стекле.

Работа выполнена в рамках тематического плана НИР СПбГУ ИТМО (№10184), финансируемого Министерством образования и науки РФ, а так же при поддержке гранта НШ-1405.2003.3 Президента РФ по поддержке ведущих научных школ.

## Литература

1. P. Laporta, S. Taccheo, S. Longhi, O. Svelto, C. Svelto, Erbium-ytterbium microlasers: optical properties and lasing characteristics // *Opt. Mat.* 11, 1999, 269–288.
2. Z. Cai, A. Chardon, H. Xu, P. Feron, G. Stefan, Laser characteristics at 1535 nm and thermal effects of an Er:Yb phosphate glass microchip laser pumped by Ti: sapphire laser // *Opt. Commun.*, 203 (2002), 301–313.
3. C. Svelto, S. Taccheo, E. Bava, P. Laporta, Characterization of Yb-Er: glass laser at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength in terms of amplitude and frequency stability // *Measurement*, 26 (1999), 119–128.
4. A. Levoshkin, A. Petrov, J.E. Montagne, High-efficiency diode-pumping Q-switched Yb:Er:glass laser *Opt. Commun.*, 185 (2000), 399–405.
5. D. Veasey, D. Funk, P. Peters, N. Sanford, G. Obarski, N. Fontaine, M. Young, A. Peskin, W. Liu, S.N. Houde-Walter, J. Hayden, Yb/Er-codoped and Yb-doped waveguide lasers in phosphate glass, *Journal of Non-Crystalline Solids* 263&264 (2000), 369–381.
6. S. Honkanen, T. Ohtsuki, S. Jiang, S.I. Najafi, N. Peyghambarian, High Er concentration phosphate glasses for planar waveguide amplifiers, *Proc. of SPIE*, vol. 2996, 1997, 32–39.
7. E. Desurvire, *Erbium-doped Fiber Amplifiers*, Wiley, New York, 1994.
8. Judd B.R., Optical absorption intensities of rare earth ion, *Phys. Rev.* 1962, 127, №3, 750–761.
9. Ofelt G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ion, *J. Chem. Phys.*, 1962, 36, №3, 511–520.
10. Асеев В. А., Никоноров Н. В., Пржеvusкий А.К., Чухарев А. В., Рохмин А.С., Измерение спектров усиления/потерь в высококонцентрированных лазерных стеклах, активированных иттербием-эрбием. // *Оптический журнал*. 2003. Т.70. № 11. Mc Cumber D.E., Theory of photon-terminated, *Phys. Rev.*, 1964, 134, A299-A306.
11. L.Zhang, H. Hu, The effect of  $\text{OH}^-$  on IR emission of  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  and  $\text{Er}^{3+}$  doped tetraphosphate glasses, *J. of physics and chemistry of solids*, 63 (2002) 575–579.

11. N. V. Nikonorov, A. K. Przhevutskii., Chukharev A. V., Characterization of non-linear upconversion quenching in Er-doped glasses modeling and experiment, *J. of Non-Crystalline Solids*, 324, 2003, 92–108.
12. B. –C. Hwang, C. Jiang, T.Luo, L.Le Neindre, J.Watson, N. Peyghambarian, Characterization of cooperative upconversion and energy transfer of  $\text{Er}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  doped phosphate glasses, *Proc. of SPIE*, 3622, (1999), 10–18.
13. S Sergeev, D. Khoptyar, B. Jaskorzynska, Upconversion and migration in erbium-doped silica waveguides in the continuous-wave excitations switch-off regime, *Phys Review B* v.65, n 23, 2002, p 233104/1–4.

# АНИЗОТРОПИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ СТЕКЛАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ТУЛИЕМ

А.С. Рохмин

Научные руководители – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никонов,  
д.ф.-м.н., профессор А.К. Пржевуский

Обнаружена частичная поляризация люминесценции (1.47 мкм) стекол, активированных тулием, при возбуждении линейно поляризованным лазерным светом (0.79 мкм). Степень поляризации зависит, как от спектрального диапазона возбуждения, так и от спектрального диапазона регистрации, достигая максимального значения  $\sim 0.1$ .

## Введение

Редкоземельные активаторные центры в стекле не обладают симметрией, поскольку его структура неупорядочена. Следовательно, они относятся к широкой группе центров, которые поглощают и испускают свет анизотропно. Такая анизотропия оптических центров приводит к явлению «поляризованной люминесценции» (ПЛ) стекол [1], а именно, к появлению частичной поляризации спектров люминесценции при возбуждении линейно поляризованным светом. Это явление наблюдается для стекол, активированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$  [2–5]. Наиболее подробно оно было исследовано для стекол, активированных ионами  $\text{Eu}^{3+}$  [2–3].

В настоящее время особый интерес вызывают тулиевые стекла, так как они могут быть использованы в качестве активной среды волоконных усилителей света с длиной волны 1.47 мкм. Наиболее перспективными являются высокопреломляющие стекла. В частности, среди тяжелых оксидных стекол выделяются сурьмяно-силикатные [6], германатные и теллуридные [7–10]. Специфической особенностью этих стекол является то, что высокочастотная граница колебательного спектра для них имеет существенно меньшее значение, чем для силикатных и фосфатных стекол. Это приводит к уменьшению вероятностей внутрицентровых безызлучательных переходов. Другая особенность тяжелых стекол – большой показатель преломления, что обуславливает увеличение скорости излучательных переходов. В результате оба эти обстоятельства способствуют увеличению квантового выхода люминесценции для тех оптических переходов, которые сильно потушены в стеклах силикатных и фосфатных систем.

Исследование ПЛ на основном лазерном переходе актуально с точки зрения применения тулиевых стекол в качестве активной среды для волоконных усилителей света, поскольку наведенная светом поляризация стимулированного излучения может влиять на отношение «сигнал/шум» усилителя и приводить к уменьшению коэффициента усиления.

## Объект исследования и методика эксперимента

В работе исследованы три стеклообразующие матрицы: сурьмяно-силикатные, германатные и теллуридные стекла с содержанием тулия, изменяющимся в диапазоне 0.01–0.4 мол.%. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластинки, у которых были отполированы 4 грани, с целью предотвращения деполяризации как возбуждающего света, так и света люминесценции. Толщина пластинок выбрана из условия минимальной реабсорбции света люминесценции.

Схема установки, использовавшейся для наблюдения ПЛ, изображена на рис.1. Люминесценция возбуждалась в диапазоне 760–820 нм излучением непрерывного титан-сапфирового лазера (модель 3900S, *Spectra Physics*) (2), для накачки которого использован неодимовый лазер с удвоением частоты ( $\lambda = 532$  нм) (модель *Millennia-Xs*, *Spectra Physics*) (1). Для изменения направления линейной поляризации возбуждающего света использованы кристалл  $\text{LiNbO}_3$  (3) и призма Глана (4).

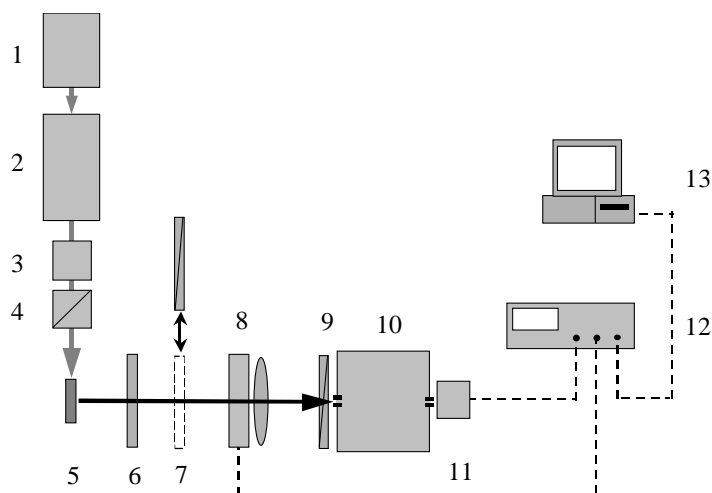


Рис.1. Экспериментальная установка: 1 – Nd-лазер ( $\lambda = 532$  нм), 2 – Ti-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> лазер, 3 – кристалл LiNbO<sub>3</sub>, 4 – призма Глана, 5 – образец, 6 – ИК фильтр, 7, 9 – пленочный поляризатор, 8 – вращающаяся пластинка  $\lambda/2$ , 10 – монохроматор, 11 – InGaAs-приемник, 12 – синхронизированный усилитель, 13 – компьютер

Сигнал люминесценции регистрировался в направлении, перпендикулярном к направлению возбуждающего света, при помощи монохроматора (модель *Acton-300*, *Acton Research Corporation*) (10) и приемника InGaAs (модель *ID-441*, *Acton Research Corporation*) (11).

Для повышения чувствительности установки по отношению к регистрации малых изменений интенсивности света для ортогональных поляризаций свет люминесценции был промодулирован с помощью вращающейся полуволновой пластинки (8) и закрепленного пленочного поляризатора (9). Интенсивность света люминесценции, прошедшего через эти оптические элементы, оказывается промодулированной на учетверенной частоте вращения полуволновой пластинки. Амплитуда модуляции пропорциональна величине  $\Delta I(\lambda) = I_{\parallel}(\lambda) - I_{\perp}(\lambda)$ , где  $I_{\parallel}(\lambda)$  – интенсивность света люминесценции, поляризованного параллельно поляризации возбуждающего света, а  $I_{\perp}(\lambda)$  – интенсивность света люминесценции, поляризованного перпендикулярно поляризации возбуждающего света.

Для улучшения отношения сигнал/шум использована система синхронного детектирования, реализованная на основе управляемого синхронизируемого усилителя (модель *SR850*, *Stanford Research Systems*) (12). Источником опорного сигнала служил светодиод, фиксирующий вращение пластинки  $\lambda/2$ . Результаты измерений после компьютерной обработки давали дифференциальный спектр  $\Delta I(\lambda)$ .

Интенсивность света люминесценции  $I_{\parallel}(\lambda)$  определена путем измерения протектированного сигнала в случае, когда перед полуволновой пластинкой расположен пленочный поляризатор. Результаты измерений  $I_{\parallel}(\lambda)$  и  $\Delta I(\lambda)$  позволяли определить степень поляризации  $P = \Delta I(\lambda) / [I_{\parallel}(\lambda) + I_{\perp}(\lambda)] = \Delta I(\lambda) / 2 [I_{\parallel}(\lambda) - \Delta I(\lambda)]$ .

Для разделения света люминесценции и возбуждающего света после образца расположен фильтр ИКС-6. Установка проградуирована по спектральной чувствительности с помощью ленточной лампы.

## Результаты и обсуждения

Измерения показали, что полоса люминесценции  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$  в спектрах стекол, активированных тулием, приобретает частичную поляризацию при возбуждении образцов линейно поляризованным светом с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости, содержащей направление возбуждения и направление наблюдения (рис.2–3). Эффект наблюдался для стекол всех исследованных составов – сурьмяно-силикатных, гер-



манатных и теллуридных. Во всех случаях контур дифференциального спектра  $\Delta I(\lambda)$  существенно отличался от обычного контура спектра люминесценции (рис.2). Таким образом, степень поляризации менялась немонотонным образом в пределах полосы  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$  и имела различные значения для разных штарковских компонент. Все эти факты естественным образом объясняются в рамках следующей модели [3].

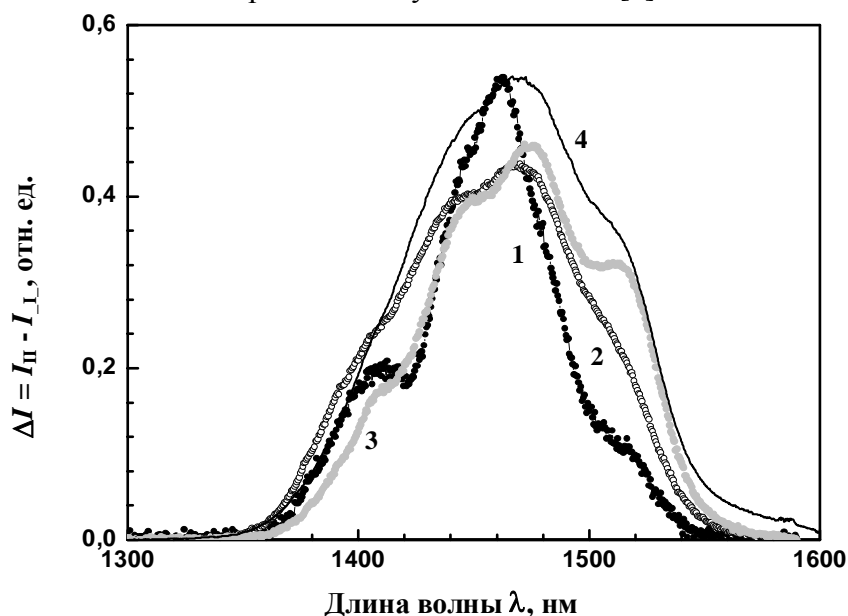


Рис.2. Спектры поляризованной люминесценции тулия ( $Tm_2O_3 = 0.3$  мол. %) в теллуридном стекле, полученные при возбуждении в разные области полосы поглощения  ${}^3H_6 - {}^3H_4$   $\lambda_{\text{воз}} = 768$  нм (кривая 1),  $\lambda_{\text{воз}} = 791$  нм (2) и  $\lambda_{\text{воз}} = 812$  нм (3) и спектр обычной люминесценции тулия (4)

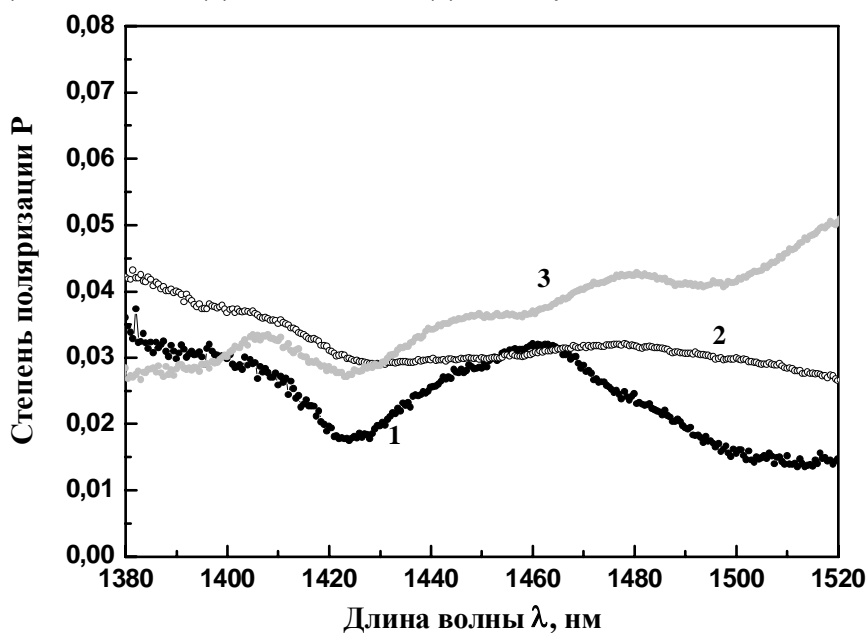


Рис.3. Спектральная зависимость степени поляризации люминесценции для теллуридного стекла ( $Tm_2O_3 = 0.3$  мол. %) при разных накачках:  $\lambda_{\text{воз}} = 768$  нм (кривая 1),  $\lambda_{\text{воз}} = 791$  нм (2) и  $\lambda_{\text{воз}} = 812$  нм (3)

Ввиду неупорядоченности структуры стекла активаторные редкоземельные центры в нем несимметричны. Так как ион  $Tm^{3+}$  – не «крамерсовский» (имеет на незаполненной  $4f$  оболочке 12 электронов), то под влиянием несимметричного окружения вырождение его энергетических уровней снимается полностью, и штарковские уровни не вырождены. При оптическом переходе между парой невырожденных уровней анизотропия поглощения и излучения света соответствует модели линейного осциллятора.

Таким образом, каждой штарковской компоненте в спектре поглощения или люминесценции может быть сопоставлен линейный осциллятор. Общего направления квантования у несимметричного центра нет, и осцилляторы, соответствующие разным штарковским компонентам, направлены под углами друг к другу.

Модель линейных осцилляторов дает хорошо известное объяснение эффекта поляризованной люминесценции, наблюдаемой при возбуждении линейно поляризованным светом [1]. Под действием такого света преимущественно возбуждаются оптические центры, у которых направление осциллятора, ответственного за поглощение, близко к направлению поляризации возбуждающего света. По отношению к возбужденным центрам образец приобретает аксиальную симметрию, и анизотропия его люминесценции соответствует такой симметрии. Величина степени поляризации люминесценции определяется углом между поглощающим и излучающим осцилляторами.

С целью проверки применимости описанной выше модели для объяснения поляризованной люминесценции тулиевых стекол были проведены измерения, при которых электрический вектор возбуждающего света был параллелен направлению наблюдения (рис. 4). В остальном геометрия эксперимента сохранялась. В этом случае наведенная светом ось аксиальной симметрии возбужденного образца совпадает с направлением наблюдения и, следовательно, измеряемая люминесценция должна быть неполяризована (точно так же, как неполяризованы спектры поглощения и люминесценции одноосного кристалла при наблюдении вдоль оптической оси). Результаты измерений согласовались с таким прогнозом: величина  $\Delta I(\lambda)$  была в 40 раз меньше, чем в случае, когда электрический вектор возбуждающего света был перпендикулярен плоскости, содержащей направление возбуждения и направление регистрации. Отличие сигнала  $\Delta I(\lambda)$  от нуля можно объяснить угловой расходимостью пучка света люминесценции.

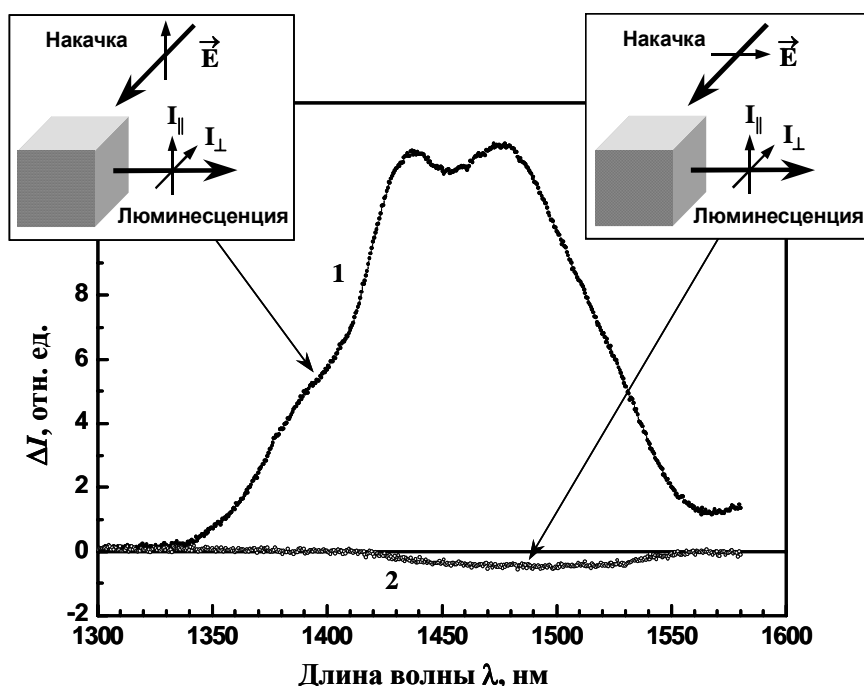


Рис. 4. Спектры поляризованной люминесценции тулия в теллуридном стекле ( $\text{Tm}_2\text{O}_3 = 0.05$  мол.%) при накачке  $\lambda_{\text{воз}} = 791$  нм. (1) – электрический вектор возбуждающего света перпендикулярен направлению наблюдения, (2) – электрический вектор возбуждающего света параллелен направлению наблюдения

Описываемые ниже результаты дальнейших исследований ПЛ тулиевых стекол так же хорошо согласуются с осцилляторной моделью.

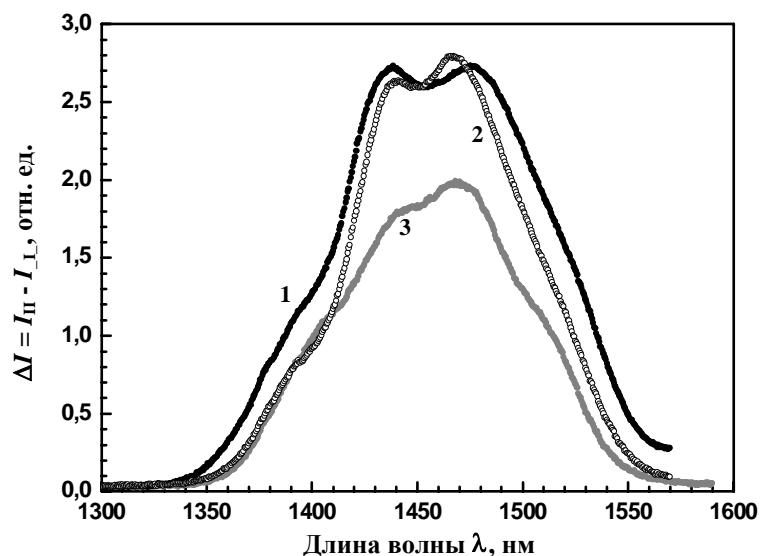


Рис. 5. Спектры поляризованной люминесценции тулия ( $Tm_2O_3 = 0.3$  мол. %) в сурьмяно-силикатном (кривая 1), германатном (2) и теллуридном (3) стеклах при накачке  $\lambda_{воз} = 791$  нм

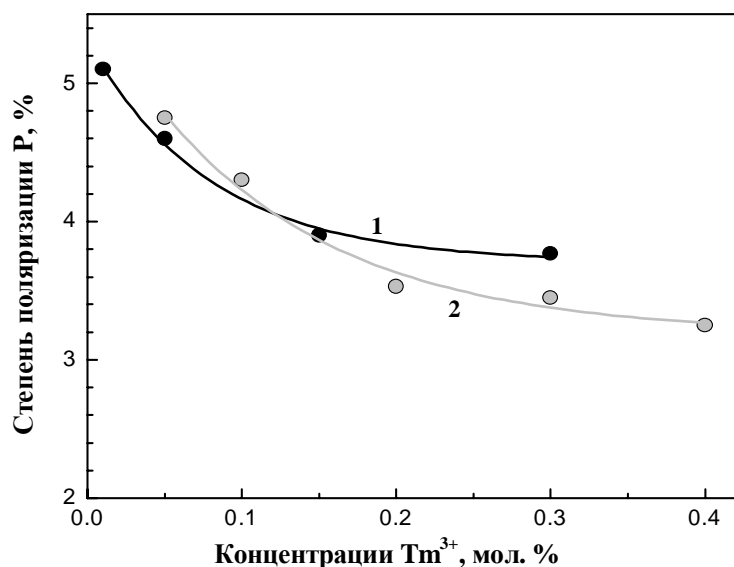


Рис. 6. Концентрационная деполяризация люминесценции тулия ( $Tm_2O_3 = 0.3$  мол. %) для сурьмяно-силикатного (кривая 1) и германатного (2) стекол, измеренная при накачке  $\lambda_{воз} = 791$  нм.

В частности, были измерены дифференциальные спектры  $\Delta I(\lambda)$  и спектры степени поляризации  $P(\lambda)$  при возбуждении в разные участки полосы поглощения тулия  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ . Сканирование длины волны возбуждающего света осуществлялось перестраиваемым титан-сапфировым лазером. Оказалось, что при этом меняется форма обоих контуров - как  $\Delta I(\lambda)$  (рис.2), так и  $P(\lambda)$  (рис. 3). Таким образом, степень поляризации зависела как от длины волны возбуждающего света -  $\lambda_{возб}$ , так и от области регистрации люминесценции -  $\lambda_{люм}$ . Существование таких зависимостей предсказывается осцилляторной моделью, согласно которой степень поляризации определяется углом между поглощающим и излучающим осцилляторами. При изменении длины волны возбуждающего света в акте поглощения участвуют различные штарковские компоненты полосы  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$  и, следовательно, разные поглощающие осцилляторы. А при сканировании спектра люминесценции в излучении участвуют различные штарковские компоненты полосы  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ , т.е. разные излучающие осцилляторы.

Благодаря этому свойству спектры  $\Delta I(\lambda)$  и  $P(\lambda)$  дают весьма обширную добавочную информацию о штарковской структуре как полос спектра поглощения, так и полос спектра люминесценции. Они достаточно чувствительны к изменению штарковской

структуры при изменении химического состава стекла. Об этом свидетельствует рис. 5, на котором приведены контуры спектров  $\Delta I(\lambda)$  для тулиевых стекол разного состава – сурьмяно-силикатных, германатных и теллуридных, полученные при одинаковых условиях возбуждения и регистрации.

Измерения показали, что степень поляризации уменьшается с ростом содержания тулия в образце (рис. 6). Такая концентрационная деполяризация является хорошо известным явлением при изучении поляризованной люминесценции [1]. Она объясняется миграцией возбуждений по ансамблю оптических центров, так как при этом теряется информация о направлении поглощающего осциллятора в оптическом центре, исходно возбужденном светом. Как для германатных, так и для сурьмяно-силикатных стекол максимальные значения степени поляризации ( $\sim 0.1$ ) наблюдались для образцов с наименьшей концентрацией тулия 0.1 мол. %.

## Заключение

Полоса люминесценции  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$  в спектрах стекол, активированных тулием, приобретает частичную поляризацию при возбуждении образцов линейно поляризованным светом. Эффект наблюдался для стекол всех исследованных – составов: сурьмяно-силикатных, германатных и теллуридных. Во всех случаях степень поляризации меняется немонотонным образом в пределах полосы  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ , так что форма контура дифференциального спектра  $\Delta I(\lambda) = I_{\parallel}(\lambda) - I_{\perp}(\lambda)$  существенно отличается от обычного спектра люминесценции. Степень поляризации зависит как от спектрального диапазона возбуждения, так и от спектрального диапазона регистрации, достигая максимального значения  $\sim 0.1$ . Увеличение концентрации тулия приводит к увеличению скорости миграции возбуждения между ионами тулия и уменьшению степени поляризации. Все наблюдавшиеся эффекты могут быть удовлетворительно объяснены на основе модели, согласно которой при оптическом переходе между парой штарковских подуровней анизотропия поглощения и излучения света соответствует модели линейного осциллятора.

Работа выполнена в рамках тематического плана НИР СПбГУ ИТМО (№10184), финансируемого Министерством образования и науки РФ, а так же при поддержке гранта НШ-1405.2003.3 Президента РФ по поддержке ведущих научных школ.

## Литература

1. Феофилов П.П. Поляризованная люминесценция атомов, молекул и кристаллов. М.: ГИФМЛ, 1959.
2. Kushida T, Takushi E, Oka V. Memories of photon energy, polarization and phase in luminescence of rare earth ions under resonant light excitation // J. Luminescence. 1976. 12/13. С. 723-727.
3. Лебедев В.П., Пржевуский А.К. Поляризованная люминесценция стекол, активированных ионами редких земель // Физ. твердого тела. 1977. 19. С.1373-1376.
4. Holl D.W. and Weber M.J. Polarized fluorescence line narrowing measurements of Nd laser glasses: Evidence of stimulated emission cross section anisotropy. // Appl. Phys. Lett.. 1983. 42. №2. pp. 157-159.
5. Рохмин А., Никоноров Н., Пржевуский А., Чухарев А., Ульященко А. Исследование поляризованной люминесценции в лазерных стеклах, активированных эрбием. // Оптика и спектроскопия. 2004. Т. 96. № 2. Стр. 203-209
6. Minelly J. and Ellison A. Applications of antimony-silicate glasses for fiber optic amplifiers // Optical Fiber Technology. 2002. Vol. 8. P. 123-138.
7. Tanabe S. Properties of  $Tm^{3+}$ -doped tellurite glasses for 1.4  $\mu m$  amplifier // Proceeding of SPIE. 2001. V. 4282. P. 85-92.
8. Wang J.S., Vogel E.M., and Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices. // Optical Materials. 1994. V. 3. P. 187-203.
9. Naftaly M., Shen S., and Jha A.  $Tm^{3+}$ -doped tellurite glass for a broadband amplifier at 1.47  $\mu m$ . // Applied Optics. 2000. V. 39. N27. P. 4979-4984.
10. Wang J.S., Snitzer E., Vogel E.M., and Sigel G.H. 1.47, 1.88 and 2.8  $\mu m$  emissions of  $Tm^{3+}$  and  $Tm^{3+}$ - $Ho^{3+}$ -codoped tellurite glasses. // J. Luminescence. 1994. Vol. 60-61. P. 145-149.

# СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

А.М. Уляшенко

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

Исследованы спектрально-люминесцентные свойства стекол, кристаллов и стеклокерамик, легированных ионами хрома и никеля. Предложена и реализована методика измерения абсолютного квантового выхода для ионов переходных металлов. Проведено сравнение свойств стеклокристаллических материалов с кристаллами и стеклами, показывающее перспективы использования таких материалов для создания волноводных лазеров и оптических усилителей в спектральном диапазоне 1.1–1.5 мкм.

## 1. Введение

В последнее время большое внимание уделяется созданию волноводных лазеров и усилителей света на основе материалов, активированных ионами переходных металлов [1, 2]. Это направление является перспективным благодаря электронной структуре ионов переходных металлов, которая обуславливает как широкие полосы поглощения в видимом диапазоне, так и широкие полосы люминесценции в ближнем ИК диапазоне, причем эти полосы люминесценции расположены внутри так называемого «телекоммуникационного окна» (1,1–1,6 мкм). Одними из самых популярных и наиболее изученных элементов группы железа (переходные металлы) являются хром и никель. Как хорошо известно, ионы  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$  демонстрируют свои излучательные свойства в диапазоне 1,0–1,6 мкм, что является вполне подходящим для создания перестраиваемых лазеров и широкополосных усилителей света для ближнего ИК диапазона. Именно поэтому долгое время разрабатывались и изучались кристаллические материалы, активированные этими ионами [3–8]. Так, например, кристаллы форстерита, активированные ионами  $\text{Cr}^{4+}$ , имеют высокие сечения вынужденного излучения ( $2 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ ), большую спектральную ширину излучения (400 нм), сравнительно высокий квантовый выход (десятки процентов) [7]. Все эти значения значительно превосходят аналогичные показатели материалов, активированных редкоземельными ионами. Однако кристаллы форстерита не применяются в телекоммуникациях, так как технология создания волноводных структур (планарных или волоконных) для кристаллов с ионами переходных металлов пока не разработана. С другой стороны, хорошо освоены технологии создания планарных и волоконных структур на основе стеклообразных материалов. Но ионы переходных металлов «не работают» в стеклах, т.е. люминесценция в них сильно потушена (квантовый выход составляет десятые доли процента).

Для решения задачи могут быть использованы стеклокристаллические материалы (стеклокерамики) [9,10]. Попыток создания активированных стеклокристаллических материалов для интегральной и волоконной оптики было множество. Основные работы были посвящены ионам неодима и эрбия, однако большинство из них были приостановлены из-за отсутствия перспектив: активатор не удавалось внедрить в кристалл, что, естественно, приводило к низкому квантовому выходу, или же кристаллы вырастали слишком крупными, в результате чего наблюдалось сильное рассеивание света. Наиболее успешными попытками для редкоземельных ионов стали стеклокерамики на основе оксифторидов [11, 12]. Однако на сегодняшний день есть сообщение о создании стеклокристаллических волокон, содержащих ионы  $\text{Cr}^{4+}$  (форстерит) [1] и ионы  $\text{Ni}^{2+}$  (шпигель) [13].

Как видно из названия, стеклокристаллические материалы состоят из стеклофазы и выращенных внутри нее нанокристаллов. Благодаря одновременному наличию двух этих состояний возникает множество вопросов: как поведет себя новый материал в зависимости от ориентации нанокристаллов? Где находятся ионы переходных металлов –

в стекле или внутри кристалла? Какие отличия существуют в спектрах кристаллов, стекол и новых материалов и как изменяется квантовый выход? Именно поэтому целью данной работы было исследование спектрально-люминесцентных свойств новых стеклокристаллических материалов и сравнение их со свойствами кристаллов и стекол.

## 2. Экспериментальная часть

Кристаллы форстерита, активированные  $\text{Cr}^{4+}$  ( $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), выращены из расплава методом Чохральского, содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет 0,24 вес. %. Алюмо-кальцевые стекла были синтезированы при температуре 1610°C в платиновых тиглях и отожжены при температуре 590°C. Хром введен в виде  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  с концентрацией 0,05 вес. %. В синтезированных стеклокерамиках с нанокристаллами форстерита ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) и дисиликата лития ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ) содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляло 0,85 вес. % и 0,8 вес. % соответственно. В случае ионов никеля вводился NiO, чья концентрация в стеклокерамике шпинеля 0,5 вес. %. Как известно [10], нанокристаллы размером порядка 10-20 нм образуются в стеклокерамике в результате термической обработки исходного стекла. Режим температурной обработки варьировался в пределах 650–850°C.

Спектры поглощения образцов измерены при комнатной температуре (300 К) с помощью УФ-ИК спектрофотометра (модель «Lambda-900» фирмы «Perkin-Elmer»). Спектры флюоресценции возбуждались излучением  $\lambda_{\text{pump}} = 910$  нм перестраиваемого непрерывного титан-сапфирового лазера (модель 3900 фирмы «Spectra Physics»), управляемого неодимовым лазером с удвоением частоты  $\lambda_{\text{pump}} = 532$  нм (модель «Millennia-Xs» фирмы «Spectra Physics»). Свет накачки модулирован с частотой 10 Гц, его мощность измеряна пироэлектрическим приемником (Kimmon Electric Co). Спектры флюоресценции записаны с использованием монохроматора (модель «Acton-300» фирмы «Acton Research Corporation») с Ge-приемником (фирмы «Oriel Instruments»). Сигналы от приемника усиливались и обрабатывались при помощи цифрового синхронного усилителя (модель SR850 фирмы «Stanford Research Systems»). Для измерений при температуре жидкого азота (77 К) использован криостат.

В ходе работы был разработан и успешно применен метод измерения абсолютного квантового выхода для ионов переходных металлов, в частности для хрома –  $q^{\text{abs}}(\text{Cr}^{4+})$ . Метод основан на сопоставлении относительных квантовых выходов ионов переходных металлов (например,  $\text{Cr}^{4+} - q^{\text{rel}}(\text{Cr}^{4+})$ ) и коммерческого стекла, активированного  $\text{Nd}^{3+} - q^{\text{rel}}(\text{Nd}^{3+})$ , при известном значении абсолютного квантового выхода для иона  $\text{Nd}^{3+} - q^{\text{abs}}(\text{Nd}^{3+})$ . Для получения результатов использована зависимость:

$$q^{\text{abs}}(\text{Cr}^{4+}) = (q^{\text{rel}}(\text{Cr}^{4+}) / q^{\text{rel}}(\text{Nd}^{3+})) \times q^{\text{abs}}(\text{Nd}^{3+}) \times \beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент ветвления люминесценции для перехода  ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$  иона  $\text{Nd}^{3+}$ . Относительные квантовые выходы определялись как отношение интеграла интенсивности люминесценции к поглощенному свету:

$$q^{\text{rel}}(\text{Cr}^{4+}) = I_F(\text{Cr}^{4+}) / a(\text{Cr}^{4+}) \quad (2)$$

$$q^{\text{rel}}(\text{Nd}^{3+}) = I_F(\text{Nd}^{3+}) / a(\text{Nd}^{3+}), \quad (3)$$

где  $I_F(\text{Cr}^{4+})$  – интеграл интенсивности полосы люминесценции  $\text{Cr}^{4+}$  в спектральном диапазоне 1000–1450 нм;  $I_F(\text{Nd}^{3+})$  – интеграл интенсивности полосы люминесценции  $\text{Nd}^{3+}$  в спектральном диапазоне 1000–1180 нм;  $a(\text{Cr}^{4+})$  – поглощенный в образце с ионами  $\text{Cr}^{4+}$  свет, при накачке лазером ( $\lambda_{\text{pump}}=910$  нм),  $a(\text{Nd}^{3+})$  – доля поглощенного света при накачке лазером ( $\lambda_{\text{pump}}=910$  нм) в образец, активированный  $\text{Nd}^{3+}$ .

Для определения абсолютного квантового выхода необходимо проводить измерения интегралов интенсивностей полос люминесценции для образцов, активированных  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Nd}^{3+}$ , в строго идентичных условиях. В нашей работе использовано коммерческое лазерное стекло ГЛС-2 (производитель ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»), спектральные показатели которого хорошо известны [14]. Этот метод является вполне уни-

версальным и подходит для всех ионов переходных металлов, поэтому аналогичные расчеты были проведены и для иона  $Ni^{2+}$ .

### 3. Результаты и обсуждение

Кристалл форстерита является двуосным кристаллом, который имеет сильно поляризованные спектры поглощения и люминесценции. Отчетливо видно изменение спектра поглощения кристалла в зависимости от направлений наблюдения, соответствующих его кристаллографическим осям: EIIa, EIIb и EIIc (рис. 1). Наиболее интересной является полоса поглощения в районе 850-1100 нм, соответствующая переходу  ${}^3A_2 \rightarrow {}^3T_2$ , для иона  $Cr^{4+}$ . Именно в нее и производилась накачка при измерении спектров люминесценции. В кристалле форстерита люминесценция иона  $Cr^{4+}$  наблюдается в интервале 1000–1500 нм. Спектры люминесценции измерены по трем направлениям, причем как при комнатной температуре – 300 К (рис. 2), так и при температуре жидкого азота – 77 К (рис.3). Формы спектров совпадает с данными литературных источников [3]. Наиболее интенсивной люминесценцией характеризуется направление EIIb.

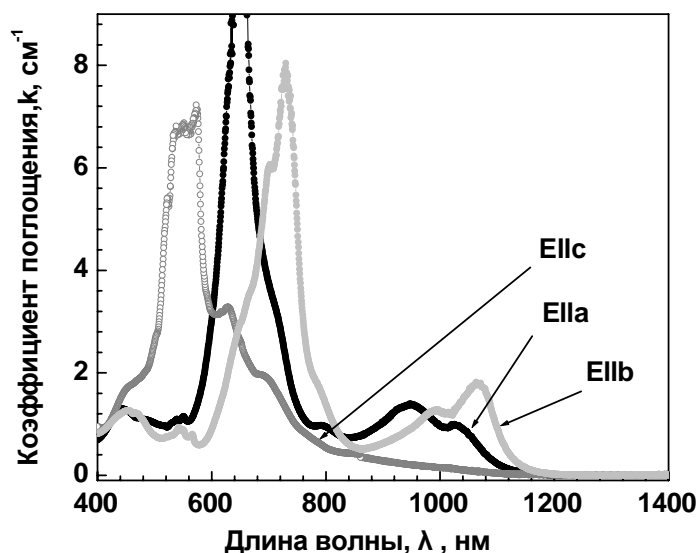


Рис. 1. Спектры поглощения кристалла форстерита

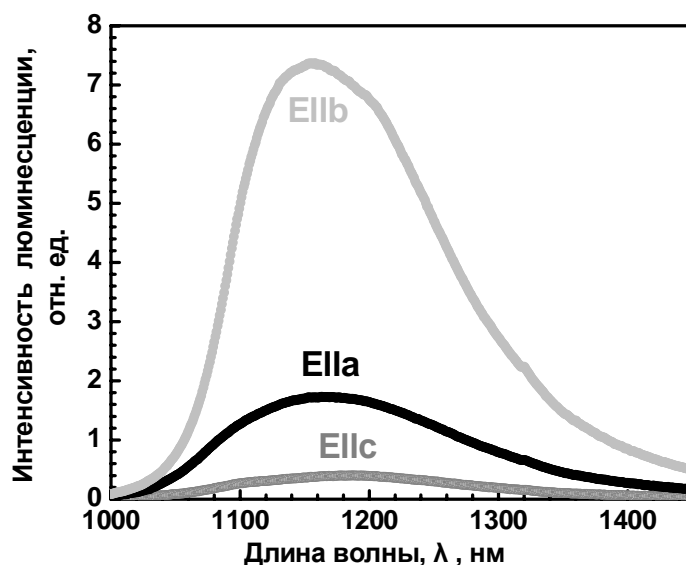


Рис. 2. Спектры люминесценции кристалла форстерита при T=300K

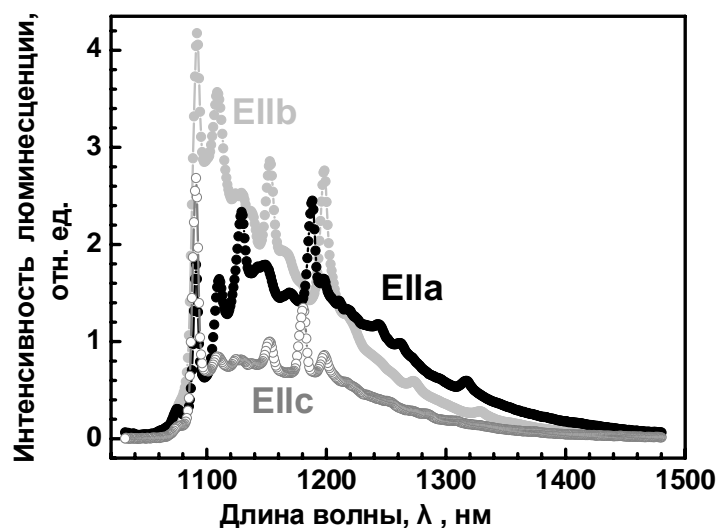


Рис. 3. Спектры люминесценции кристалла форстерита при T=77K

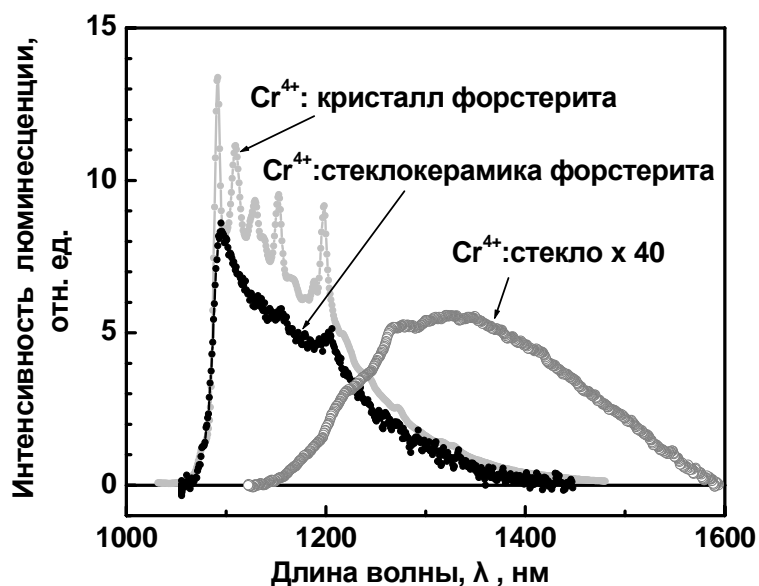


Рис. 4. Спектры люминесценции кристалла форстерита, стекла и стеклокерамики форстерита при T=77K

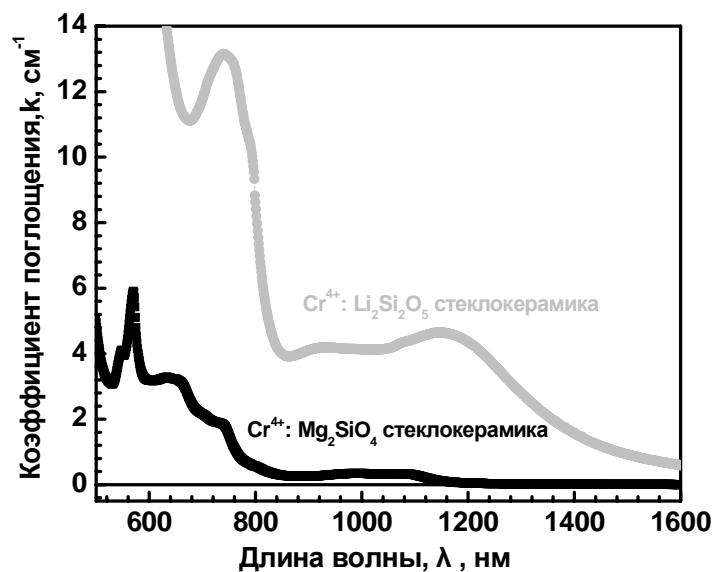


Рис. 5. Спектры поглощения стеклокерамик форстерита и дисиликата лития



На рис. 4 представлены спектры люминесценции иона  $\text{Cr}^{4+}$  для стекла, стеклокерамики форстерита и кристалла форстерита. Для кристалла приведен спектр усредненный по 3-м направлениям наблюдения. Как видно спектр стеклокерамики не похож на спектр стекла ни по своей форме, ни по величине: он не только менее интенсивен, но и смещен в длинноволновую область. В то же время отчетливо наблюдается схожесть спектров стеклокристаллического форстерита и кристалла форстерита (особенно на крыльях спектра). Эти два наблюдения позволяют утверждать, что ионы  $\text{Cr}^{4+}$  расположены внутри микрокристаллов. Но нельзя не отметить и различия деталей спектров – почти исчезла микроструктура на максимуме. Это объясняется тем, что существуют дефекты нанокристаллов, которые образуются во время их роста внутри стеклофазы.

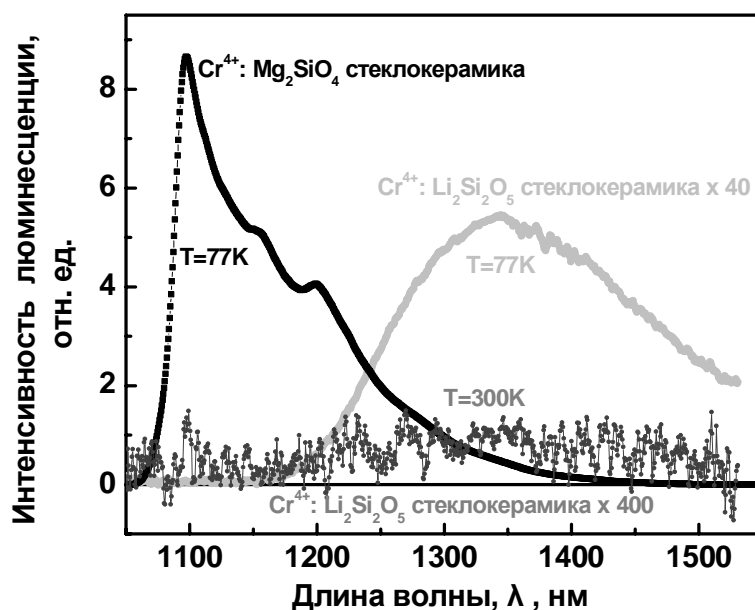


Рис. 6. Спектры люминесценции стеклокерамики форстерита при  $T=77\text{K}$ , стеклокерамики дисиликата лития при  $T=77\text{K}$  и при  $T=300\text{K}$

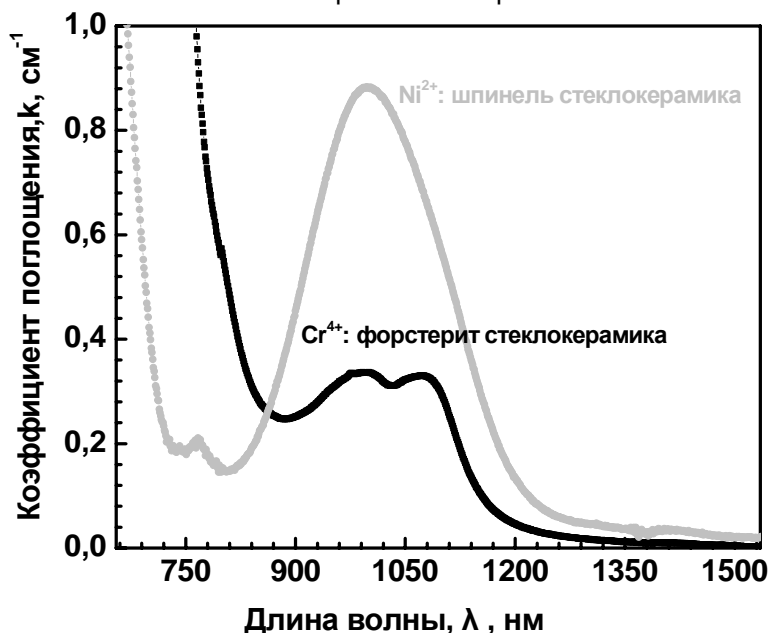


Рис. 7. Сравнение спектров поглощения стеклокерамик форстерита с  $\text{Cr}^{4+}$  и шпинели с  $\text{Ni}^{2+}$

На следующем этапе работы были рассмотрены стеклокристаллические материалы на основе нанокристаллов дисиликата лития ( $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ). Как хорошо видно на рис. 5, интенсивность полосы поглощения  $\text{Cr}^{4+}$  в стеклокристаллическом форстерите меньше,

чем у данного образца, хотя количество  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в них практически одинаково. Люминесценция  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  при комнатной температуре совсем отсутствует – явный признак попадания  $\text{Cr}^{4+}$  в стеклофазу. При температуре жидкого азота люминесценция наблюдается, но ее интенсивность не идет ни в какое сравнение со стеклокристаллическим форстеритом (рис. 6). Поэтому представляется логичным, что ионы  $\text{Cr}^{4+}$  в  $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  находятся вне кристаллической фазы.

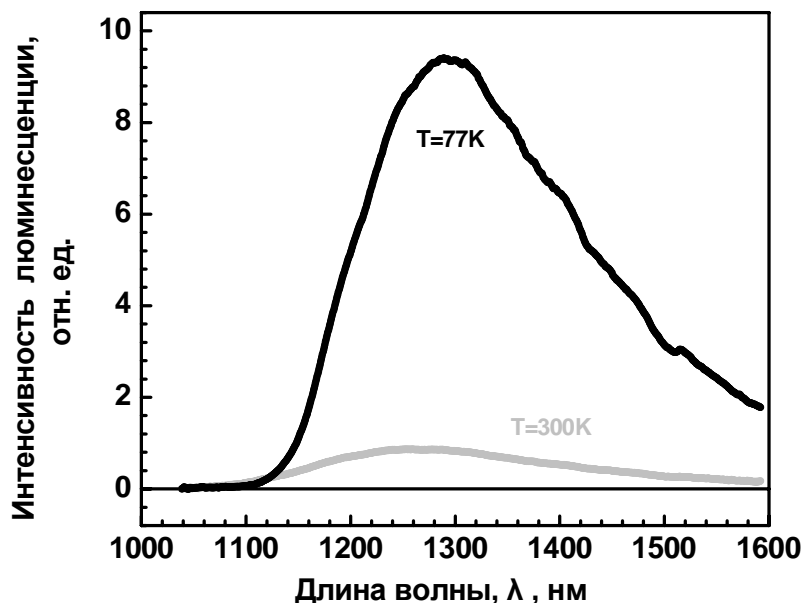


Рис. 8. Спектры люминесценции стеклокерамики шпинели активированной  $\text{Ni}^{2+}$  при  $T=77\text{K}$  и при  $T=300\text{K}$

Интересные результаты получены и для стеклокерамики шпинели, активированной ионами никеля. Как отчетливо видно на рис. 7, величина поглощения в интересующей нас области для ионов никеля превосходит поглощение хрома. Для расчета квантового выхода также проведены измерения спектров люминесценции (рис. 8) стеклокерамики шпинели активированной  $\text{Ni}^{2+}$ .

| Материал                                     | Абсолютный квантовый выход, %, 300 К |          |          |         |
|--|--------------------------------------|----------|----------|---------|
|  | $E // a$                             | $E // b$ | $E // c$ | Среднее |
| монокристалл форстерита: $\text{Cr}^{4+}$    | 4.1                                  | 10.9     | 0.6      | 5.2     |
| стеклокерамика – форстерит: $\text{Cr}^{4+}$ | 3.7                                  |          |          |         |

Таблица 1. Абсолютный квантовый выход кристалла форстерита и стеклокерамики форстерита

| Материал   | 300 К | 77 К |
|--|-------|------|
| монокристалл форстерита $\text{Cr}^{4+}$                       | 5.2   | 47   |
| стеклокерамика – форстерит $\text{Cr}^{4+}$                    | 3.7   | 23   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{CaO}$ стекло $\text{Cr}^{4+}$ | 0.04  | 0.3  |
| стеклокерамика – шпинель $\text{Ni}^{2+}$                      | 5.3   | 49   |

Таблица 2. Сравнение абсолютных квантовых выходов (%) оптических материалов, легированных ионами переходных металлов

Результаты сравнения абсолютных квантовых выходов представлены в таблицах (табл. 1, табл. 2). Значения квантового выхода для стеклокристаллического форстерита с  $\text{Cr}^{4+}$  сопоставимы со средним для кристалла и даже превосходят значение абсолютно-

го квантового выхода для оси E11c. Значения для стеклокерамик, активированных  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ , довольно близки и вполне удовлетворительны. Но эти значения все же меньше, чем для направления E11b в кристалле форстерита. Для увеличения абсолютного квантового выхода стеклокерамики нужно пытаться ориентировать нанокристаллы внутри стеклофазы. При сравнении же кристалла, стекла и стеклокерамики отчетливо видно, что стеклокерамика намного ближе по своим свойствам к кристаллу, чем к стеклу.

#### 4. Заключение

Были исследованы спектральные и люминесцентные свойства стекол, кристаллов и стеклокристаллических материалов, легированных ионами  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ , как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота. Показано, что для стеклокерамики форстерита ионы  $\text{Cr}^{4+}$  и для стеклокерамики шпинели ионы  $\text{Ni}^{2+}$  расположены внутри кристаллической фазы, а для стеклокерамики дисиликата лития – вне ее. Впервые произведены измерения абсолютного квантового выхода для ионов переходных металлов. Значения квантового выхода для стеклокерамик вполне сопоставимы со значениями для кристалла форстерита. Представляется перспективным увеличение абсолютного квантового выхода стеклокристаллических материалов путем ориентации микрокристаллов внутри стеклофазы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования стеклокристаллических материалов на основе форстерита, легированных ионами  $\text{Cr}^{4+}$ , и стеклокристаллических материалов на основе шпинели, легированных ионами  $\text{Ni}^{2+}$ , при создании волноводных лазеров и широкополосных оптических усилителей.

#### Литература

1. Beall G.N. Glass-ceramics for photonic applications// *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.*, 2000, V.73 C1, P.3-11.
2. Felice V., Dussardier B. et al.  $\text{Cr}^{4+}$ -doped silica optical fibers: absorption and fluorescence properties// *Eur. Phys. J. AP*, 2000, V.11, P.107-110.
3. Petricevic V., Gayen S.K., Alfano R.R. Laser action in chromium-activated forsterite for near-infrared excitation: Is  $\text{Cr}^{4+}$  the lasing ion?// *Appl. Phys. Lett.*, 1988, V.53, N26, P.2590-2592.
4. Verdun H.R., Thomas L.M. et al. Chromium-doped forsterite laser pumped with 1.06  $\mu\text{m}$  radiation// *Appl. Phys. Lett.*, 1988, V.53, N26, P.2593-2595.
5. Carrig T.J., Pollock C.R. Performance of a continuous-wave forsterite laser with krypton ion, Ti: sapphire, and Nd: YAG pump lasers// *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, V.29, N11, P.2835-2844.
6. Moncorge R., Manaa H., Boulon G.,  $\text{Cr}^{4+}$  and  $\text{Mn}^{5+}$  active centers for new solid state laser materials// *Optical Materials*, 1994, V.4, P.139-151.
7. Anino C., They J., Vivien D. New  $\text{Cr}^{4+}$  activated compounds in tetrahedral sites for tunable laser applications// *Optical Materials*, 1997, V.8, P.121-128.
8. Kulashov N. Shcherbitsky V. et al Spectroscopy and excited-state absorption of  $\text{Ni}^{2+}$ -doped  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ // *J. Lumin.*, 1997, N71, P.265-268.
9. Beall G.H., Pinckney L.R. Nanophase glass-ceramics// *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, V.82, N1, P.5-16.
10. Pinckney L.R., Beall G.H. Transition element-doped crystals in glass// *Proc. SPIE 2001*, V.4452, P.93-99.
11. Dejneka M. Rare earth fluorescence in novel oxyfluoride glasses and glass-ceramics// *Proc. SPIE*, 1998, V.3280, P.132-136.
12. Samson B., Tick P. and Borrelli N. Efficient neodymium-doped glass-ceramics fiber laser and amplifier// *Opt. Lett.*, 2001, N26, P.145-147.
13. Samson B.N., Pinckney L.R. et al Nickel-doped nanocrystalline glass-ceramic fiber// *Opt. Letters*, 2002, V.27, N15, P.1309-1311.
14. Arbuzov V.I., Brachkovskaya N. B. et al. Absolute luminescence quantum yield of glasses doped with neodymium// *Soviet J. Quantum Electron.*, 1976, V.6, N9, P.1091-1095.

# ПЕРВИЧНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ КАК СРЕДСТВО ОПТИМИЗАЦИИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

В.А. Лукина, А.С. Бахвалов

Научный руководитель – к.г.-м.н., с.н.с. Л.П. Коробейникова

Выявлены основные примесные элементы алюминиевых сплавов и рассмотрены особенности их анализа рентгенофлуоресцентным методом. Предложены оптимальные условия возбуждения и фильтрации первичного излучения для анализа различных групп элементов с целью снижения их пределов обнаружения.

## Введение

Современная рентгенофлуоресцентная аппаратура обладает значительными аналитическими возможностями, что обеспечивает ее широкое распространение в различных областях промышленности: сырьевой, металлургической, в рециклинге вторичного сырья и т.д. В связи с постоянным ростом требований к точности анализа в различных исследовательских и промышленных областях актуальной задачей является повышение аналитических характеристик рентгенофлуоресцентной аппаратуры. Одним из решений этой задачи является оптимизация условий возбуждения и регистрации излучения от анализируемого образца. Одной из основных характеристик рентгенофлуоресцентного анализа является предел обнаружения, который, в свою очередь, зависит от многих параметров аппаратуры, а также от условий возбуждения и регистрации. Поэтому задача оптимизации анализа, как правило, сводится к снижению пределов обнаружения анализируемых элементов. В данной работе рассмотрены способы оптимизации рентгенофлуоресцентного анализа примесных элементов в алюминиевых сплавах.

## Объект исследования

Алюминиевые сплавы, в силу уникальных физических и химических свойств, становятся все более важными материалами для изготовления, обслуживания и модернизации продукции, которую требует современное общество. Большое влияние на эксплуатационно-технологические свойства сплавов оказывают уровень и соотношение постоянно присутствующих примесей (в первую очередь, железа и кремния). При уменьшении содержания примесей существенно повышаются характеристики пластичности и вязкости разрушения. Поэтому для приборов и техники ответственного назначения применяются сплавы с жестким ограничением по примесям, которые в марке имеют обозначение «ч» – чистые; «пч» – повышенной чистоты; «оч» – особой чистоты.

С учетом этих требований важнейшей задачей при производстве алюминиевых сплавов является определение концентрации входящих в них легирующих и примесных элементов. Однако точное определение элементного состава сплавов является сложной аналитической задачей по ряду причин. Во-первых, необходимо определять широкий диапазон содержаний, поскольку концентрация некоторых элементов в зависимости от марки сплава меняется от тысячных долей до десятков процента. Во-вторых, сплавы являются многоэлементными системами, поэтому приходится определять концентрацию нескольких элементов, учитывая степень их взаимного влияния [1].

Основными источниками примесей в алюминиевых сплавах являются шихтовые материалы, используемые для получения алюминия. В зависимости от способа получения алюминий может содержать следующие примесные элементы: железо, кремний, кальций, магний, фосфор, сера, ванадий, титан, хром, марганец, цинк, олово, сурьма, свинец, мышьяк и, в очень незначительных количествах, некоторые другие [2]. Выделим из них наиболее информативные для анализа алюминиевых сплавов: Fe, Si, Mg, Cu, Ni, Mn, Zn, Sn, Pb, As.

## Метод исследований

Определение концентраций примесей в алюминиевых сплавах рентгенофлуоресцентным методом основано на зависимости интенсивности флуоресцентного излучения элемента от его содержания в исследуемом образце. При этом необходимо отметить, что величина флуоресценции связана не только с концентрациями элементов, но и с условиями возбуждения флуоресценции: спектральным составом первичного излучения и геометрическими факторами. Для обеспечения большей эффективности анализа необходимо создать оптимальные условия возбуждения, обеспечивающие максимальное значение флуоресценции при минимальном значении фона [3]. В случае алюминиевых сплавов, когда требуется определять концентрации и легких, и тяжелых элементов, обычно используется трубка с родиевым анодом, но с различными значениями тока и напряжения для разных элементов. В табл. 1 показаны типичные значения тока и напряжения для анализа примесных элементов в алюминиевых сплавах на стационарном кристалл-дифракционном спектрометре, оснащенный мощной рентгеновской трубкой с родиевым анодом.

| Диапазон энергий, кэВ | Элементы                                | Напряжение трубки, кВ | Ток трубки, мА |
|-----------------------|---|-----------------------|----------------|
| 30-10                 | Sb, Sn, Mo, Zr, As, Pb(L <sub>a</sub> ) | 60                    | 40             |
| 10-2                  | Zn, Cu, Ni, Fe, Mn, Cr, Ti, Ca, S       | 40                    | 60             |
| 2-0.5                 | P, Si, Al, Mg, Na                       | 25                    | 100            |

Таблица 1. Оптимальные условия возбуждения для различных групп элементов

## Расчет оптимальной фильтрации

Одним из способов оптимизации рентгенофлуоресцентного анализа является фильтрация первичного и вторичного излучения. Оптимальный материал и толщина фильтра подбираются в зависимости от исследуемого элемента, назначения фильтра, материала анода и напряжения рентгеновской трубки. Для расчета условий оптимальной фильтрации была создана расчетная программа «FCOUNT».

Программа предназначена для расчета поглощения характеристического излучения анода и тормозного излучения в веществе (фильтре-мишени) и самопоглощения вторичного излучения материала фильтра.

Расчет поглощения производится в зависимости от толщины фильтра (минимальная толщина 1 мкм) по формуле:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu \cdot \rho \cdot d),$$

где  $I/I_0$  – отношение интенсивности ослабленного излучения к первичному,  $\mu$  – массовый коэффициент ослабления анодного излучения веществом фильтра,  $\rho$  – плотность вещества фильтра,  $d$  – толщина фильтра.

Формула, используемая для вычисления ослабления относительной интенсивности вторичного излучения вещества фильтра-мишени (в условиях монохроматического приближения), имеет вид:

$$\frac{I_3}{I_0} = \sum_i \left[ \left( \frac{\exp(-\mu_1 \cdot \rho \cdot d_i)}{(\mu_1 + \mu_3)} + \frac{\exp(-\mu_2 \cdot \rho \cdot d_i)}{(\mu_2 + \mu_3)} \right) \cdot \exp(-\mu_3 \cdot \rho \cdot d_i) \right],$$

где индексы 1, 2 и 3 соответствуют анодной линии, тормозному излучению и линии мишени.

В программе предусмотрено изменение следующих параметров: материала анода, вещества мишени, толщины мишени, напряжения на рентгеновской трубке. При этом

мишень разбивается на несколько слоев для большего соответствия результатов расчетных формул реальному эксперименту.

В данной работе был проведен расчет оптимальной фильтрации высокоэнергетичного участка спектра и характеристического излучения материала анода с целью понизить предел обнаружения тяжелых примесей в алюминиевых сплавах: олова и сурьмы. Условия возбуждения: рентгеновская трубка с родиевым анодом, напряжение – 40 кВ. Для этого случая был выбран молибденовый фильтр, край поглощения которого близок к энергии характеристической линии анода.

Результаты расчета молибденового фильтра по программе «FCOUNT» представлены в табл. 2. При анализе полученных результатов был выбран фильтр толщиной 50 мкм, поскольку он значительно снижает интенсивность линии анода, при этом не сильно снижает общую интенсивность первичного излучения.

| № слоя | Суммарная толщина, мкм | Отношение интенсивности ослабленного излучения к первичному |                       |                   |
|--------|------------------------|---|-----------------------|-------------------|
|        |                        | Тормозное излучение   | Анодная линия         | Линия мишени      |
| 1      | 0                      | 1   | 1                     | 0,03              |
| 2      | 10                     | 0,18  | $2,19 \cdot 10^{-5}$  | 0,03              |
| 3      | 20                     | 0,03  | $4,78 \cdot 10^{-10}$ | 0,02              |
| 4      | 30                     | 0,01  | $1,04 \cdot 10^{-14}$ | 0,02              |
| 5      | 40                     | $1 \cdot 10^{-3}$   | $2,28 \cdot 10^{-19}$ | 0,02              |
| 6      | 50                     | $2 \cdot 10^{-4}$   | $4,99 \cdot 10^{-24}$ | 0,01              |
| 7      | 60                     | $3,8 \cdot 10^{-5}$   | $1,09 \cdot 10^{-28}$ | 0,01              |
| 8      | 70                     | $6,96 \cdot 10^{-6}$  | $2,38 \cdot 10^{-33}$ | 0,01              |
| 9      | 80                     | $1,28 \cdot 10^{-6}$  | $5,21 \cdot 10^{-38}$ | $7 \cdot 10^{-3}$ |
| 10     | 90                     | $2,34 \cdot 10^{-7}$  | $1,14 \cdot 10^{-42}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| 11     | 100                    | $4,29 \cdot 10^{-8}$  | $2,49 \cdot 10^{-47}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |

Таблица 2. Результаты расчета молибденового фильтра

После выбора оптимальной толщины фильтра были проведены экспериментальные исследования на фоновых образцах, с целью наглядно представить эффективность подобной фильтрации. Спектры, полученные с фильтрацией и без нее, представлены на рис. 1.

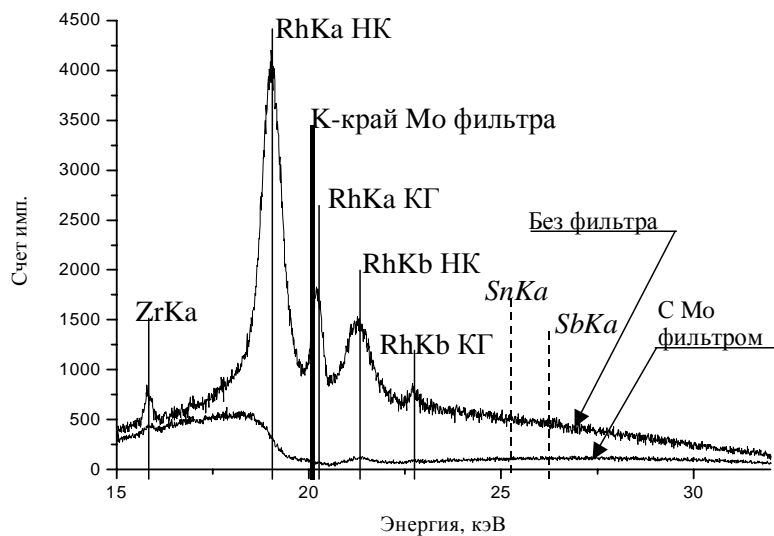


Рис. 1. Спектры фоновых образцов до и после фильтрации

На спектре без фильтрации отчетливо видны интенсивные линии когерентно и некогерентно рассеянного излучения анода, а также линия ZrK $\alpha$  характеристического излучения коллиматора. Утолщенной линией показано расположение K-края поглощения молибдена, а пунктирными линиями – расположение линий характеристического излучения олова и сурьмы. Очевидно, что происходит значительное снижение фона на этом участке спектра, что приводит к уменьшению пределов обнаружения этих элементов.

## **Заключение**

В работе рассмотрена задача оптимизации рентгенофлуоресцентного анализа алюминиевых сплавов. Предложены оптимальные условия возбуждения для различных групп элементов. Рассмотрена возможность применения первичной фильтрации для анализа алюминиевых сплавов. Произведен расчет оптимальной фильтрации на примере молибденового фильтра, применяемого для снижения интенсивности характеристического излучения родиевого анода с целью снизить пределы обнаружения тяжелых элементов. Представленные результаты расчетов и экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о целесообразности применения первичной фильтрации, как средства оптимизации рентгенофлуоресцентного анализа примесных элементов в алюминиевых сплавах

## **Литература**

1. Коробейникова Л.П., Лукина В.А. Исследование алюминиевых сплавов рентгеноспектральным флуоресцентным методом // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 15. Теория и практика современных технологий / Главный редактор д.т.н., проф. В.Н. Васильев. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 283-285.
2. Гинсберг Г., Веферс К., Алюминий / Пер. с нем. Б.А. Фомина, Ю.А. Лайнера . Под. ред. В.А. Пазулина. М.: Металлургия, 1968.
3. Грязнов А.Ю. Разработка аппаратурных и методических способов повышения аналитических характеристик энергодисперсионного флуоресцентного анализатора: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.27.02 / Б.И. СПб, 2004.

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ПОРИСТОГО СТЕКЛА МИКРО- И НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Д.В. Петров

Научный руководитель – д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев

В работе приведены результаты исследования особенностей процесса спекания пористого стекла при нагреве лазерными микро- и наносекундными импульсами. Рассмотрены результаты обработки пластин пористого стекла излучением YAG:Nd-лазера и N<sub>2</sub>-лазера. Экспериментальные результаты сравнены с ранее полученными результатами по спеканию пористого стекла излучением CO<sub>2</sub>-лазера и в печи.

## Введение

Одной из перспективных для оптики и лазерной технологии сред является пористое стекло (ПС), представляющее собой связнодисперсную канальную наноструктурную систему [1]. Преимуществом высоко-кремнеземных ПС по сравнению с другими материалами, применяемыми в качестве твердотельных матриц, является их высокая термическая и химическая устойчивость, в сочетании с регулируемыми структурными характеристиками. В оптических технологиях ПС применяются в качестве основы композиционных материалов, получаемых путем импрегнирования их различными веществами и последующего спекания [2], а также для изготовления микрооптических элементов методом спекания ПС под действием лазерного излучения [3].

В связи с применением ПС для технологий лазерного изготовления оптических элементов необходима информация о терморологических свойствах (линейная усадка, вязкость) ПС в зависимости от их структуры и состава при различной предварительной тепловой обработке. В работе [4] показана применимость дилатометрических методов для получения этой информации.

Традиционно для обработки ПС использовали CO<sub>2</sub>-лазер, длина волны излучения которого ( $\lambda=10.6$  мкм) лежит в области фундаментального поглощения силикатного стекла, однако такая длина волны позволяет сформировать оптический элемент размером ~100 мкм. Одним из основных требований современной интегральной оптики является уменьшение размера элементов оптических интегральных схем (ОИС). Наиболее простым решением этой проблемы является уменьшение длины волны используемого лазера. Применение N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda=337$  нм) позволит проводить обработку поверхности ПС в областях с характерными размерами ~4 мкм. Однако использование азотного лазера влечет за собой изменение режимов обработки стекла. Процессы вязкого течения размягченного ПС при лазерном нагреве протекают со скоростью, большей скорости спекания при стационарном нагреве (в печи). Поэтому для описания изменения вязкости каркаса ПС при лазерном нагреве, в первую очередь, необходимо учитывать высокую скорость нагрева и, следовательно, термодинамически неравновесное состояние стекла при таком нагревании. Таким образом, возникает вопрос об исследовании процесса спекания ПС под действием коротких импульсов. Для этого могут быть использованы YAG:Nd-лазер (длительность лазерного импульса  $\tau\sim 10^{-6}$  с) и N<sub>2</sub>-лазер ( $\tau\sim 10^{-8}$  с).

Излучение на длинах волн YAG:Nd-лазера ( $\lambda=1.064$  мкм) и N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda=337$  нм) слабо поглощается в ПС. Поэтому для увеличения эффективности воздействия требуется модификация ПС. Для увеличения поглощения излучения YAG:Nd-лазера (N<sub>2</sub>-лазера) следует применить методы, которые не внесут принципиальных изменений в процесс спекания, например нанесение на поверхность ПС поглощающих пленок.

## Объекты исследований

В настоящей работе в качестве объектов исследований выбраны ПС на основе системы Na<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, составы и параметры которых представлены в табл. 1.



| Обозначение стекла | Состав пористого стекла (по анализу, масс. %) |                  |                               |                  |      |                                |                               |      | Средний радиус пор $r$ , нм |
|--------------------|---|------------------|-------------------------------|------------------|------|--------------------------------|-------------------------------|------|-----------------------------|
|                    | Na <sub>2</sub> O                             | K <sub>2</sub> O | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | PbO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | F    |                             |
| 8Б                 | 0.25  | -                | 4.25                          | 95.53            | -    | ≤ 0.1                          | -                             | -    | 1.7                         |
| НФФ40              | 0.41  | -                | 6.11                          | 93.35            | -    | -                              | 0.08                          | 0.05 | 5.4                         |
| НФФ140             | 0.30  | -                | 5.51                          | 94.15            | -    | -                              | 0.04                          | -    | 6.7                         |
| НК                 | 0.10  | 0.15             | 6.93                          | 92.82            | -    | -                              | -                             | -    | 7.0                         |
| НКС                | 0.37  | 0.30             | 3.87                          | 95.14            | 0.07 | 0.25                           | -                             | -    | 2.9                         |

Таблица 1. Составы и размер пор пористых стекол\*

### Исследования ПС dilatометрическими методами

В качестве метода исследования терморологических свойств ПС был выбран dilatометрический метод [8]. При нагревании в печи были измерены изменения линейного размера образца  $\Delta L$  (прогиб) ПС при нагревании (охлаждении) для стекол с различной предварительной тепловой обработкой (рис. 1а) и различного состава (рис. 2а), а также вязкости кварцсодержащих стекол, спеченных при 900–950°C (рис. 2б). При предварительной тепловой обработке стекла были выдержаны в течение 1 часа в муфельной печи при заданной температуре.

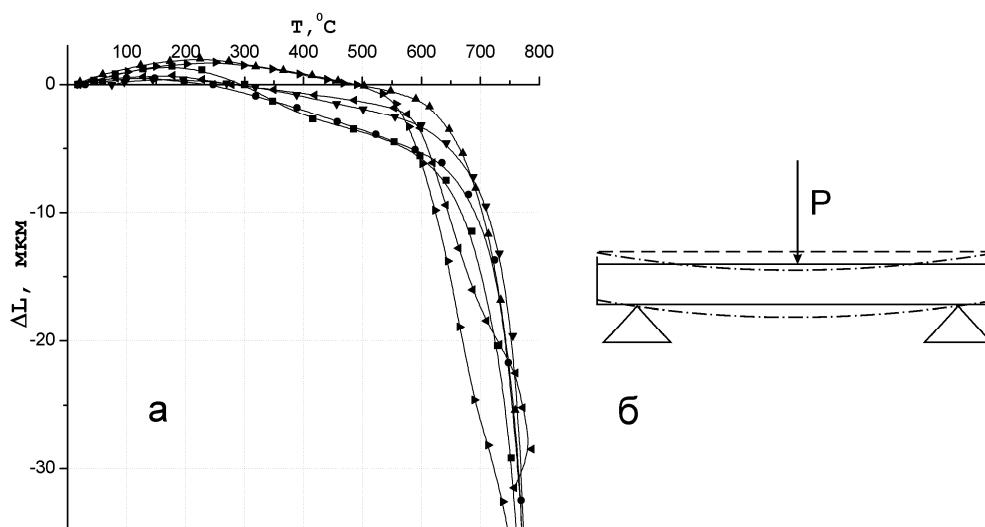


Рис. 1. а: Зависимости изменения прогиба  $\Delta L$  (мкм) пластин ПС марки 8Б от температуры при скорости нагрева 7 (°C/мин) для различных случаев предварительной тепловой обработки образцов. ■ – 120°C; ● – 385°C; ▲ – 596°C; ▼ – 648°C; ► – 720°C; ◄ – 750°C. Толщина образцов  $L = 3$  мм. б: Характер изменения формы образца при изменении температуры нагревания и постоянной нагрузке  $P$  (г). — — — — Тепловое расширение до  $T \sim 300^\circ\text{C}$ ; - · - · - Прогиб при  $T > 300^\circ\text{C}$

На зависимостях (рис. 1а) можно выделить три основных диапазона: (20–250)°C, (300–550)°C, и (600–800)°C. Известно, что при температурах (20–800)°C в стекле происходят изменения, связанные со структурными превращениями, которые имеют место

\*ПС были получены из двухфазных щелочноборосиликатных промышленных стекол, модифицированных составов на основе промышленного стекла марки ДВ-1. Составы этих стекол были разработаны в ИХС РАН и синтезированы в ГОИ им. Вавилова [5, 6, 7].

в результате дегидратации, дегидроксилирования поверхности, переконденсации пор, а так же с процессами теплового расширения и вязкого течения. Рис. 1б показывает, как изменяется форма образца при изменении температуры нагревания. Кривые, характеризующие прогиб ПС в зависимости температуры, коррелируют с температурными кривыми теплового расширения двухфазных стекол [4]. Изменение размера образца ПС в диапазоне температур (20–250)°С определяется главным образом тепловым расширением. Прогиб образца в температурном интервале (300–550)°С обусловлен процессом переконденсации пор, который является результатом дегидроксилирования связанных силанольных групп на поверхности глобул вторичного кремнезема [9, 10] и начальной стадии процесса спекания. При температуре свыше 600°С прогиб определяется процессами вязкого течения, и скорость линейной усадки тем больше, чем меньше вязкость пористого каркаса [4, 11]. В температурном диапазоне (300–600)°С (рис. 2а) прогиб ПС тем больше, чем больше молярное отношение  $B_2O_3:SiO_2$  и чем меньше размер пор (при постоянном отношении  $B_2O_3:SiO_2$  в двухфазном стекле). В ПС, полученных из двухфазных стекол с разным молярным отношением  $B_2O_3:SiO_2$ , разная концентрация и плотность упаковки вторичного кремнезема [12].

На рис. 2б представлена зависимость вязкости кварцоидов  $Lg(\eta, P)$  Пуаз от температуры  $T$  (°С) в интервале (650–850)°С. Стекла 8Б и НКС имеют самое низкое отношение  $B_2O_3:SiO_2$ , а также меньшие размеры пор в сравнении с остальными. Стекло НКС содержит в своем составе  $Al_2O_3$ , что приводит к значительному увеличению величины вязкости.

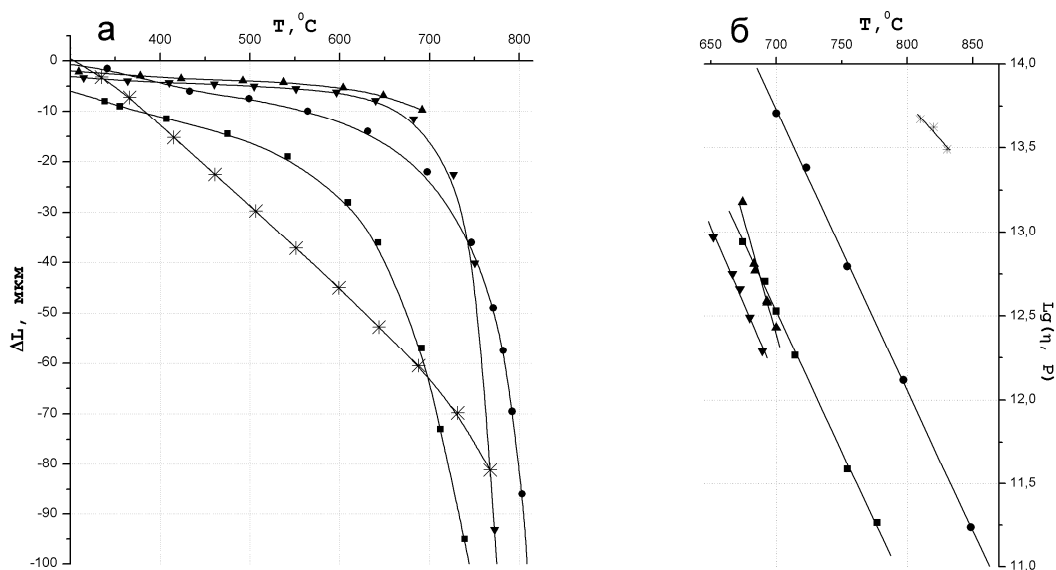


Рис. 2. а: Зависимости изменения величины прогиба  $\Delta L$  (мкм) пластин ПС от температуры  $T$  (°С), б: Зависимости вязкости кварцоидов  $Lg(\eta, P)$  (Пуаз) от температуры  $T$  (°С) для различных составов пористого стекла. ● – 8Б; ■ – НК; \* – НКС; ▲ – НФФ140; ▼ – НФФ40. Толщина образцов  $L=3$  мм

Таким образом, из рис. 1а, 2а и 2б следует сказать, что и состав и предварительная тепловая обработка в значительной мере влияют как на структурные параметры ПС, так и на изученные свойства кварцоидов, полученных спеканием ПС, и полученные результаты дают возможность оптимизировать технологию получения конструкционных материалов на основе пористых стекол.

### Спекание ПС при импульсном нагревании

Исследования по обработке ПС лазерным излучением проведены на стеклах марки 8Б. В предыдущих работах было рассмотрено действие непрерывного излучения

СО<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda=10.6$  мкм) на пористое стекло [5], в настоящей же работе приведены результаты экспериментов по обработке ПС излучением YAG:Nd-лазера ( $\lambda=1.064$  мкм,  $\tau\sim 10^{-6}$  с) и N<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda=337$  нм,  $\tau\sim 10^{-8}$  с).

Результаты работы [13] показывают, что величина усадки модифицированной области на поверхности пластины ПС коррелирует с поперечным размером этой области. Так как измерение величины усадки – более трудоемкая задача вследствие малости значения ( $\sim 5$  мкм), чем измерение поперечного размера модифицированной области, то было принято решение анализировать процесс спекания по поперечному размеру модифицированной области. Обработка пластин ПС импульсным излучением YAG:Nd-лазера и N<sub>2</sub>-лазера проведена при изменении мощности излучения и скорости сканирования лазерного пучка.

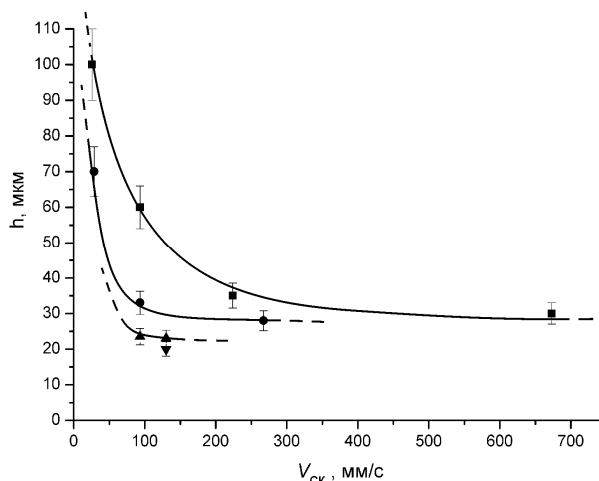


Рис. 3. Зависимости размера модифицированной области, полученной под действием излучения YAG:Nd-лазера, на поверхности ПС марки 8Б при изменении скорости сканирования  $V_{ск}$  (мм/с) и различных значениях мощности излучения  $P$  (Вт). ■ –  $P=5$  Вт; ● –  $P=3.75$  Вт; ▲ –  $P=2$  Вт; ▼ –  $P_{ср}=2$  Вт

Излучение YAG:Nd-лазера и N<sub>2</sub>-лазера слабо поглощается ПС, поэтому для улучшения поглощения образцы покрывали угольной пленкой толщиной  $\sim 50$  мкм. Мощность лазерного излучения (рис. 3), даже в центре пучка недостаточна для мгновенного удаления пленки целиком, поэтому пленка удаляется послойно, начиная с центра. Поэтому при увеличении мощности происходит расширение зоны термического воздействия на пленку и разогрев стекла в окружающей зону воздействия области, что обеспечивает увеличение размера модифицированной области. При увеличении скорости сканирования с некоторого значения (для каждого значения величины мощности лазерного излучения оно свое) размер модифицированной области незначительно уменьшается (рис. 3), это связано с тем, что распределение мощности в центральной части по сечению пучка примерно одинаковое. При дальнейшем увеличении скорости сканирования пленка не удаляется полностью и спекания ПС не происходит вовсе.

Из рис. 3 видно, что, используя импульсное излучение (длительность импульса  $\tau\sim 10^{-6}$  с) (см. четвертую зависимость на рис. 3) вместо непрерывного (см. первые три зависимости на рис. 3), при равных значениях скорости сканирования можно получить модифицированные области одинаковых размеров, что говорит о зависимости интенсивности спекания от вложенной энергии.

Модификация поверхности ПС напоминает режим лазерной очистки (рис. 4). Здесь конкурируют по крайней мере два процесса – уменьшение поглощения слоя угольной пленки при ее удалении и сам процесс модификации (спекания) ПС.

После проведения экспериментов по лазерной обработке пластин ПС сделано оценочное сравнение параметров процесса спекания ПС при различных видах обработки (в печи, CO<sub>2</sub>-, YAG:Nd-, N<sub>2</sub>-лазером). Результаты приведены в табл. 2.

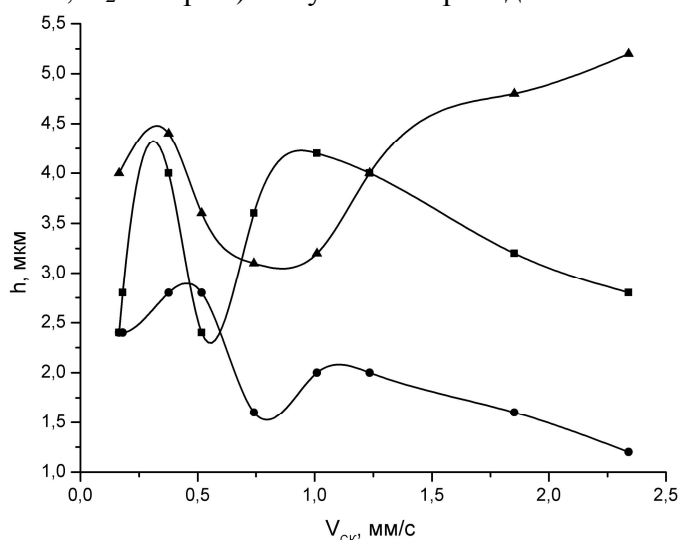


Рис. 4. Зависимости размера модифицированной области, полученной под действием излучения N<sub>2</sub>-лазера, на поверхности ПС марки 8Б при изменении скорости сканирования  $V_{ск}$  (мм/с) и различных значениях мощности излучения  $P_{cp}$  (Вт). ● –  $P_{cp}=0.074$  Вт; ■ –  $P_{cp}=0.135$  Вт; ▲ –  $P_{cp}=0.275$  Вт

| Вид обработки          | Длительность импульса (с)/ скорость нагрева (град/с) | Время начала спекания (с)/ количество импульсов | Размер области спекания диаметр (мкм)/ толщина (мкм) |
|------------------------|--|---|--|
| В печи                 | Непрерыв/ $\sim 10^{-1}$                             | $\sim 10^3$ /-                                  | Весь образец   |
| CO <sub>2</sub> -лазер | Непрерыв/ $\sim 10^2$                                | $\sim 0.1 \div 10$ /-                           | $\sim 500/\sim 200$                                  |
| YAG:Nd-лазер           | $\sim 10^{-6}/\sim 10^5$                             | $\sim 10^{-5}/10 \div 20$                       | $\sim 100/\sim 20$                                   |
| N <sub>2</sub> -лазер  | $\sim 10^{-8}/\sim 10^8$                             | $\sim 10^{-7}/\sim 50$                          | $\sim 50/\sim 5$                                     |

Таблица 2. Результаты оценочного сравнения параметров процесса спекания ПС при различных видах тепловой обработки

В табл. 2 видно, что градиенты температуры при переходе от одного режима тепловой обработки к другому существенно растут. В случае обработки ПС непрерывным излучением CO<sub>2</sub>-лазера при повышении мощности излучения наблюдается процесс кристаллизации бор- и кремнеземсодержащих соединений, стекло «вскипает» (растрескивается). Процесс кристаллизации и процесс спекания находятся в одном температурном интервале, однако при воздействии на ПС излучения N<sub>2</sub>-лазера ( $\tau \sim 10^{-8}$  с) при протекании процесса спекания ПС кристаллизация не наблюдается. Причины отсутствия кристаллизации пока не ясны и требуют дальнейшего изучения.

Таким образом, применение для обработки ПС лазерных источников с длительностями импульса  $\sim 10^{-8}$ – $10^{-7}$  позволит более точно реализовывать режимы локальной модификации свойств ПС в области размером порядка единиц микрон для создания элементов ОИС.

## Заключение

Показано, что изменение термореологических свойств ПС находится в зависимости от температуры тепловой обработки и состава. Заметные изменения термореологических свойств ПС наблюдались в температурных диапазонах (20–250)°С, (300–550)°С,

(600–800)°С. Эти изменения связаны со структурными превращениями, которые имеют место в результате дегидратации, дегидроксилирования поверхности и перекомденсации пор, а также с процессами теплового расширения и вязкого течения.

Состав исходного двухфазного стекла влияет как на структурные параметры ПС, так и на изученные свойства кварцоидов, полученных спеканием ПС до полного смыкания пор при высокотемпературной обработке.

Проведены эксперименты по обработке ПС излучением YAG:Nd-лазера и N<sub>2</sub>-лазера. В случае обработки ПС излучением CO<sub>2</sub>-лазера при повышении мощности излучения наблюдается процесс кристаллизации и стекло «вскипает» (растрескивается). При воздействии на ПС излучения N<sub>2</sub>-лазера ( $\tau \sim 10^{-8}$ ) при протекании процесса спекания ПС не наблюдается кристаллизации.

Полученные результаты дают возможность оптимизировать технологию получения конструкционных материалов на основе ПС и существенно расширить диапазон составов двухфазных стекол, пригодных для изготовления ПС, а также в будущем реализовать режимы получения элементов ОИС размером порядка единиц микрон.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ по поддержке ведущих научных школ (НШ-1370.2003.8), гранта РФФИ №04-03-32165а, и гранта РФФИ №04-02-11611а.

## Литература

- 1 Мазурин О. В., Роскова Г. П., Аверьянов В. И., Антропова Т. В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение. Л.: Наука, 1991. 276 с.
- 2 Мешковский И. К. Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц. СПб: Изд. СПб ГИТМО (ТУ), 1998. 332 с.
- 3 Вейко В.П., Костюк Г.К., Роскова Г.П., Цехомская Т.С., Чуйко В.А., Яковлев Е.Б. Лазерное формирование оптических элементов.//Л.: Знание, 1988. 19 с.
- 4 Антропова Т. В., Столяр С. В., Столярова В. Л., Шандыбина Г. Д., Цапко К. А. Исследование теплофизических характеристик  $Na_2-B_2O_3-SiO_2$  стекол // Оптич. журнал. 2002. Т. 69. № 3. С. 88-90.
- 5 Анфимова И. Н., Мазурин О. В., Роскова Г. П., Суханов В. И. Цехомская Т. С., Шелехов Н. С. Стекло для получения пористых высококремнеземных изделий. АС №-160464. 07.11.1990.
- 6 Роскова Г. П., Антропова Т. В. Цехомская Т.С., Анфимова И. Н. Воздействие растворов кислот на пластины из двухфазных натриевоборосиликатных стекол // Физ. и хим. стекла. 1984. Т. 10. №. 3. С. 354-364.
- 7 Роскова Г. П., Цехомская Т.С., Баханов В. А. Светопропускание микропористых высококремнеземных стекол в зависимости от условий их получения // Физ. и хим. стекла. 1989. Т. 15. №. 6. С. 874-880.
- 8 Ключев В. П., Черноусов М. А. // Тез. Докл. 3-го Всесоюзн. Совец. «Методы и приборы для точных dilatометрических исследований материалов в широком диапазоне температур». Л., 1984. С. 46.
- 9 Филистеев О. В. Влияние термовакuumной обработки на сорбционные свойства пористых стекол с различными размерами пор. Автореф. канд. дис. Челябинск. 2001. 24 с.
- 10 T. V. Antropova, I. A. Drozdova, S. V. Stolyar, T. N. Vasilevskaya, D. V. Petrov. Effect of thermal treatment on porous structure parameters and properties of porous glasses // Nanoparticles, Nanostructures & Nanocomposites, Topical meeting of European Ceramics Society: 2004. Book of abstracts. P. 79-80.
- 11 T. V. Antropova, I. A. Drozdova. Sintering of optical porous glasses // Optica applicata. V. 33. No. 1. 2003. P. 13-22.
- 12 T. Antropova, L. Ermakova, S. Medvedeva, M. Sidorova. Porous membranes on a basis of phase-separated alkali borosilicate glasses that contain PbO and F additives // Glastechn. Ber. Glass Sci. Technol. 2004. Bd. 77 S. 193-198.
- 13 Петров Д.В., Дюкарева А.С., Антропова Т.В., Вейко В.П., Костюк Г. К., Яковлев Е.Б. Спекание поверхности пластин пористого стекла под действием лазерного излучения// Физ. и хим. стекла. 2003. Т. 29. № 5. С. 633-639.

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПЛАСТИН МЕТОДОМ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

В.Н. Фролков, О.Л. Студеникин

Научный руководитель – д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин

Приводятся результаты исследования кварцевого оптического волокна методом газоразрядной визуализации. Получены изображения дефектов кварцевого оптического волокна. Сравниваются усредненные ГРВ-граммы для различных образцов волоконно-оптических изделий.

## Введение

Кварцевые оптические волокна имеют достаточно большое количество контролируемых параметров. Самые важные из них – диаметр волокна, состояние поверхности, толщина оболочки, механическая прочность, тепловые характеристики, спектральное пропускание, рассеяние света, неоднородность, двойное лучепреломление. Эти параметры влияют в первую очередь на разрешающую способность кварцевого оптического волокна, его светопропускание и, в конечном счете, на качество передаваемого кварцевым оптическим волокном изображения.

## Метод газоразрядной визуализации

В настоящее время под термином «эффект Кирлиан» понимается визуальное наблюдение или регистрация на фотоматериале свечения газового разряда, возникающего вблизи поверхности исследуемого объекта при помещении последнего в электрическое поле высокой напряженности. Суть этого способа сводится к следующему. При внесении какого-либо объекта в электрическое поле в разрядном промежутке, образованном одним из электродов и поверхности объекта исследования, возникает разряд, несущий информацию об объекте. Этот разряд наблюдают через прозрачный электрод или фиксируют на фоточувствительном материале, помещенном в разрядный промежуток [1]. Наличие разрядного промежутка предложенной системы является обязательным. Если исследуется токопроводящий объект, то один из электродов покрывается тонким слоем диэлектрика. Было выделено два варианта газоразрядного фотографирования – контактный и вакуумный [2].

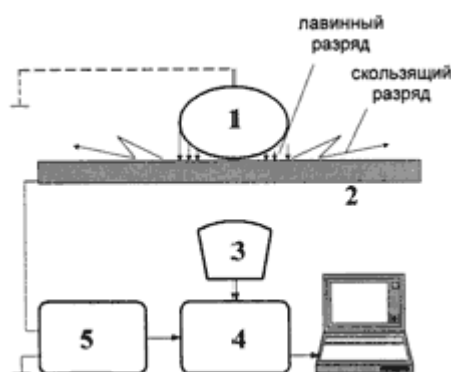


Рис. 1. Схематическое изображение устройства для исследования ГРВ характеристик: 1 – объект исследования, 2 – прозрачный электрод, 3 – оптическая система, 4 – видеопреобразователь, 5 – электронные блоки

Принцип газоразрядной визуализации (ГРВ) заключается в следующем (рис. 1). Между исследуемым объектом 1 и диэлектрической пластиной 2, на которой размещается объект, подаются импульсы напряжения от генератора электромагнитного поля (ЭМП) 5, для чего на обратную сторону пластины 2 нанесено прозрачное токопроводящее покрытие. При высокой напряженности поля в газовой среде пространства контакта объекта 1 и пластины 2 развива-

ется лавинный и/или скользящий газовый разряд, параметры которого определяются свойствами объекта. Свечение разряда с помощью оптической системы и ПЗС-камеры 3 (ПЗС - прибор с зарядовой связью) преобразуется в видеосигналы, которые записываются в виде одиночных кадров (ГРВ-грамм) или AVI-файлов в блок памяти, связанный с компьютерным процессором обработки. Процессор обработки представляет собой специализированный программный комплекс, который позволяет вычислять набор параметров и на их основе делать определенные диагностические заключения [1].

При всем многообразии конкретных технических решений сущность процесса визуализаций может быть сведена к некоторой теоретической схеме. Первичным процессом является процесс взаимодействия ЭМП с объектом исследования, в результате которого при определенной напряженности ЭМП возникает эмиссия с поверхностью объекта заряженных частиц, участвующих в иницировании начальных фаз газового разряда. Газовый разряд, в свою очередь, может влиять на состояние объекта, вызывая вторичные эмиссионные, деструктивные и тепловые процессы. Таким образом, в процессе газоразрядной визуализации формируется некоторая последовательность информационных преобразований. Состояние объекта характеризуется процессами, среди которых определяющую роль с точки зрения процесса ГРВ играют физико-химические и эмиссионные процессы, а также процессы газовой выделенности, которые зависят от изменений импеданса объекта как единого целого, импеданса участков его поверхности, их структурных и эмиссионных свойств. Неоднородность поверхности и объема, процессы эмиссии заряженных частиц или выделения газов оказывают влияние на параметры электромагнитного поля, за счет чего изменяются параметры газового разряда [3]. Такими параметрами являются характеристики тока разряда и оптического излучения. При этом основная информация извлекается из характеристик свечения, которое представляет собой пространственно распределенную группу участков различной яркости. Приемник излучения преобразует пространственное распределение яркости в изображение, а анализ амплитудных характеристик видеосигналов приводит к формированию набора параметров.

Результаты были получены с использованием динамической ГРВ-видеосъемки. Полученные AVI-файлы, длительностью 5 секунд, обрабатывались с помощью программы GDV Scientific Laboratory. Эта программа обрабатывает видеофайл и переводит результаты обработки в графическую форму, разбивая данные по ГРВ-параметрам. Также с помощью данной программы были получены усредненные ГРВ-граммы для оптоэлектронных пластин и кварцевых оптических волокон при разном уровне шума.

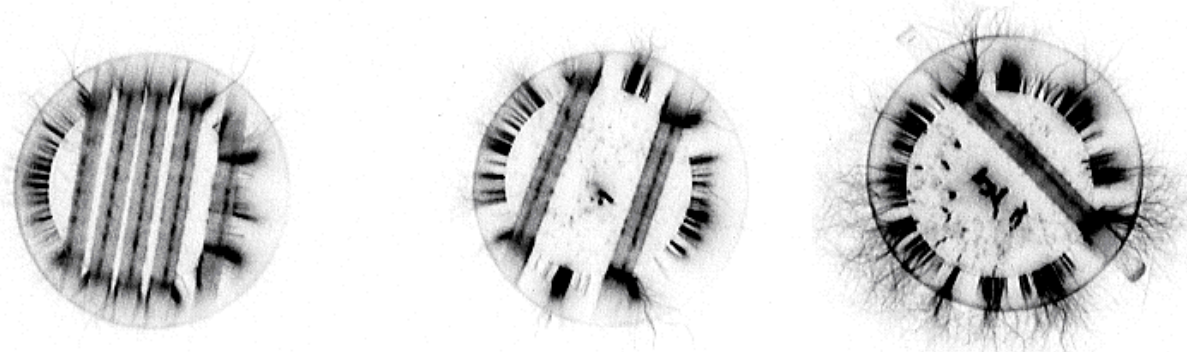


Рис. 2. Усредненные ГРВ-граммы жгутов при уровне шума 30

На рис. 2 приведены усредненные картины свечения волоконно-оптического жгутов при уровне шума 30 (негативные изображения). В данном случае сравниваются ГРВ-граммы 4, 2 и 1 жгута соответственно. Можно видеть, что картина, на которой тестируется жгут 1, более яркая и наглядная. Возможно, увеличение числа контролируемых волокон повышает качество и информативность картины.



Рис. 3. Усредненные ГРВ-граммы жгутов при уровне шума 120

На рис. 3 приведены усредненные картины свечения волоконно-оптических жгутов при уровне шума 120. На рис. 3а хорошо видно место дефекта жгута (место протекания локальных лавин). На рис. 3б приведены совместно бездефектный жгут и жгут с дефектом.

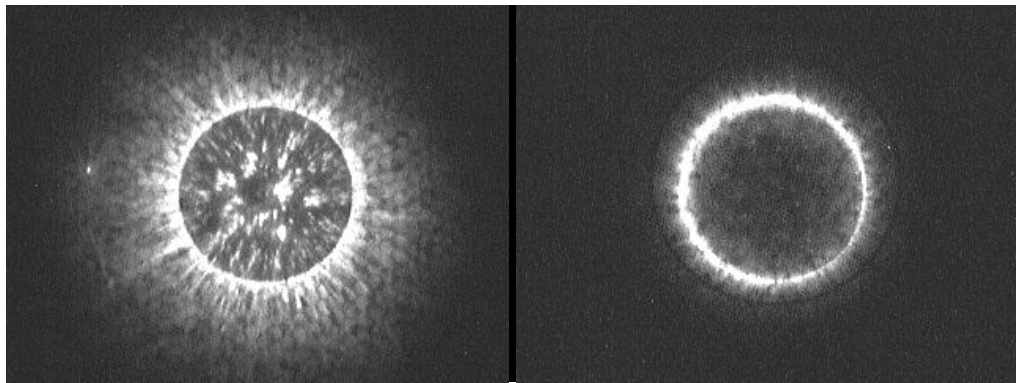


Рис. 4. Усредненные ГРВ-граммы волоконно-оптических пластин при уровне шума 30

На рис. 4. приведены изображения двух волоконно-оптических пластин при уровне шума 30. Можно отметить, что на первой картине достаточно точно передана мозаичность структуры. На второй картине свечение распределено равномерно, что позволяет сделать предположение об отсутствии дефектов.

Можно предложить способ дефектоскопии, заключающийся в определении точки с наибольшей интенсивностью – предполагаемого места дефекта. Современная конструкция прибора недостаточно эффективна для использования данного метода, поэтому рекомендуется дальнейшее усовершенствование конструкции.

Неоднородное распределение свечения вдоль кварцевого оптического волокна позволяет сделать выводы о возможности визуального контроля качества металлического покрытия, нанесенного на волокно.

Для оценки разрешающей способности ГРВ-методики при параметрическом анализе требуются дополнительные исследования.

При анализе дефектной структуры объекта на основе какого-либо ГРВ-параметра необходимо учитывать временные и энергетические режимы получения данного параметра. Возможно, следует увеличить время экспозиции и амплитуду подающего напряжения.

ГРВ метод представляет интерес как быстрый, недорогой метод диагностики полупроводниковых структур и оптического волокна и требует дальнейшего, более детального рассмотрения физических особенностей формирования газового разряда, учета информационного шума, который может возникать от посторонних объектов и газовой среды.



## Заключение

Таким образом, доказана принципиальная возможность контроля дефектов изделий, полученных на основе оптического волокна, методом газоразрядной визуализации. Рекомендуется увеличивать число контролируемых кварцевых оптических волокон, повышать уровень шума. Необходимо также дальнейшее усовершенствование конструкции прибора.

## Литература

1. Коротков К.Г., Баньковский Н.Г. Экспериментальное исследование характеристик разряда в узком зазоре, ограниченном диэлектриком // Труды ЛПИ. 1985. № 412. С. 64–68.
2. Коротков К.Г. Эффект Кирлиан. СПб., 1995. 218 с.
3. Коротков К.Г. Исследование влияния зарядового пятна диэлектрической поверхности на траекторию электронов лавинного разряда // Труды ЛПИ. 1985. № 412. С. 67–70.
4. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии СПб. СПбГИТМО (ТУ), 2001.
5. Романий С.Ф., Черный З.Д. Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиан. Днепропетровск 1991, 144 с.
6. Баньковский Н.Г., Коротков К.Г. Изучение физики газоразрядной визуализации // Письма ЖТФ. 982. Т. 8. № 4. С. 216–300.
7. Коротков К.Г., Хмыров С.В. Фотографирование поверхности твердого тела посредством разряда при атмосферном давлении // Журн. научн. прикл. фотогр. и кинематогр. 1982. Т. 27. № 2. С. 131–135.
8. Адаменко В.Г. Исследование механизма формирования изображений, получаемых с помощью высокочастотного электрического разряда, Дисс. Минск, 1975, 140 с.
9. Гроднев И. И., Ларин Ю.Т., Теумин И. И. Оптические кабели. М., 1991.
10. Ларин Ю.Т., Рязанов И.Б. Расчет параметров оптических кабелей. М.: МЭИ, 1992. 122 с.

# ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОП-СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ В РЕЖИМЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЕ-ОТЖИГ

Р.А. Халецкий

Научный руководитель – д.т.н., профессор А.М. Скворцов

Приводятся результаты влияния гамма-облучения на вольт-фарадные характеристики (ВФХ) МОП-структур в зависимости от технологии термического окисления. Рассматривается поведение гистерезиса ВФХ при гамма-облучении и последующем восстановительном термоотжиге экспериментальных МОП-структур.

## Введение

Интегральные микросхемы на основе МОП-структур (металл-окисел-полупроводник) находят широкое применение в современной вычислительной технике, и стойкость к воздействию ионизирующего облучения является одним из основных требований, которые к ним предъявляются. В настоящее время уже имеется большое количество работ по влиянию ионизирующего излучения различного вида, в том числе гамма-излучения на МОП-структуры [1, 2]. Одним из основных вопросов радиационной стабильности является ее связь с технологией получения термического диоксида кремния, что является существенным, так как процессы деградации при воздействии гамма-излучения во многом определяются структурными и электрофизическими особенностями границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> [2, 3].

На сегодняшний день не существует однозначной зависимости между режимами термического окисления (состав окислительной среды, температура и время окисления) и характером изменения электрофизических параметров МОП-структур при воздействии ионизирующего гамма-излучения. Это обстоятельство и явилось причиной данной работы, суть которого заключалась в установлении связи между особенностями кинетики деградации некоторых электрофизических параметров МОП-структур при гамма-облучении и технологией термического окисления.

## Сущность эксперимента

Экспериментальные образцы производились посредством термического окисления монокристаллического кремния 76 КЭФ 7,5 (100), выращенного по методу Чохральского, в различных технологических условиях. Верхний электрод (на SiO<sub>2</sub>) состоял из композиции: Si-поликристаллический, легированный фосфором, и алюминий. Перед проведением процесса термического окисления подложки предварительно обрабатывались в перекисно-аммиачном растворе и смеси Каро. Термическое окисление производилось с добавками хлора методом барботирования через 33% водный раствор HCl. В табл.1 представлены технологические особенности термического окисления.

| № образца | Толщина окисла, нм | Продолжительность термического окисления, мин |              |                        |                 | Температура окисления, °С | Напряжение плоских зон U <sub>ПЗ</sub> , В |
|-----------|--------------------|---|--------------|------------------------|-----------------|---------------------------|--|
|           |                    | В сухом O <sub>2</sub>                        | В парах воды | В сухом O <sub>2</sub> | Суммарное время |                           |  |
| 1         | 80                 | 10  | 100          | 10                     | 120             | 850                       | -1,5                                       |
| 2         | 120                | 90  | -            | -                      | 90              | 1050                      | -3,5                                       |
| 3         | 120                | 10  | 18           | 10                     | 38              | 1000                      | -1   |
| 4         | 150                | 120   | -            | -                      | 120             | 1050                      | -4,25                                      |

Таблица 1. Технологические особенности получения экспериментальных образцов

Экспериментальные структуры подвергались воздействию гамма-облучения  $\text{Co}^{60}$  с мощностью дозы 0,25 Мрад/час, а также восстановительным термообработкам. Обработка образцов в режиме гамма-облучение-отжиг производилась следующим образом: 2 часа гамма-облучение, отжиг при  $T=450^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. После каждого вида воздействия производилось измерение высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ). По смещению по оси напряжений ВФХ после облучения относительно ВФХ до облучения на уровне емкости плоских зон  $C_{\text{ПЗ}}$  определялся сдвиг напряжения плоских зон  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$ . При этом направление сдвига  $U_{\text{ПЗ}}$  характеризует знак фиксированного заряда в окисле, вызывающего этот сдвиг, а модуль  $|\Delta U_{\text{ПЗ}}|$  пропорционален его величине [4].

## Результаты и их обсуждение

На рис.1 схематично показаны типичные ВФХ после гамма-облучения и восстановительного отжига. Видно, что после каждого вида воздействия наблюдалось появление гистерезиса, т.е. разность хода  $\Delta U = U_{\text{ПЗпрям}} - U_{\text{ПЗобр}}$  на уровне  $C_{\text{ПЗ}}$  между ВФХ, полученной при изменении потенциала из режима аккумуляции в режим инверсии – прямой ход (сплошные кривые на рис.1 а) и б)), и ВФХ, полученной в обратном направлении (пунктирные кривые).

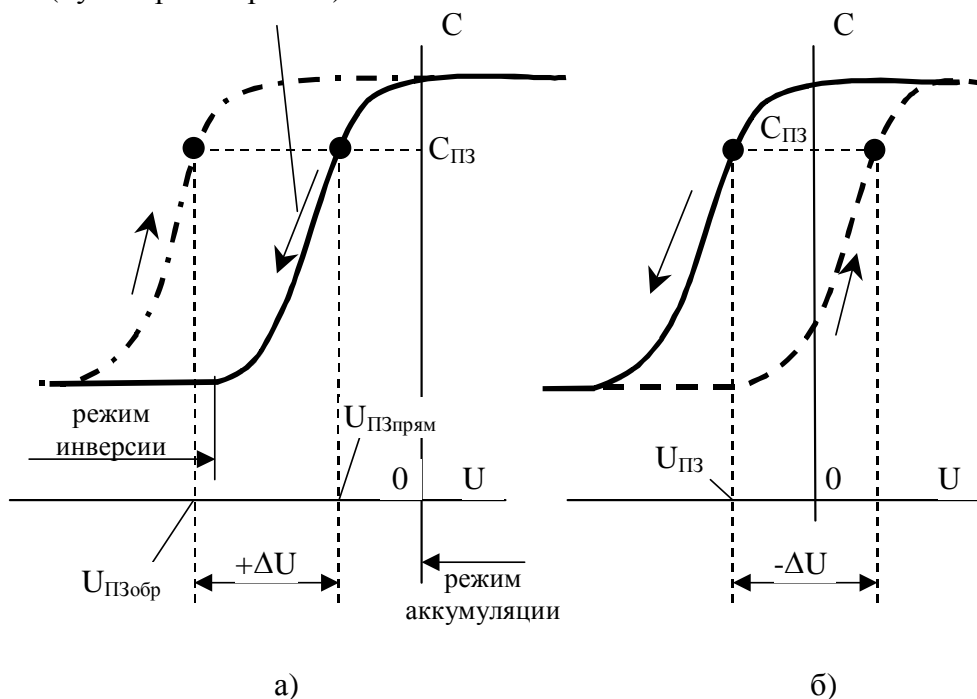


Рис.1. Схематичное представление ВФХ экспериментальных образцов: а) после гамма-облучения; б) после восстановительного термоотжига. Стрелки возле кривых показывают направление изменение напряжения при измерении ВФХ

Появление гистерезиса говорит о том, что произошло зарядение уровней захвата (ловушек) в окисле. При этом знак захваченных зарядов определяется знаком значения  $\Delta U$ . Получается, что при гамма-облучении наблюдается положительный заряд на ловушках, при восстановительном термическом отжиге – отрицательный.

Авторы [5] показывают, что за положительный заряд на дырочных ловушках могут отвечать трехкоординированные атомы кремния ( $E'$ -центры) в переходной области  $\text{Si-SiO}_2$ . Таким образом, природа появления положительного заряда на ловушках определяется тем, что под действием гамма-излучения происходит генерация  $E'$ -центров [2], которые впоследствии могут захватывать или отдавать дырку, определяя свое зарядовое состояние. Природа электронных ловушек связывается с собственными дефектами двуоксида кремния и пока изучена плохо [5].

Возникает вопрос, каким образом происходит заряджение и опустошение дырочных ловушек. Вероятно, их заряджение дырками происходит в режиме инверсии при измерении ВФХ. В этом случае индуцированный инверсионный слой, являясь источником дырок, производит их инжекцию на дырочные ловушки в переходной области Si-SiO<sub>2</sub>. Когда ВФХ переходит в режим аккумуляции, то происходит опустошение дырочных ловушек в результате выброса дырок в валентную зону полупроводника, где они рекомбинируют с основными носителями. При этом в режиме аккумуляции можно ожидать, что одновременно с выбросом дырок с дырочных ловушек происходит захват электронов на электронные ловушки. Впоследствии, в режиме инверсии, эти электроны, опустошив ловушки, прорекомбинируют с дырками в валентной зоне кремния.

Таким образом, процессы заполнения и опустошения зарядами соответствующих ловушек происходят одновременно для электронов и дырок. В итоге результирующее значение заряда на ловушках в окисле будет определяться суперпозицией зарядов на электронных и дырочных ловушках. При этом понятно, что значение заряда на ловушках будет определяться концентрацией этих ловушечных центров.

Получается, что при гамма-облучении происходит генерация дырочных ловушек, концентрация которых больше концентрации электронных ловушек. При восстановительном термоотжиге заряд на электронных ловушках больше заряда на дырочных. Скорее всего, это связано не с генерацией новых электронных ловушек, а с аннигиляцией в результате термоотжига дырочных ловушек (E'-центров).

При качественном анализе влияния режимов термического окисления на значение зарядов на ловушках было обнаружено, что наибольшая концентрация дырочных ловушек характерна для окислов, полученных в среде сухого кислорода при T=1050°C. То же значение для окислов, полученных в комбинированной среде (сухой – пары воды – сухой) оказалось в 1,5–2 раза меньшим.

## Заключение

Таким образом, величина  $\Delta U$  и знак гистерезиса, наблюдаемого при воздействии на МОП-структуру гамма-излучения или температуры, связаны с параллельно протекающими процессами заполнения и опустошения дырочных и электронных ловушек в переходной области кремний-окисел. Показано, что по параметру  $\Delta U$  наиболее стабильными являются МОП-структуры, полученные при термическом окислении по схеме «сухой – пары воды – сухой». Таким образом, целенаправленно изменяя среду окисления и одновременно корректируя остальные параметры этого процесса, можно добиться взаимной компенсации положительного и отрицательного заряда на ловушках при гамма-облучении, тем самым, решив вопрос радиационной стойкости.

## Литература

1. Ringel H., Knoll M., Braunig D., Fahrner W.R. Charges in metal-oxide-semiconductor samples of various technologies induced by <sup>60</sup>Co- $\gamma$  and x-ray quanta// J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 2. P. 393-399.
2. Гуртов В.А. Радиационные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник: Учебное пособие. – Петрозаводск, 1988. 96 с.
3. Е.Д. Васильева, М.Н. Колотов, М.В. Нахимович, В.И. Соколов. Зарядовые состояния переходной области Si-SiO<sub>2</sub> при радиационной и термополевой обработке// Микроэлектроника, 2000, том 29, №1, с. 27-31.
4. С. Зи. Технология СБИС. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1986, 404 с.
5. Барабан А. П., Булавинов В. В., Коноров П. П. Электроника слоев SiO<sub>2</sub> на кремнии. - Л, Издательство Ленинградского университета, 1988. 304 с.

|   |    |
|---|----|
| <b>Секция 5. Системный анализ, теоретическая и прикладная механика</b> .....  | 3  |
| <b>Абдурахманов И.А., Король Д.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Экспериментально-аналитическое исследование процесса трения поверхностного слоя образцов и структурная идентификация его динамической системы .....            | 3  |
| <b>Кудрявцева И.М.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Динамика сильфона, работающего в резонансном режиме.....  | 8  |
| <b>Сапожков М.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Динамические характеристики пары трения «стекло – стекло» .....   | 13 |
| <b>Валентик Н.Н., Климанов В.А., Когай Н.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич). Анализ динамики упругих чувствительных элементов герконов и акселерометров .....  | 20 |
| <b>Кудрявцева И.М.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Аналитическое определение жёсткости гофров сильфона.....  | 23 |
| <b>Борисов П.А.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент В.С. Томасов). Оптимизация энергоподсистем электротехнических устройств на базе неуправляемых выпрямителей.....  | 30 |
| <b>Лукичёв Д.В.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Усольцев). Нейросетевой наблюдатель потокосцепления ротора в системе векторного управления асинхронным короткозамкнутым двигателем.....   | 38 |
| <b>Жданов И.Н.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Сеницын). Анализ погрешности амплитудного цифрового преобразователя угол-код.....  | 45 |
| <b>Несмачный Д.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.А. Иванов). Построение аналитического описания поведения силы, действующей на маятник, при движении его в среде с сопротивлением, пропорциональным первой степени скорости .....              | 51 |
| <b>Логовская Е.В., Резников С.С., Чан Нгок Чау</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Simulink-моделирование нелинейной системы с двумя степенями свободы.....  | 55 |
| <b>Амоскин И.В., Блинников А.А., Николаев Н.А.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент А.А. Бобцов). Стабилизация нелинейной возмущённой системы с неограниченной нелинейностью .....  | 59 |
| <b>Слита О.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Ушаков). Групповое ранжирование неопределённых параметров матриц модельного представления объектов управления .....  | 67 |
| <b>Одинец Н.М.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор И.В. Мирошник). Управление колебаниями маятника Капицы.....  | 72 |
| <b>Кушнарёв А.В., Орлов Д.С.</b> (научные руководители – к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев, к.т.н., доцент А.Ю. Ощепков (ООО «НПП Системы контроля», г. Пермь)). Разработка датчика малых скоростей воздушного потока на основе сноса факела коронного разряда ..... | 79 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Агеев А.С., Агеева Т.К.</b> (научные руководители – д.ф.-м.н., профессор М.А. Марценюк (Пермский государственный университет), к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев). Разработка регулятора температуры промышленных электропечей с автоматическим определением параметров ПИ-регулирования методом предварительной идентификации..... | 88  |
| <b>Саенко А.П.</b> (научные руководители – к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев, к.т.н. Х.-М.Х. Байсиев – ВГИ, г. Нальчик). Прибор для корректировки движения противораковой ракеты с учётом нестабильности приземного ветра.....   | 97  |
| <b>Лобачева А.М.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов). Оценка напряжений в упругих подвесах микромеханических гироскопов.....  | 102 |
| <b>Дударенко Н.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор А.В. Ушаков). Влияние фактора коммутации потока заявок (при гармоническом их моделировании) по входам сложной системы на возможность её вырождения.....   | 105 |
| <b>Аржаник А.В.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент А.В. Лямин). Синтез алгоритмов управления движением двухприводного мобильного робота на основе нечёткой логики для задачи прохождения «ворот».....   | 112 |
| <b>Герасимов Д.Н., Мигуш С.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.О. Никифоров). Алгоритмы адаптивного управления соотношением воздух / топливо в инжекторных двигателях внутреннего сгорания с улучшенной параметрической сходимостью.....   | 121 |
| <b>Секция 6. Измерительная техника и технология приборостроения ..</b>  | 127 |
| <b>Абрамчук М.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Б.П. Тимофеев). Рекомендации ISO 1328 в части установления параметров точности зубчатых колёс и передач.....   | 127 |
| <b>Валентик Н.Н., Климанов В.А., Когай Н.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич). Электромеханические чувствительные элементы коммутационных устройств и микросенсоров в микроэлектронике.....  | 132 |
| <b>Дергунов А.О.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Д.Д. Куликов). Построение единой базы данных технологического назначения.....  | 136 |
| <b>Юсупов П.Д.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Д.Д. Куликов). Создание удалённой базы данных технологического назначения в среде стандартных Интернет-приложений.....   | 139 |
| <b>Сушко В.Ю.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Кораблёв). Методика расчёта тепловых связей через штыревых разъёмы и многожильные кабели.....   | 142 |
| <b>Керпелева С.Ю.</b> (научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.О. Голубок). Универсальный датчик локального силового взаимодействия и туннельного тока для сканирующего зондового микроскопа.....   | 146 |
| <b>Макаров Д.С.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент В.А. Кораблёв). Система регулирования расхода и температуры газа в газоанализаторе .....   | 151 |
| <b>Кокшаров Д.Н., Спасский Н.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич). Современное состояние и перспективы развития упругих чувствительных элементов.....  | 155 |
| <b>Чернокнижная Е.Г.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин). Формирование маршрута обработки партий деталей в САПР ТП.....  | 160 |
| <b>Ефименко А.В., Монахов Ю.С.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент Е.В. Шалобаев). Лазерные сканирующие установки – средства для создания биологических обратных связей.....   | 164 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Воронцов Е.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.М. Мусалимов).<br>Классификация геодезических приборов .....  | 167 |
| <b>Валентик Н.Н., Климанов В.А., Когай Н.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.Л. Ткалич). Мембранные магнитоуправляемые контакты.....  | 172 |
| <b>Секция 7. Биомедицинские технологии и томография</b> .....  | 175 |
| <b>Рассадина А.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Г.Н. Лукьянов).<br>Оценка степени резистентности внутренней полости носа человека<br>на натурной модели.....   | 175 |
| <b>Казначеева А.О.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина).<br>Влияние параметров сканирования на качество ЯМР-изображений .....   | 179 |
| <b>Пушкарёва А.Е.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.Ю. Храмов). Влияние<br>скорости кровотока на температуру среды при воздействии лазерного излучения<br>на кожу.....   | 183 |
| <b>Головин П.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор К.Г. Коротков).<br>Применение метода ГРВ при исследовании физических свойств волос человека.....   | 187 |
| <b>Грищенко А.Ю., Нечаев Д.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор<br>К.Г. Коротков). Исследование работы прибора «Измеритель поверхностных частот»<br>при различных значениях влажности .....  | 196 |
| <b>Стражмейстер И.Б.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Г.Н. Дульнев).<br>Оценка состояния сознания человека по термодинамическим показателям .....   | 200 |
| <b>Казначеева А.О.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина).<br>Сопоставление эффективности эксплуатации сверхпроводящих МР-томографов .....  | 204 |
| <b>Москалёва А.Ю., Смирнова О.А.</b> (научные руководители – д.т.н., профессор<br>В.А. Тарлыков, д.м.н., профессор С.С. Бессмельцев). Дифрактометрический метод<br>исследования влияния плотности мощности лазерного излучения<br>на деформируемость эритроцитов ..... | 207 |
| <b>Терещенко Е.А.</b> (научный руководитель – с.н.с. Г.В. Катаева, ИМЧ РАН).<br>ПЭТ и методы интерпретации данных.....   | 213 |
| <b>Щекотин Д.С.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор В.С. Сизиков).<br>Использование априорной информации для улучшения качества томографических<br>изображений .....   | 219 |
| <b>Казначеева А.О.</b> (научный руководитель – к.т.н., доцент М.Я. Марусина). Анализ<br>информативности данных, полученных различными томографическими методами....  | 225 |
| <b>Серёгин А.Н.</b> (научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Неронов).<br>Приложение для просмотра изображений, полученных на томографе.....  | 229 |
| <b>Секция 8. Физика твёрдого тела и материаловедение</b> .....   | 232 |
| <b>Жарова Ю.А., Смелова А.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор<br>А.М. Скворцов). Получение композитных фотонных структур на основе щелевого<br>кремния и жидкого кристалла. Электрооптический эффект. ....  | 232 |
| <b>Асеев В.А.</b> (научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров).<br>Спектрально-люминесцентные свойства высококонцентрированных иттербий-<br>эрбиевых фосфатных стёкол для микролазеров.....  | 236 |
| <b>Рохмин А.С.</b> (научные руководители – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров,<br>д.ф.-м.н., профессор А.К. Пржевуский). Анизотропия поглощения и излучения в<br>лазерных стёклах, активированных тулием .....  | 245 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Ульяшенко А.М.</b> (научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров).<br>Спектрально-люминесцентные свойства оптических материалов легированных<br>ионами переходных металлов.....                                    | 251 |
| <b>Бахвалов А.С., Лукина В.А.</b> (научный руководитель – к.г.-м.н., с.н.с.<br>Л.П. Коробейникова). Первичная фильтрация как средство оптимизации<br>рентгенофлуоресцентного анализа примесных элементов в алюминиевых сплавах .... | 258 |
| <b>Студеникин О.Л., Фролков В.Н.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор<br>Ю.А. Гатчин). Контроль качества кварцевого оптического волокна<br>и оптоэлектронных пластин методом газоразрядной визуализации.....               | 262 |
| <b>Халецкий Р.А.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор А.М. Скворцов).<br>Особенности изменения гистерезиса вольт-фарадных характеристик МОП-структур<br>при воздействии в режиме гамма-облучение – отжиг .....             | 266 |
| <b>Жарова Ю.А., Смелова А.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор<br>А.М. Скворцов). Фотонные кристаллы и перспективы их использования. ....   | 269 |
| <b>Петров Д.В.</b> (научный руководитель – д.т.н., профессор Е.Б. Яковлев).<br>Особенности обработки пористого стекла микро- и наносекундными импульсами.....   | 275 |
| <br><b>Вестник II межвузовской конференции молодых учёных. Сборник научных трудов /</b><br>Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 284 с.   |     |

**ВЕСТНИК II МЕЖВУЗОВСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
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 12.06.05.  
Заказ 856. Тираж 100 экз.