

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

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



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Выпуск 47

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ,
МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2008**

В научно-техническом вестнике СПбГУ ИТМО, Выпуск 47 «СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ» представлены работы, выполненные в рамках:

- инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» вузов России на 2007–2008 гг.;
- аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)» (Федеральное агентство по образованию);
- Федеральной целевой программы развития образования на 2006–2010 гг. (Федеральное агентство по образованию);
- Федеральной целевой программы развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг. (Федеральное агентство по науке и инновациям);
- Российского фонда фундаментальных исследований, а также инициативные разработки.



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

ISSN 1819-222X

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2008

**МЕТОДИКА ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА
ПРИ МОНИТОРИНГЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

**А.В. Воробьев (Уфимский государственный авиационный технический университет)
Научный руководитель – д.т.н., профессор Г.В. Миловзоров
(Уфимский государственный авиационный технический университет)**

Предлагается подход к реализации методики цифровой фильтрации информационного полигармонического сигнала системы мониторинга параметров магнитосферы Земли в реальном времени. Данная методика предоставляет широкие возможности в области анализа как амплитудных вариаций вектора магнитной индукции, так и его частотного диапазона.

Введение

Наблюдение геомагнитной обстановки Земли и ее вариаций являются актуальной задачей. Это обусловлено рядом установленных факторов непосредственного влияния магнитных полей на биосферу и жизнедеятельность человека в частности. К таким факторами относятся: природные, физические, и физико-биологические явления, а именно:

- ориентация по магнитному полю Земли мигрирующих птиц [1];
- ориентация микроорганизмов по магнитному полю Земли с целью поиска оптимальных условий для существования;
- ориентация некоторых видов млекопитающих по магнитному полю [3];
- наличие в составе тканей головного мозга человека железа, находящегося в составе ферритинов (белков с железом в виде наночастиц). Другие компоненты, находящиеся в тканях головного мозга человека – это магнетит (оксид железа), либо очень похожий по составу на него маггемит (магнитная модификация окиси железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), либо их смесь;
- учеными было выявлено, что в моменты воздействия на организм человека электромагнитных полей, частота которых колеблется в диапазоне 0.5–3 Гц (что совпадает с частотой биения сердца), возникает опасно высокая вероятность спровоцировать фибрилляцию [1].

Эти и многие другие факты определяют задачу, связанную не только с постоянным контролем параметров магнитосферы Земли, но и с выявлением амплитудного и частотного диапазона уязвимости человека к электромагнитным полям и их вариациям.

Для решения обозначенной задачи предлагается информационно-измерительная система, осуществляющая мониторинг и регистрацию параметров магнитосферы Земли в реальном времени. В основе ее лежит модуль, состоящий из трех ортогонально настроенных магниточувствительных элементов, позволяющий регистрировать изменения внешнего магнитного поля с точностью до 4×10^{-9} Тл.

Структура системы мониторинга параметров магнитосферы земли

На рис. 1 приведена структура системы мониторинга параметров состояния магнитосферы Земли, содержащая:

- трехосевой датчик вектора магнитной индукции;
- предварительный фильтр нижних частот (ФНЧ);

- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- цифровой программно настраиваемый нерекурсивный фильтр (НЦФ);
- систему графического отображения и регистрации информации в реальном времени.

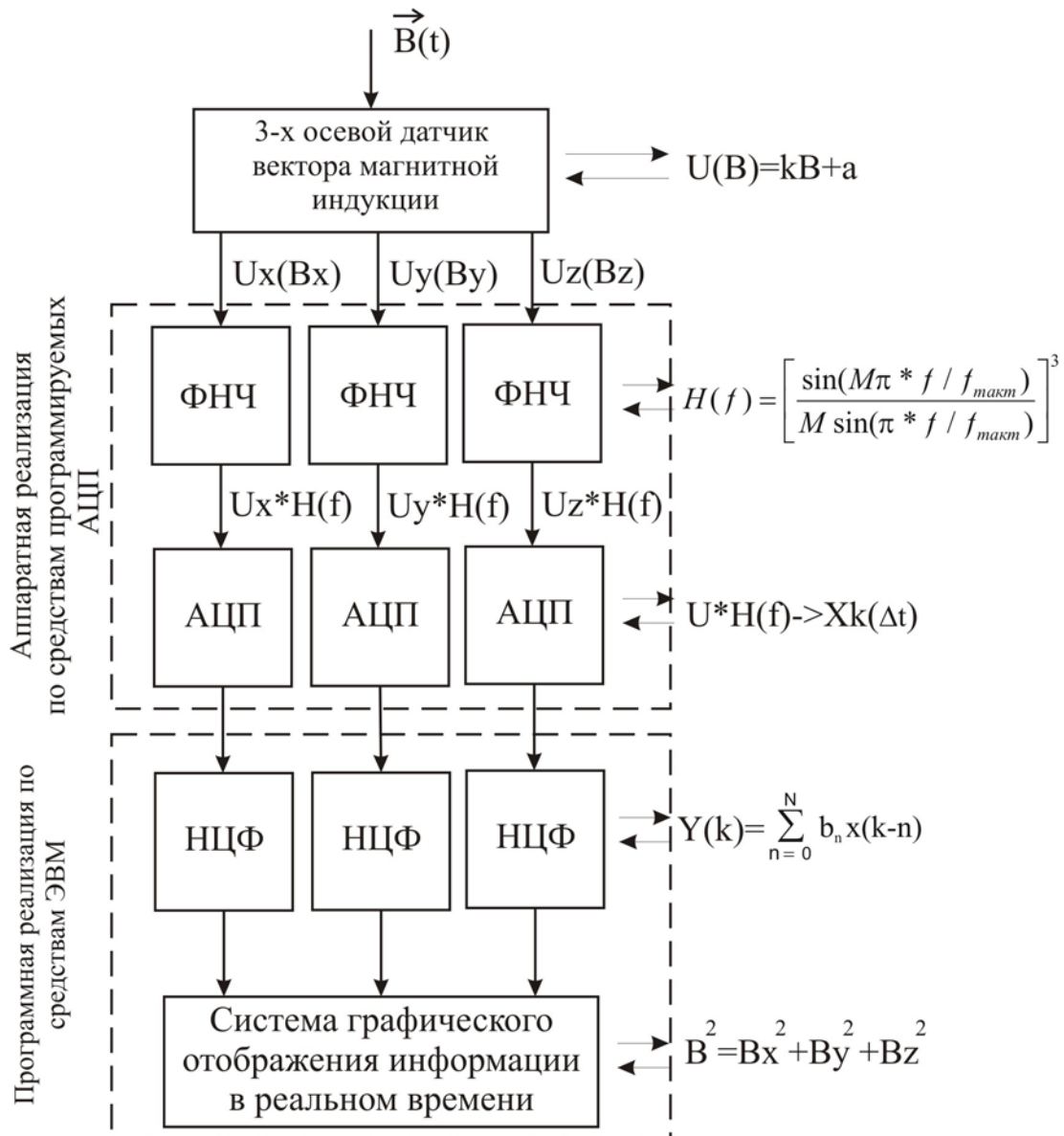


Рис. 1. Структура системы мониторинга параметров магнитосферы Земли

В представленной структуре приняты следующие обозначения: $B(t)$ – внешнее воздействие магнитного поля на датчик; $U_x(B_x)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси X; $U_y(B_y)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси Y; $U_z(B_z)$ – выходное напряжение датчика, пропорциональное значению вектора магнитной индукции вдоль оси Z; $U * H(f)$ – результат первичной фильтрации сигнала $U(B)$, где $H(f)$ – передаточная функция предварительного аналогового фильтра низких частот (ФНЧ); $X_k(\Delta t)$ – последовательность дискретных цифровых сигналов, соответствующих результату оцифровки сигнала $U(B) * H(f)$ аналого-цифровым преобразователем (АЦП); $Y(k)$ – последовательность дискретных цифровых сигналов, соответствующая результату фильтрации $X_k(\Delta t)$ нерекурсивным цифровым фильтром (НЦФ).

Учитывая, что собственное электромагнитное поле человека наиболее активно в области низких и сверхнизких частот (0,01–100 Гц) [2], определим как верхнюю границу пропускания спектра частоту, равную 100 Гц.

Таким образом, задаваясь целью «отсеять» гармонические составляющие, превышающие определенное выше значение, рассмотрим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) вида $(\sin(x)/x)^3$ [4]. Передаточная функция фильтров, обладающих данной АЧХ, в z -области определяется выражением:

$$W(z) = \left[\frac{1 - z^{-M}}{M(1 - z^{-1})} \right]^3, \quad (1)$$

где M – целое число, которое задается программно и равно отношению тактовой частоты модулятора к частоте отсчетов фильтра. В частотной области модуль передаточной функции фильтра имеет вид

$$H(f) = \left[\frac{\sin(M\pi * f / f_{\max})}{M \sin(\pi * f / f_{\max})} \right]^3. \quad (2)$$

Таким образом, варьируя переменной M , можно изменять верхнюю границу частоты пропускания предварительного ФНЧ. В рассматриваемом случае при $M=102$ имеем верхнюю границу пропускания, равную 100 Гц.

Математическая модель цифрового фильтра

В результате оцифровки сигнала АЦП имеем ряд числовых значений $X(\Delta t)$ с равным шагом дискретизации Δt . На этом этапе обработки сигнала предоставляется возможность реализации «гибкого» модуля цифровой фильтрации, структура которого представлена на рис. 2.

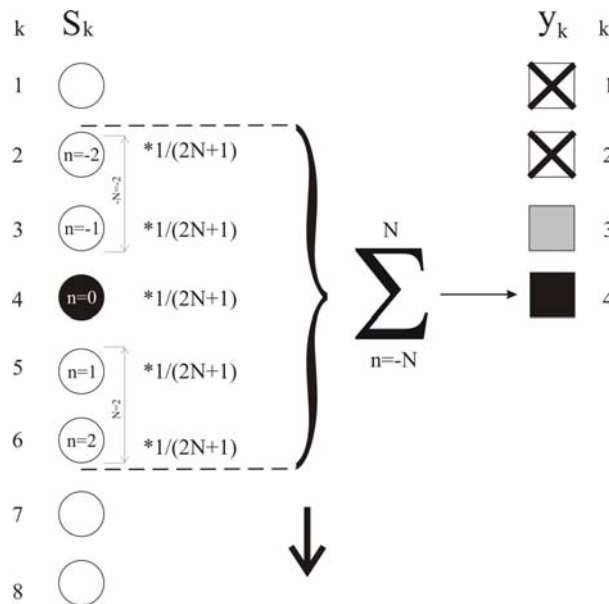


Рис. 2. Структура модуля цифровой фильтрации

Простейший способ аппроксимации по МНК произвольной функции $s(t)$ – с помощью полинома первой степени, т.е. функции вида $y(t) = A+Bt$ (метод скользящих средних). Произведем расчет симметричного фильтра МНК на $(2N+1)$ точек с окном от $-N$ до N . Для определения коэффициентов полинома найдем минимум функции приближения (функцию остаточных ошибок). С учетом дискретности данных по точкам $t_n = n\Delta t$ и принимая $\Delta t = 1$, для симметричного НЦФ с нумерацией отсчетов по n от цен-

тра окна фильтра (в системе координат фильтра) функция остаточных ошибок записывается в форме [5]:

$$\sigma(A, B) = \sum_n [s_n - (A + B \cdot n)]^2.$$

Дифференцируем функцию остаточных ошибок по аргументам A , B и, приравняв полученные уравнения нулю, формируем 2 нормальных уравнения:

$$\sum_{n=-N}^N (s_n - (A + B \cdot n)) \equiv \sum_{n=-N}^N s_n - A \sum_{n=-N}^N 1 - B \sum_{n=-N}^N n = 0,$$

$$\sum_{n=-N}^N (s_n - (A + B \cdot n)) \cdot n \equiv \sum_{n=-N}^N n \cdot s_n - A \sum_{n=-N}^N n - B \sum_{n=-N}^N n^2 = 0.$$

С учетом очевидного равенства $\sum_{n=-N}^N n = 0$ запишем результат решения данных уравнений относительно значений A и B :

$$A = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N s_n, \quad B = \sum_{n=-N}^N n \cdot s_n / \sum_{n=-N}^N n^2.$$

Подставляем значения коэффициентов в уравнение аппроксимирующего полинома, переходим в систему координат по точкам k массива $y(k+\tau) = A + B \cdot \tau$, где отсчет τ производится от точки k массива, против которой находится точка $n = 0$ фильтра, и получаем в общей форме уравнение фильтра аппроксимации [7]:

$$y(k+\tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N s_{k-n} + \tau \sum_{n=-N}^N n \cdot s_{k-n} / \sum_{n=-N}^N n^2.$$

Для сглаживающего НЦФ вычисления производятся непосредственно для точки k в центре окна фильтра ($\tau = 0$), при этом

$$y_k = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N s_{k-n}.$$

На рис. 3 показана зависимость результата оцифровки сигнала от окна фильтра $2N+1$.

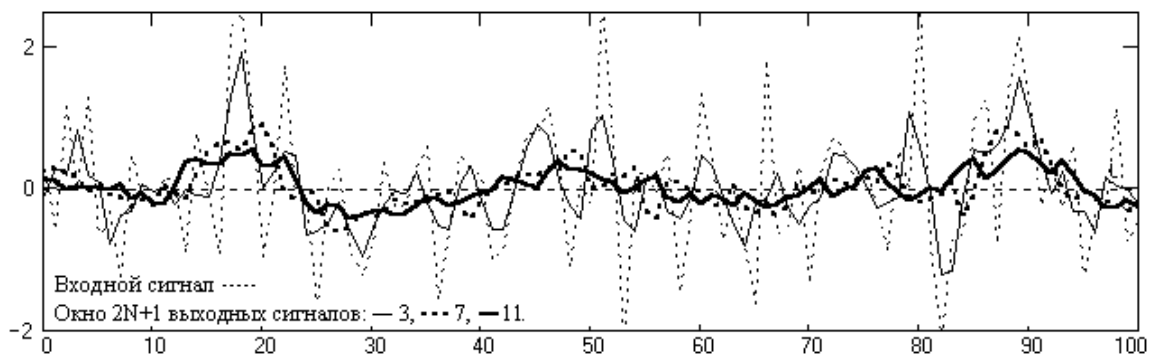


Рис. 3. Зависимость результата оцифровки сигнала от окна фильтра $2N+1$

Таким образом, проанализировав математический аппарат, принятый за основу методики синтеза цифрового фильтра, сформулируем следующие выводы:

- повышение порядка фильтра увеличивает степень касания частотной характеристикой уровня коэффициента передачи $H=1$ на частоте $\omega=0$ и расширяет полосу пропускания фильтра;
- увеличение количества членов фильтра приводит к сужению полосы пропускания и увеличивает крутизну ее среза;
- модификация фильтров уменьшает осцилляции передаточной функции в полосе подавления сигналов.

Совместное изменение этих параметров позволяет подбирать для сглаживания данных такой фильтр МНК, частотная характеристика которого наилучшим образом удовлетворяет частотному спектру сигналов при минимальном количестве коэффициентов фильтра. Из этого следует, что посредством цифровой фильтрации, организованной в виде утилитарного программного обеспечения, предоставляется возможность задавать различные параметры конечной фильтрации сигнала, в частности, применительно к рассмотренной проблематике, позволит наблюдать локальную геомагнитную обстановку Земли в различных частотных спектрах, основываясь на измерительных сигналах магнитометрической аппаратуры.

Литература

1. Воробьев А.В. // Электроника, автоматика и измерительная техника. Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2007. – С. 111–113.
2. Воробьев А.В. // Электронные устройства и системы. Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2008. – С. 75–82.
3. Ломаев Г.В. Датчики Баркгаузена. Монография. – Ижевск, 2008. – С. 23–31.
4. Голубцов М.С. Микроконтроллеры семейства AVR. – М., 2005. – С. 67–71.
5. Давыдов А.В. Цифровая обработка сигналов. Курс тематических лекций. – Екатеринбург, 2007.
6. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
7. Гольденберг Л.М. и др. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ СТАРЕНИИ

Э.М. Зинатуллин, С.А. Дёмин, А.В. Яценко, О.Ю. Панищев
(Татарский государственный гуманитарно-педагогический университет,
Казанский государственный университет)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Р.М. Юльметьев
(Татарский государственный гуманитарно-педагогический университет)

В работе выполнен анализ возрастных изменений времени релаксации и взаимодействия коротко- и далекодействующих корреляций в динамике выходного силового импульса человека. Выявлены количественные и качественные различия в поведении коротко- и далекодействующих корреляций и времени релаксации для разных возрастных групп. Показано уменьшение влияния кратковременных корреляций при старении. В работе также представлены процедуры локализации, отражающие локальные особенности релаксационных процессов в динамике силового импульса человека с возрастом. Таким образом, корреляционные и релаксационные особенности динамики выходного силового импульса позволили эффективно оценивать возрастные изменения, возникающие в нервно-мышечной системе человека.

Введение. Физические аспекты биологического старения

В настоящее время весьма перспективным направлением в современной статистической физике оказалось выявление и исследование физических особенностей физиологических процессов в живых системах. Для решения данных задач используются разнообразные подходы. Большинство из них основываются на анализе экспериментальных временных серий физиологических показателей и характеристик живых систем, в частности, человеческого организма.

Человеческий организм представляет собой сложную нестационарную многоуровневую структуру, состоящую из огромного числа взаимосвязанных подсистем. Понимание процессов, происходящих в человеческом организме, имеет огромное теоретическое и практическое значение для ряда современных естественных наук. При этом одной из актуальных задач является понимание биологического старения человеческого организма и отдельных систем жизнедеятельности.

Интересные результаты в данной области, и в частности, в исследовании возрастных и патологических изменений организма человека были получены в работе американских физиологов [1], в которой обнаружено нарушение асимметрии вариабельности сердечного ритма при заболеваниях и старении. Американские физиологи под руководством Дж. Хаусдорфа (J.M. Hausdorff) провели ряд интересных исследований по изучению нарушений фрактальной динамики походки человека при различных заболеваниях и старении [2–6], исследованию изменений в динамике походки детей [6], анализу долговременных корреляций в походке молодых людей [5, 7]. В работе [8] методы нелинейной динамики были использованы для количественной оценки возрастных изменений динамики походки человека.

Другое направление, связанное с исследованием возрастных и патологических изменений в живых системах, основано на количественной оценке «физиологической сложности» в таких системах. Если структуру сложной системы, в том числе и живой, воспринимать как совокупность узлов и связей между ними, то уменьшение [9, 10] или увеличение [11, 12] сложности связано с изменением количества узлов или характера взаимосвязи между ними. Эти изменения можно классифицировать [13]:

(i) по числу независимых переменных (изменение числа переменных или параметров переменных изменяет сложность системы);

(ii) описание сложности системы через детерминированные и стохастические вклады, которые влияют на состояние системы [14, 15];

(iii) по изменениям характера связи переменных и параметров системы.

Данный подход был развит американским физиологом Валлианкорт (Vaillancourt) при исследовании патологических процессов, возрастных изменений человеческого организма [13], возрастных изменений нервно-мышечной системы [16], патологий при болезни Паркинсона [17].

Анализ физиологических серий [15, 18–19] позволяет выявить некоторые скрытые закономерности в динамике сложных систем живой природы. Однако создание универсального метода обработки данных, позволяющего извлекать достаточно полную информацию о свойствах и динамических особенностях живых систем, в настоящее время не представляется возможным. Для получения более детальной информации о динамических и спектральных особенностях живых систем необходимы постоянное развитие существующих методов анализа временных серий, а также поиск и разработка альтернативных способов извлечения информации о временной эволюции живых систем.

В данной работе представлен анализ физиологических временных серий, основанный на статистической теории дискретных немарковских случайных процессов [20–23]. Данный метод позволяет изучать динамические, спектральные, корреляционные, релаксационные свойства и характеристики живых систем. Метод базируется на формализме функций памяти и технике проекционных операторов Цванцига-Мори [25–26]. В качестве объекта исследования мы рассмотрели колебания выходного силового импульса указательного пальца человека. Экспериментальные данные были получены группой американских физиологов под руководством проф. Валлианкорта с помощью динамометрического датчика, фиксирующего уровень выходного силового импульса указательного пальца человека. В эксперименте участвовали представители трех возрастных групп (I группа – с 20 до 24 лет, II – с 64 до 69 лет, III – с 75 до 90 лет). В процессе анализа экспериментальных данных учитывались два релаксационных канала. Первый вклад связан с короткодействующими корреляциями, второй с дальнедействующими корреляциями. Вычисление общего времени релаксации позволяет судить об особенностях релаксационных процессов в динамике выходного силового импульса человека, представляющего собой сложную комбинацию нелинейных взаимодействий. Для исследования локальных закономерностей нервно-мышечной системы человека были вычислены значения кинетических и релаксационных параметров при помощи специфической процедуры локализации. Данная процедура отражает локальные особенности релаксационных процессов в нервно-мышечной системе человека.

Таким образом, обнаруженные корреляционные и релаксационные особенности стохастической динамики выходного силового импульса позволяют описывать возрастные изменения, возникающие в нервно-мышечной системе человека.

Теоретическая часть. Релаксационные особенности дискретной временной эволюции живых систем

Представим временную динамику выходного силового импульса человека как дискретную временную серию x_j некоторой случайной величины X :

$$X = \{x(T), x(T + \tau), x(T + 2\tau), \dots, x(T + (N - 1)\tau)\}. \quad (1)$$

Здесь T – момент времени, с которого началась регистрация экспериментального показателя; $(N - 1)\tau$ – полное время регистрации сигнала; τ – временной шаг дискретизации.

Среднее значение $\langle X \rangle$, флуктуации δx_j и абсолютную дисперсию σ^2 для случайной величины X можно представить в следующем виде:

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(T + j\tau),$$

$$\delta x_j = x_j - \langle X \rangle, \quad \sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \delta x_j^2.$$

Для описания динамических свойств исследуемой живой системы (динамики корреляций) удобно использовать нормированную временную корреляционную функцию (ВКФ):

$$a(t) = \frac{1}{(N-m)\sigma^2} \sum_{j=0}^{N-m-1} \delta x_j \delta x_{j+m} = \frac{1}{(N-m)\sigma^2} \sum_{j=0}^{N-m-1} \delta x(T + j\tau) \delta x(T + (j+m)\tau),$$

$$t = m\tau, \quad 1 \leq m \leq N-1. \quad (2)$$

Здесь x_j, x_{j+m} – значения переменной X на $j, j+m$ шагах соответственно; $\delta x_j, \delta x_{j+m}$ – флуктуации величин x_j, x_{j+m} ; σ^2 – абсолютная дисперсия переменной X .

Функция $a(t)$ удовлетворяет условиям нормировки и ослабления корреляций:

$$\lim_{t \rightarrow 0} a(t) = 1, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} a(t) = 0.$$

С помощью техники проекционных операторов Цванцига-Мори [20-23] можно получить цепочку конечно-разностных уравнений немарковского типа [25, 26] для исходной ВКФ $a(t)$ и функций памяти более высокого порядка $M_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, n$):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta a(t)}{\Delta t} &= \lambda_1 a(t) - \tau \Lambda_1 \sum_{j=0}^{m-1} M_1(j\tau) a(t - j\tau), \\ \frac{\Delta M_1(t)}{\Delta t} &= \lambda_2 M_1(t) - \tau \Lambda_2 \sum_{j=0}^{m-1} M_2(j\tau) M_1(t - j\tau), \\ &\dots \\ \frac{\Delta M_{n-1}(t)}{\Delta t} &= \lambda_n M_{n-1}(t) - \tau \Lambda_n \sum_{j=0}^{m-1} M_n(j\tau) M_{n-1}(t - j\tau). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь λ_n – кинетические параметры, описывающие спектр собственных значений квазиоператора Лиувилля \mathcal{L} ; Λ_n – релаксационные параметры:

$$\lambda_n = i \frac{\langle \mathbf{W}_{n-1} \mathcal{L} \mathbf{W}_{n-1} \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}|^2 \rangle}, \quad \Lambda_n = i \frac{\langle \mathbf{W}_{n-1} \mathcal{L} \mathbf{W}_n \rangle}{\langle |\mathbf{W}_{n-1}|^2 \rangle}. \quad (4)$$

Динамические ортогональные переменные \mathbf{W}_n в уравнении (4) получены с помощью процедуры ортогонализации Грамма-Шмидта:

$$\langle \mathbf{W}_n, \mathbf{W}_m \rangle = \delta_{n,m} \langle |\mathbf{W}_n|^2 \rangle,$$

где $\delta_{n,m}$ – символ Кронекера.

Особенности релаксационных процессов в динамике выходного силового импульса человека могут быть исследованы при помощи анализа времени релаксации. Заметим, что в реальных сигналах релаксационные процессы определяются сложной взаимосвязью кратко- и долговременных корреляций. Количественная оценка вкладов коротко- и далекодействующих корреляций осуществляется при помощи кинетического λ_1 и релаксационного Λ_1 параметров. Таким образом, анализ поведения перечисленных характеристик дает возможность детально изучить динамику корреляций в изучаемой системе и выявить сложный характер релаксационных процессов.

Время релаксации исходной ВКФ, вычисленное для экспериментальных данных, определяется следующим образом:

$$\tau_E = \Delta t \sum_{j=1}^N a(t_j). \quad (5)$$

Для вычисления теоретического времени релаксации τ_R воспользуемся бесконечной цепочкой уравнений Цванцига-Мори [21]. Используя корреляционные приближения, основанные на идее Боголюбова о выравнивании релаксационных масштабов [22], можно получить аналитические выражения для времен релаксации исходной ВКФ для различных релаксационных уровней. После этого можно выполнить сопоставление времени релаксации τ_E , вычисленного для экспериментальных данных, с результатами расчетов замыкания цепочки уравнений Цванцига-Мори на различных релаксационных уровнях [31]. Предварительный анализ разных замыканий указывает на совпадение экспериментальных и теоретических времен релаксации при условии:

$$M_2(t) = M_1(t),$$

т.е. при равенстве релаксационных масштабов функций памяти первого и второго порядка.

Используя преобразование Лапласа, уравнения Цванцига-Мори можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} s\tilde{a}(s) - 1 &= \lambda_1\tilde{a}(s) - \Lambda_1\tilde{a}(s)\tilde{M}_1(s), \\ s\tilde{M}_1(s) - 1 &= \lambda_2\tilde{M}_1(s) - \Lambda_2\tilde{M}_1(s)\tilde{M}_2(s), \\ &\dots \\ s\tilde{M}_{n-1}(s) - 1 &= \lambda_n\tilde{M}_{n-1}(s) - \Lambda_n\tilde{M}_{n-1}(s)\tilde{M}_n(s). \end{aligned}$$

Для вышеуказанного условия $M_2(t) = M_1(t)$ можно получить решение этой системы уравнений в виде

$$\begin{aligned} \tilde{M}_1(s) &= \frac{1}{2\Lambda_2} \left\{ (\lambda_2 - s) \pm \sqrt{(s - \lambda_2)^2 + 4\Lambda_2} \right\}, \\ \tilde{a}(s) &= \left\{ s - \lambda_1 + \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} \left[(\lambda_2 - s) + \sqrt{(s - \lambda_2)^2 + 4\Lambda_2} \right] \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Время релаксации определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau_R &= \Re \lim_{s \rightarrow 0} \tilde{a}(s), \\ \tau_R &= \left\{ \frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} \left[\sqrt{4\Lambda_2 + (-\lambda_2)^2} + \lambda_2 \right] - \lambda_1 \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

С целью выявления локальных особенностей релаксационных процессов в динамике нервно-мышечной системы человека применялась специфическая процедура локализации.

Методика проведения эксперимента

В эксперименте участвовали 29 человек из трех возрастных групп: молодые люди (10 человек, 20–24 года, средний возраст – 22 года, 5 женщин и 5 мужчин), пожилые люди (9 человек, 64–69 лет, средний возраст – 67 лет, 4 женщины и 5 мужчин) и старые люди (10 человек, 75–90 лет, средний возраст – 82 года, 5 женщин и 5 мужчин). Все испытуемые – правши.

Все возрастные группы состояли из людей с умеренной мышечной активностью. Запястье и незадействованные пальцы правой руки людей фиксировались в неподвиж-

ном состоянии. Человек нажимал боковой стороной указательного пальца на динамометрический датчик (Entran ELFS-B3, Нью-Джерси), прикрепленный к столу (рис. 1). Аналоговый сигнал преобразовывался при помощи усилителя Coulbourn Type A S72-25 с 10 до 100 Вольт. Управляемая компьютером аналого-цифровая 16 битовая A/D плата выдавала сигнал выходного силового импульса с частотой в 100 Гц. Плата способна фиксировать изменения сигнала силового импульса до 0.0016 Н.

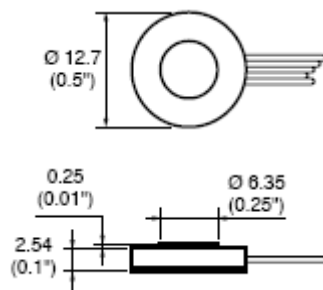


Рис. 1. Схема прибора Entran ELFS-B3

Первоначально фиксировался сигнал максимальной силы нажатия (МСН). Участники эксперимента нажимали на динамометрический датчик с наибольшей силой в течение трех последовательных 6 секундных испытаний. Промежуток между испытаниями 60 секунд. Полученные результаты были усреднены для оценки МСН каждого участника.

Далее участники нажимали с 5, 10, 20 и 40% уровнями МСН в течение двух последовательных 25 секундных испытаний. Волонтер должен был регулировать уровень силы нажатия таким образом, чтобы сигнал, представленный в виде желтой линии на мониторе, с максимальной точностью соответствовал красной линии, определяющей 5, 10, 20, 40% МСН. Более подробное описание эксперимента и регистрации экспериментальных данных представлено в работе [30].

Возрастные изменения динамики релаксационных процессов выходного силового импульса человека

На рис. 2 представлены усредненные значения кинетического параметра λ_1 , характеризующего вклад короткодействующих корреляций в динамике выходного силового импульса, для разных возрастных групп. Замкнутые линии в виде «шишечек» определяют область наибольшего скопления значений параметра λ_1 . Пунктирные линии, дополняющие замкнутые линии, отражают интервал разброса значений λ_1 . Отдельные от пунктирных линий точки отображают максимальные значения параметра λ_1 . Первые восемь областей соответствуют группе s1 (молодые люди): две попытки для 4 уровней МСН, следующие восемь соответствуют группе s2 (пожилые люди), и последние соответствуют третьей группе s3 (старые люди).

Средние значения параметра λ_1 для двух попыток группы s1: $\langle \lambda_1 \rangle = -0.0263 \tau^{-1}$, s2: $\langle \lambda_1 \rangle = -0.0149 \tau^{-1}$, s3: $\langle \lambda_1 \rangle = -0.0086 \tau^{-1}$. Таким образом, с возрастом уменьшается влияние вклада короткодействующих корреляций в динамике выходного силового импульса человека. Различие средних значений параметра λ_1 составляет: s1/s2 – 1,8 раз, s1/s3 – 3.05 раза, s2/s3 – 1.73 раза.

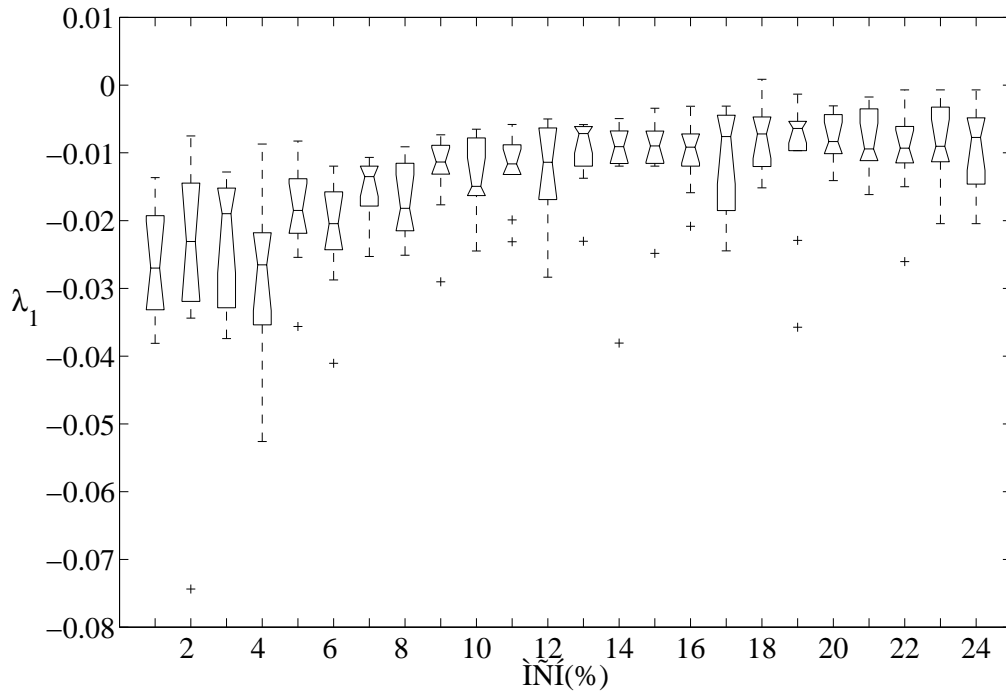


Рис. 2. Кинетический параметр λ_1 , характеризующий кратковременные корреляции для исследуемых физиологических сигналов. 24 области определяют усредненные значения параметра λ_1 для двух попыток при четырех уровнях МСН разных возрастных групп людей

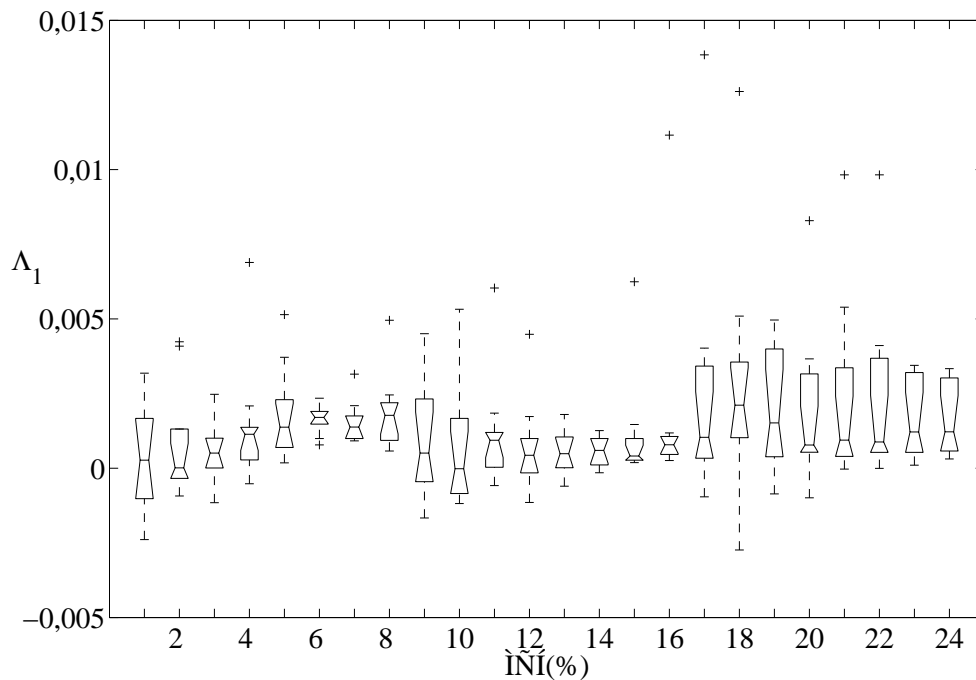


Рис. 3. Релаксационный параметр Λ_1 , связанный с дальнедействующими корреляциями в динамике выходного силового импульса для разных возрастных групп людей

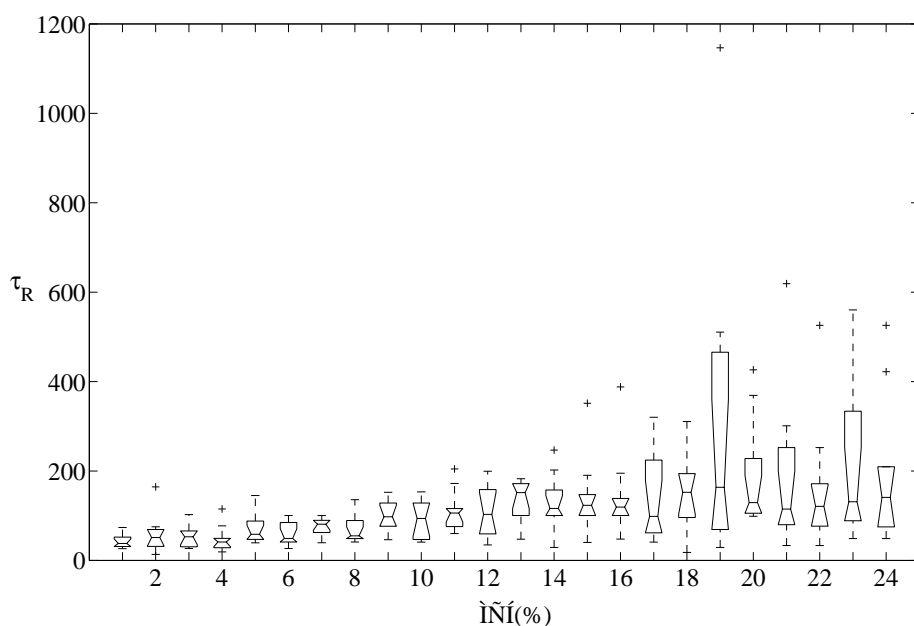


Рис. 4. Общее время релаксации τ_R для всех возрастных групп, измеренное в τ ($\tau = 0.01$ сек)

Релаксационный параметр Λ_1 , определяющий вклад далекодействующих корреляций, представлен на рис. 3. Для всех трех возрастных групп этот параметр остается примерно одинаковым. Таким образом, поведение далекодействующих корреляций в динамике выходного силового импульса человека фактически не изменяется с возрастом (средние значения Λ_1 для групп s1, s2 и s3 равны: $0.0012 \tau^{-2}$, $0.0009 \tau^{-2}$, $0.0021 \tau^{-2}$ соответственно). Разные уровни МСН приводят к незначительным изменениям значений параметра Λ_1 .

На рис. 4 представлено теоретическое время релаксации τ_R , вычисленное согласно формуле (7) и совпадающее с экспериментальным временем релаксации (см. уравнение 5). Для группы молодых людей среднее значение времени релаксации τ_R составляет 57.09τ , для пожилых и старых людей τ_R составляет 122.12τ , 236.79τ соответственно.

Сопоставляя изменения времен релаксации с возрастом, можно заметить, что времена релаксации соседних возрастных групп отличаются примерно в два раза. Таким образом, обнаруживаются отчетливые возрастные изменения в динамике релаксационных процессов выходного силового импульса человека.

Локальные особенности релаксационных процессов в функционировании нервно-мышечной системы человека

Для более детального анализа представленных физиологических серий воспользуемся процедурой локального построения кинетических и релаксационных параметров. Данная процедура оказывается удобной для выявления локальных закономерностей динамики релаксационных процессов выходного силового импульса человека.

На рис. 5 и 6 представлены временные зависимости локальных кинетического λ_1 и релаксационного Λ_1 параметров, усредненные для разных возрастных групп людей при уровне силы нажатия в 5% от МСН.

Как видно на рис. 5, интервал разброса значений локального кинетического параметра λ_1 для молодых людей более значительный, чем в случае пожилых и старых людей. В среднем для молодых людей параметр λ_1 изменяется на интервале $0.3870 \tau^{-1} < |\lambda_1| < 0.0394 \tau^{-1}$, для пожилых людей – $0.0077 \tau^{-1} < |\lambda_1| < 0.1082 \tau^{-1}$, для старых людей – $0.0314 \tau^{-1} < |\lambda_1| < 0.0585 \tau^{-1}$. Таким образом, динамика короткодействующих корреляций выходного силового импульса для каждой возрастной группы людей меняется в определенных пределах. С возрастом диапазон этих изменений уменьшается.

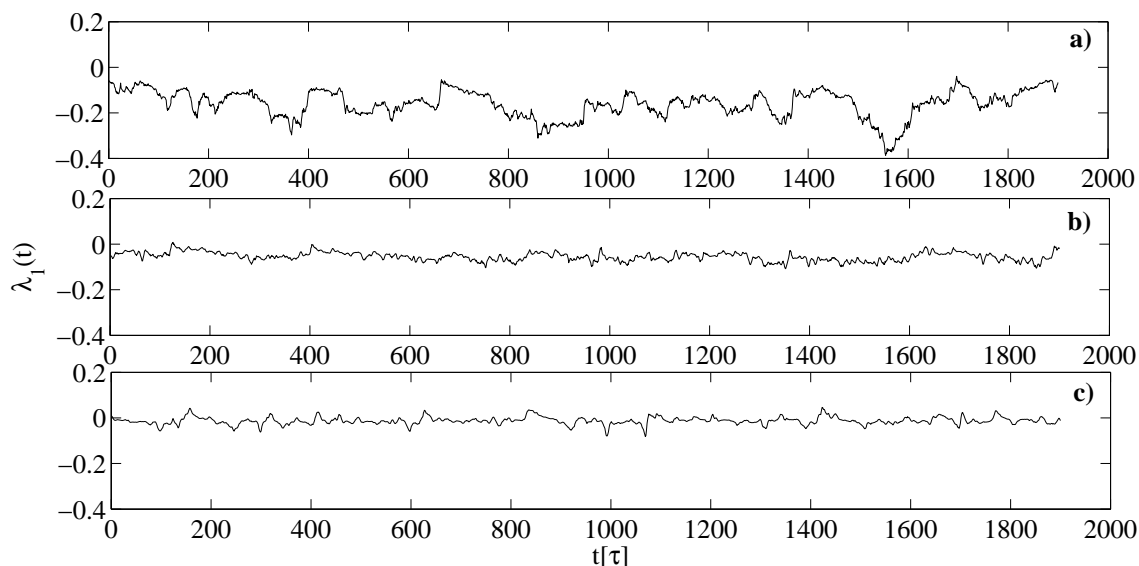


Рис. 5. Временная зависимость локального кинетического параметра λ_1 , усредненная для группы молодых (a), пожилых (b) и старых (c) людей при уровне силы нажатия 5% МСН

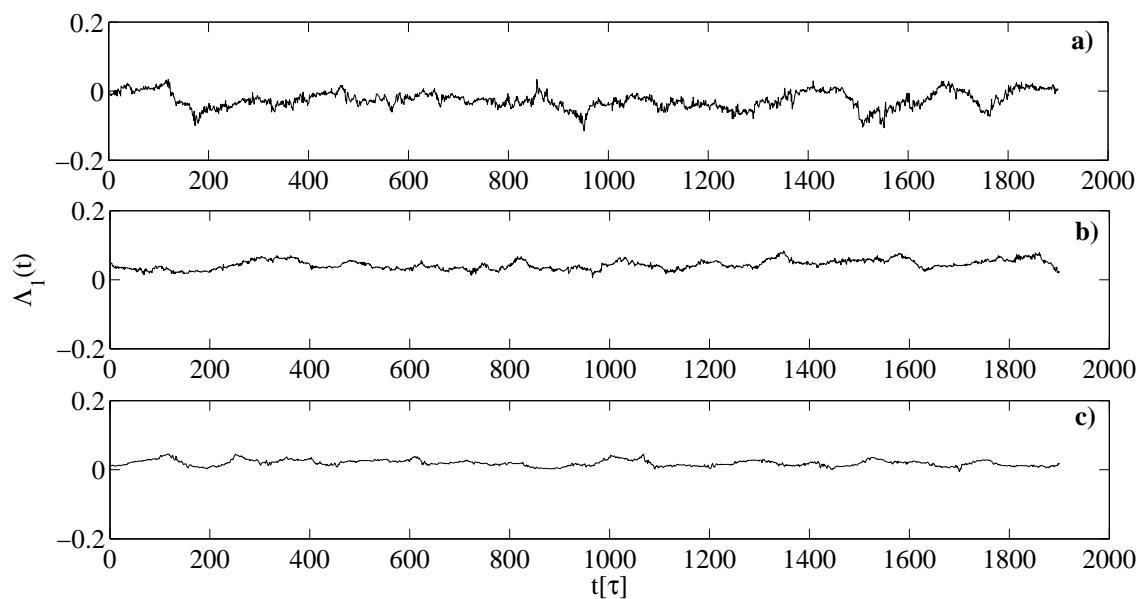


Рис. 6. Временная зависимость локального релаксационного Λ_1 параметра, усредненная для группы молодых (a), пожилых (b) и старых (c) людей с уровнем силы нажатия в 5% от МСН

В табл. 1 представлены среднеквадратичные амплитуды кинетического $A\{\lambda_1\}$ и релаксационного $A\{\Lambda_1\}$ параметров, вычисленные по формуле

$$\langle A \rangle = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

	5%		10%		20%		40%	
	$A\{\lambda_1\}$	$A\{\Lambda_1\}$	$A\{\lambda_1\}$	$A\{\Lambda_1\}$	$A\{\lambda_1\}$	$A\{\Lambda_1\}$	$A\{\lambda_1\}$	$A\{\Lambda_1\}$
s1	0.1704	0.0358	0.1222	0.0277	0.0885	0.0568	0.0657	0.0775
s2	0.0582	0.0453	0.0597	0.0329	0.0418	0.046	0.036	0.0492
s3	0.0194	0.02	0.0203	0.0236	0.0243	0.0232	0.0219	0.0237

Таблица 1. Среднеквадратичные амплитуды локализованных параметров λ_1 и Λ_1

Значения $A\{\lambda_1\}$, $A\{\Lambda_1\}$ свидетельствуют о возрастных изменениях кратко- и долговременных корреляций в релаксационных процессах нервно-мышечной системы человека. Сопоставление среднеквадратичных амплитуд для локальных кинетического λ_1 и релаксационного Λ_1 параметров позволяет выявить особенности динамики релаксационных процессов, как при старении, так и при разных уровнях МСН.

Заключение

Представленный в работе метод анализа релаксационных процессов в динамике выходного силового импульса человека позволяет определять уникальные особенности и закономерности функционирования нервно-мышечной системы человека при старении. Количественная оценка короткодействующих и далекодействующих корреляций в динамике силового импульса осуществляется при помощи кинетического λ_1 и релаксационного Λ_1 параметров. Выявлено уникальное влияние кратковременных корреляций релаксационных процессов в функционировании нервно-мышечной системе у молодых людей и значительное снижение этого вклада при старении. Общее время релаксации, вычисленное для одного из корреляционных приближений времен релаксации функций памяти первого и второго порядка, для молодых людей оказалось меньшим по сравнению с группами пожилых и старых людей. Использование процедур локализации позволило судить о динамике разномасштабных корреляционных вкладов в релаксационные процессы при старении.

Таким образом, обнаруженные корреляционные и релаксационные особенности динамики выходного силового импульса позволили эффективно оценивать возрастные изменения, возникающие в нервно-мышечной системе человека.

Представленный метод количественной оценки корреляций и особенностей релаксационных процессов в дискретной временной эволюции живых систем был апробирован ранее при анализе скорости релаксационных процессов вариабельности сердечного ритма [31, 32]; при исследовании временных серий МЭГ здоровых людей и пациентов с эпилепсией [32]; при анализе динамических особенностей эпидемических процессов гриппа и ОРЗ [32].

Настоящая работа поддержана фондами: грант Федерального агентства по образованию Министерства образования и науки РФ № РНП.2.1.1.741, грант РФФИ № 08-02-00123-а.

Литература

1. Costa M., Goldberger A.L., Peng C.-K. Broken Asymmetry of the Human Heartbeat: Loss of Time Irreversibility in Aging and Disease // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95. – P. 198102.
2. Hausdorff J.M., Mitchell S.L., Firtion R. et al. Altered fractal dynamics of gait: reduced stride interval correlations with aging and Huntington's disease // *Journal of Applied Physiology*. – 1997. – Vol. 82. – P. 262–269.
3. Goldberger A.L., Amaral L.A.N., Hausdorff J.M. et al. Fractal dynamics in physiology: Alteration with disease and aging // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2002. – Vol. 99. – P. 2466–2472.
4. Hausdorff J.M., Edelberg H.K., Mitchell S.L. et al. Increased gait instability in community dwelling elderly fallers // *Archives of physical medicine and rehabilitation*. – 1997. – Vol. 78. – P. 278–283.
5. Hausdorff J.M., Purdon P., Peng C.-K. et al. Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations // *Journal of Applied Physiology*. – 1996. – Vol. 80. – P. 1448–1457.
6. Hausdorff J.M., Zeman L., Peng C.-K. et al. Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children // *Journal of Applied Physiology*. – 1999. – Vol. 86. – P. 1040–1047.
7. Hausdorff J.M., Peng C.-K., Ladin Z. et al. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait // *Journal of Applied Physiology*. – 1995. – Vol. 78. – P. 349–358.
8. Buzzi U.H., Stergiou N., Kurz M. et al. Nonlinear dynamics indicates aging effects variability during gait // *Clinical Biomechanics*. – 2003. – Vol. 18 – № 5. – P. 435–443.
9. Lipsitz L.A., Goldberger A.L. Loss of 'complexity' and aging: potential applications of fractals and chaos theory to senescence // *JAMA* – 1992. – Vol. 267. – P. 1806–9.
10. Kaplan D.T., Furman M.I., Pincus S.M., Ryan S.M., Lipsitz L.A., Goldberger A.L. Aging and the complexity of cardiovascular dynamics // *Biophysical Journal*. – 1991. – Vol. 59. – P. 945–9.
11. Hausdorff J.M., Mitchell S.L., Firtion R., Peng C.-K., Cudkowicz M.E., Wei J.Y., Goldberger A.L. Altered fractal dynamics of gait: reduced stride interval correlations with aging and Huntington's disease // *Journal of Applied Physiology* – 1997. – Vol. 82. – P. 262–9.
12. Keil A., Elbert T., Rockstroh B., Ray W.J. Dynamical aspects of motor and perceptual processes in schizophrenic patients and healthy controls // *Schizophr Res*. – 1998. – Vol. 33. – P. 169–78.
13. Vaillancourt D.E., Newell K.M. Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease // *Neurobiology of Aging*. – 2002. – Vol. 23. – P. 1–11.
14. Pincus S.M., Goldberger A.L. Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? // *American Journal Physiology*. – 1994. – Vol. 266. – P. 1643–1656.
15. Kaplan D.T., Furman M.I., Pincus S.M., Ryan S.M., Lipsitz L.A., Goldberger A.L. Aging and the complexity of cardiovascular dynamics // *Biophysical Journal*. – 1991. – Vol. 59. – P. 945–9.
16. Vaillancourt D.E., Larsson L., Newell K.M. Effects of aging on force variability, single motor unit discharge patterns, and the structure of 10, 20, and 40 Hz EMG activity // *Neurobiology of Aging*. – 2003. – Vol. 24. – P. 25–35.
17. Vaillancourt D.E. Regularity of force tremor in Parkinson's disease // *Clinical Neurophysiology*. – 2001. – Vol. 112. – P. 1594–1603.

18. Dingwell J.B., Cusumano J.P. Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* – 2000. – Vol. 10. – № 4. – P. 848-863.
19. West B.J. Nicola Scafetta Nonlinear dynamical model of human gait // *Physical Review E*. – 2003. – Vol. 67. – P. 051917.
20. Zwanzig R. Ensemble method in the theory of irreversibility // *Journal of Chemical Physics*. – 1960. – Vol. 3. – P. 106–141.
21. Zwanzig R. Memory effects in irreversible thermodynamics // *Physical Review*. – 1961. – Vol. 124. – P. 983–992.
22. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике / Н.Н. Боголюбов. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946.-120 с.
23. Mori H. Transport, collective motion and Brownian motion // *Progress of Theoretical Physics*. – 1965. – Vol. 33. – P. 423–455.
24. Mori H. A continued fraction representation of the time correlation functions // *Progress of Theoretical Physics* – 1965. – Vol. 34. – P. 399–416.
25. Yulmetyev R., Hänggi P., Gafarov F. Stochastic dynamics of time correlation in complex systems with discrete time // *Physical Review E*. – 2000 – Vol. 62. – P. 6178.
26. Yulmetyev R., Hänggi P., Gafarov F. Quantification of heart rate variability by discrete nonstationary non-Markov stochastic processes // *Physical Review E*. – 2002. – Vol. 65 – P. 046107.
27. Yulmetyev R.M. Time-scale invariance of relaxation processes of density fluctuation in slow neutron scattering in liquid cesium // *Physical Review E*. – 2001. – Vol. 64. – P. 057101.
28. Yulmetyev R.M. Dynamic structure factor in liquid cesium on the basis of time-scale invariance of relaxation processes // *JETP Letters*. – 2002. – Vol. 76. – P. 147.
29. Yulmetyev R.M. New evidence for the idea of timescale invariance of relaxation processes in simple liquids: the case of molten sodium // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2003. – Vol. 15. – P. 2235–2257.
30. Valliancourt D.E. Aging and time and frequency structure of force output variability // *Journal of Applied Physiology*. – 2003. – Vol. 94. – P. 903–912.
31. Yulmetyev R.M., Demin S.A., Panishev O.Y., P. Hänggi. Age-related alterations of relaxation processes and non-Markov effects in stochastic dynamics of R–R intervals variability from human ECGs // *Physica A* – 2005. – Vol. 353. – P. 336–352.
32. Юльметьев Р.М., Дёмин С.А., Панищев О.Ю., Хусаенова Э.В. Локальные особенности стохастической динамики живых систем // *Технологии живых систем*. – 2007. – Том 4. – №2 – P. 32–44.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ДИНАМИКИ ОКСИГЕНАЦИИ КРОВЕНАПОЛНЕННЫХ ТКАНЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Д.В. Мокрова (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)
Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Е.Т. Аксенов
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)**

В работе приводятся результаты исследования тенденции динамики оксигенации тканей кожного покрова человека под воздействием лазерного излучения. Измеряемой величиной является изменение сатурации SaO_2 крови в приповерхностной области кожи при воздействии когерентного света в диапазоне длин волн от 440 нм до 655 нм, дискретно перекрывающего практически всю область поглощения оксигемоглобина крови в видимом диапазоне длин волн. Мощность излучения менялась от 1 мВт до 2 Вт.

Введение

В настоящее время лазеры широко применяются в клинической практике в различных областях современной медицины. Особое место занимает использование биостимулирующего и терапевтического воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения при лечении широкого спектра заболеваний, например, лазерная терапия кожных заболеваний (язв, ран, ожогов, пролежней и анаэробных инфекций). Несмотря на то, что накоплен большой объем экспериментальных данных, преобладающий механизм биологического действия лазерного излучения до сих пор не установлен, и, соответственно, не решен ключевой вопрос лазерной терапии – определение оптимальной дозы воздействия.

В общем случае энергия светового потока, падающего на биологическую ткань, может, в зависимости от характера поглощения, преобразовываться в тепло, стимулировать фотохимические реакции, флуоресценцию, акустические волны.

Кроме того, необходимо выделить в этом ряду механизмы параметрических резонансов в биосистеме, возникающих при воздействии световых волн, особенно модулированных по частоте и амплитуде, а также импульсно-модулированных. Известно, что многоатомные биологические молекулы и клеточные системы, связанные упругими связями, имеют достаточно широкие колебательные спектры. Раскачивание связей может приводить к их разрыву или образованию новых, что с точки зрения биологических результатов трудно поддается изучению и интерпретации.

В каждом конкретном случае характер преобразования световой энергии в значительной мере определяется теми хромофорами и фотоакцепторами, которые преобладают в данной биоткани.

С точки зрения методов неинвазивной лазерной терапии и биостимуляции под воздействием низкоинтенсивного когерентного лазерного излучения (НИЛИ) с мощностью светового потока на выходе лазера от единиц милливатт (мВт) до нескольких десятков милливатт и варьируемой плотностью мощности ($\text{мВт}/\text{см}^2$), в первую очередь, вызывает интерес кожный покров тела человека и, соответственно, оптические свойства хромофоров биологических структур, составляющих эту ткань.

Выполнявшиеся ранее и проводящиеся в настоящее время исследования по изучению реакции на когерентное, монохроматическое лазерное излучение отдельных компонентов кожи, а также кожи как целостной биологической структуры, например [1, 2, 6], показывают явно выраженную зависимость оптико-физических, оптико-механических и биохимических параметров исследованных объектов от параметров светового излучения: плотности мощности, длины волны и длительности облучения – дозы. При этом, в том числе, выявлено стимулирующее влияние светового воздействия до некоторой (оптимальной) дозы и подавление стимуляции при ее превышении.

Ввиду того, что с точки зрения поглощения и преобразования световой энергии кожный покров тела человека – кровенаполненная биологическая ткань – является достаточно сложным объектом, позволяющим реализовываться различным вариантам фотохимических и фотофизических процессов, выявление преобладающего механизма биологического воздействия крайне затруднительно и требует поэтапного изучения.

Одним из возможных и наблюдаемым механизмом преобразования световой энергии является оксигенация гемоглобина крови в кожном покрове человека при воздействии на нее НИЛИ [3, 6].

Цель работы

В большинстве работ по исследованию динамики оксигенации крови используются лазерные источники излучения с длинами волн в диапазоне 600–800 нм. Однако спектр поглощения гемоглобина крови достаточно широк (рис. 1). В связи с этим практический интерес представляет оценка изменения оксигенации крови в капиллярном русле как в различных областях спектрального диапазона поглощения оксигемоглобина, так и при различных уровнях плотности мощности светового излучения.

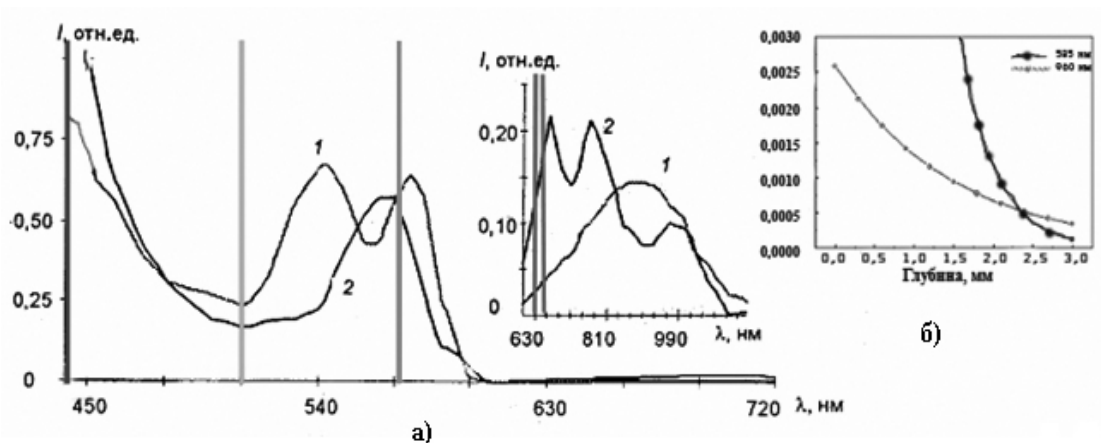


Рис. 1. а) Типичные спектры поглощения оксигемоглобина (1) и дезоксигемоглобина (2) крови кровеносных сосудов. б) Эффективность поглощения лазерного излучения оксигемоглобином в максимумах полос поглощения (585 нм) и (960 нм) на различной глубине кожи

С этой целью в работе был использован ряд лазеров в следующих диапазонах длин волн и мощностей:

- He-Ne лазер ($\lambda=632,8$ нм) ЛГ 207 А – мощность 1 мВт;
- He-Ne лазер ($\lambda=632,8$ нм) ЛГ 219 «Diana» – мощность 5 мВт;
- п/п лазер с длиной волны ($\lambda=655$ нм) HLDPM12-655-25 – мощность до 25 мВт;
- He-Cd лазер ($\lambda=440$ нм) ЛПМ – 11 – мощность 2 мВт;
- лазер на парах меди, оригинальной разработки к.ф.-м.н. Ю.М. Мокрушина, ($\lambda_1=510,6$ нм и $\lambda_2=578,2$ нм) – мощность 2 и 1 Вт соответственно.

При проведении экспериментальных исследований за основу была принята методика измерений, предложенная в работах [3–5]. Суть методики состоит в регистрации изменения степени оксигенации крови под действием НИЛИ методом пульсоксиметрии. Схема эксперимента представлена на рис. 2. Для измерений использовался пульсоксиметр 4700 OxiCap Datex Ohmeda (частота измерения до 5 Гц).

В рамках выбранной методики измерений регистрируемой величиной является сатурация SaO_2 в капиллярных и малых сосудах приповерхностной области кожного покрова. В связи с этим динамика изменения SaO_2 позволяет проводить оценку тенденции

динамики оксигенации тканей в области светового облучения, однако количественная оценка связи динамики SaO_2 с динамикой оксигенации тканей достаточно сложна.

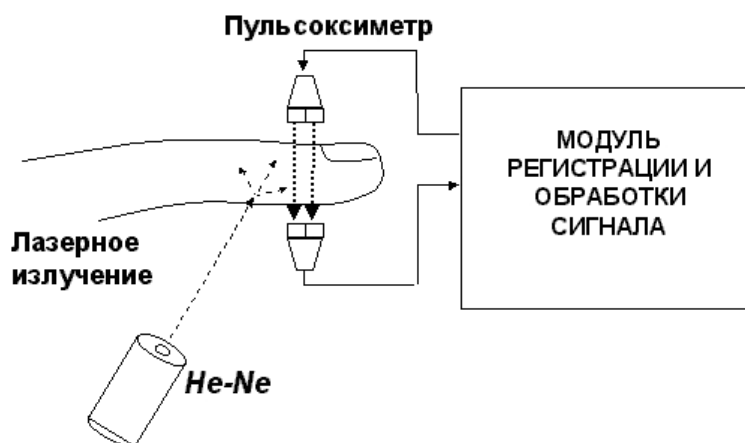


Рис. 2. Схема эксперимента

Для определения того, насколько адекватно выбранная система регистрации отражает состояние локальной циркуляции крови, была проведена серия измерений динамики оксигенации крови в капиллярном русле верхней фаланги пальца руки при следующих условиях:

- без воздействия внешних факторов, при этом состояние окружающей среды (в основном температура) сохранялось одинаковым при выполнении всех последующих измерений;
- при окклюзии артерии, достигавшейся пережатием руки резиновым жгутом в области предплечья;
- при понижении температуры кожного покрова.

В ходе этих экспериментов показания пульсоксиметра соответствовали ожидаемой зависимости степени оксигенации крови от температуры и кровенаполненности ткани, поэтому можно утверждать, что выбранная схема регистрации работала достоверно. При этом естественный уровень оксигенации менялся во времени, наблюдались нерегулярные колебания в пределах 1% от уровня 98%, соответствовавшего норме, что обусловлено пространственно-временными изменениями циркуляции крови.

Результаты измерений

Проводилось исследование динамики оксигенации крови в зависимости от мощности и длины волны лазерного излучения [7, 8].

Результаты этих исследований состоят в следующем.

1. В случае He-Ne лазера ($\lambda=632,8$ нм) ЛГ 207 А – мощностью 1мВт, плотность мощности $0,1$ Вт/см² наблюдалось снижение уровня оксигенации крови через 40 секунд после начала облучения (рис. 3, а).

Как известно, до 20–30% светового потока, падающего на кожу, отражается (френелевское отражение и обратное рассеяние) от нее, кроме того, около 30% света отражается от поверхности крови, насыщенной кислородом. Такие световые потери могут оказать существенное влияние на динамику оксигенации, особенно при малых интенсивностях irradiирующего светового потока. В связи с этим представляло интерес провести оптическое просветление кожного покрова в области облучения. Оптическое просветление проводилось по методике, предложенной в работе [9], и достигалось нанесением на поверхность кожи 4-х слоев биологически нейтрального раствора глице-

рина с водой через 15 минут каждый последующий. Применение методики оптического просветления позволяет получать явное уменьшение степени оксигенации крови по сравнению с опытом без просветления (рис. 3, б).

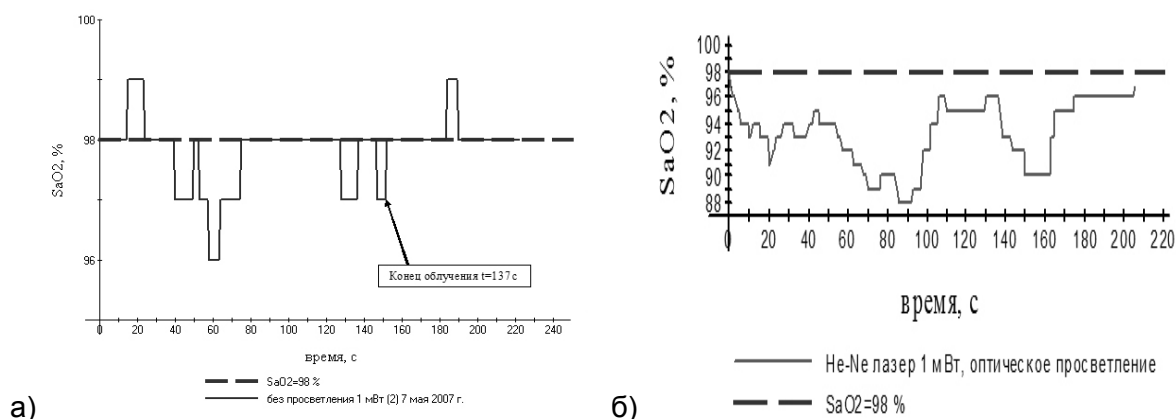


Рис. 3. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при облучении поверхности кожи He-Ne лазером, P=1мВт: а) без просветления, б) с предварительным оптическим просветлением

2. При воздействии на поверхность кожи излучением He-Ne лазера ($\lambda=632,8$ нм), ЛГ 219 «Diana» мощностью 5 мВт ($\Pi=0,28$ Вт/см²), через 40 секунд после начала облучения наблюдается увеличение степени оксигенации на 1%, но через 30 секунд она восстанавливается. (рис. 4). После оптического просветления кожи реакция наблюдалась через 10 секунд после начала облучения (рис. 4).

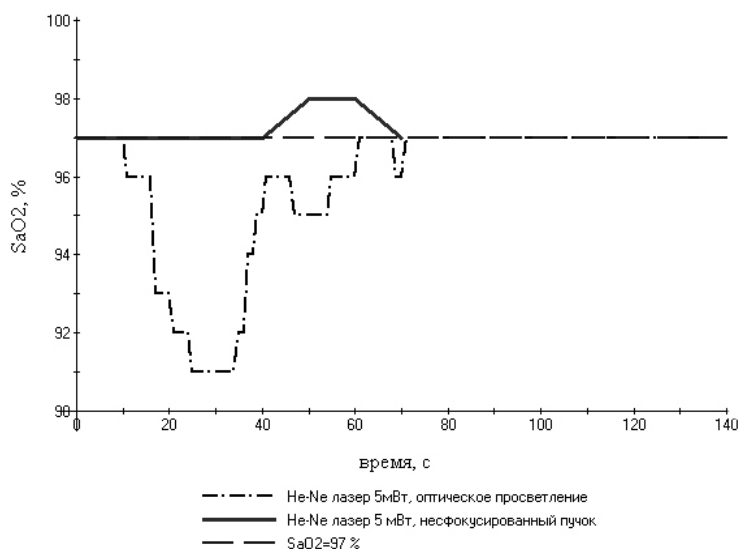


Рис. 4. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при облучении поверхности кожи He-Ne лазером, P=5мВт в параллельном пучке до оптического просветления и после

3. При облучении поверхности кожи светом п/п лазера с длиной волны $\lambda=655$ нм, HLDPM12-655-25 – мощность до 25 мВт ($\Pi=0,28$ Вт/см²), наблюдалось понижение степени оксигенации крови через 15–20 секунд после начала облучения (рис. 5).

Полученные результаты позволяют предположить, что регистрируемые изменения оксигенации связаны в большей степени с компенсационными процессами, стимулированными разогревом тканей, а не с процессами фотодиссоциации оксигемоглобина.

Подтверждением этого могут служить результаты комбинированного воздействия на сосуды руки испытуемого, состоявшего в сочетании облучения кожи п/п лазером, мощностью 20 мВт, и артериальной окклюзии (рис. 6).

Видно, что восстановление нормальной степени оксигенации при облучении светом ($\lambda=655$ нм, $P_{\text{изл}}=20$ мВт) происходит на 30% быстрее, чем без облучения. Таким образом, можно предположить, что процессы освобождения кислорода, содержащегося в заглубленных относительно поверхности тканях, стимулируется подводимым световым потоком. При этом, скорее всего, преобладающим механизмом является нагрев тканей, приводящий к усилению кровотока.

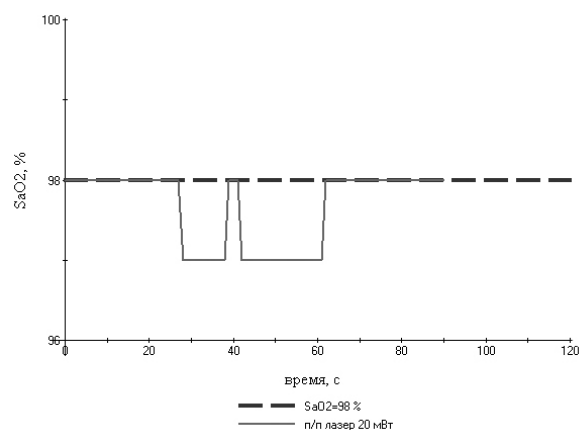


Рис. 5. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при облучении поверхности кожи п/п лазером ($\lambda=655$ нм), $P=20$ мВт

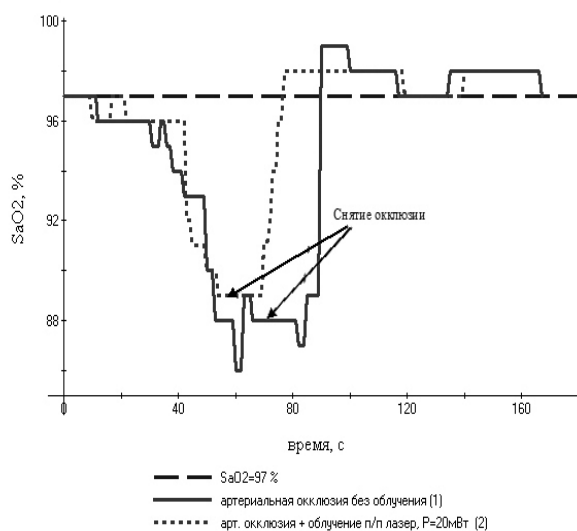


Рис. 6. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при артериальной окклюзии при одновременном облучении поверхности кожи п/п лазером, $P=20$ мВт (2) и без него (1)

4. При воздействии на поверхность кожи излучением He-Cd лазера, ЛПМ – 11 ($\lambda=440$ нм) – мощность 2 мВт ($\Pi=0,11$ Вт/см²), снижение степени оксигенации начинается через 5 секунд (рис. 7), в отличие от 15 секунд в случае облучения светом с $\lambda=632,8$ нм и мощностью 1 мВт, что связано с большим значением квантового выхода (0,4) по сравнению с квантовым выходом (0,1) на $\lambda=632,8$ нм.

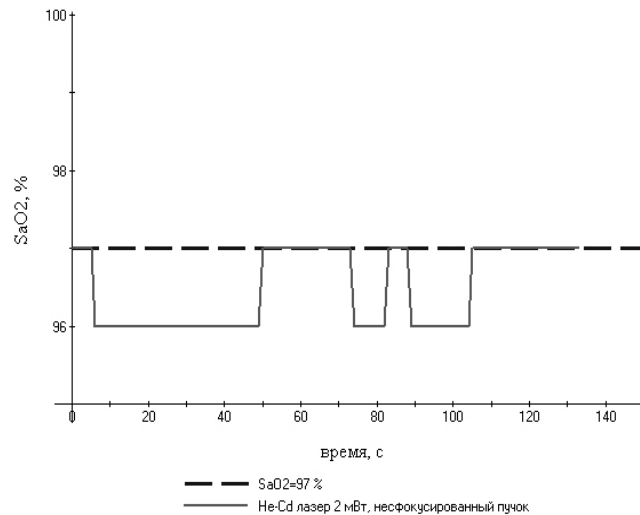


Рис. 7. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при облучении поверхности кожи He-Cd лазером, P=2мВт в нефокусированном пучке

5. Как следует из спектральных зависимостей поглощения света оксигемоглобином крови (рис. 1), существенное поглощение наблюдается в зеленом и желтом диапазоне длин световых волн. В соответствии с этим представляют интерес исследования динамики степени оксигенации в капиллярном русле кожи человека под воздействием света этих длин волн. В данной работе были проведены эксперименты с использованием излучения лазера на парах меди мощностью 3 Вт. Лазер на парах меди излучает одновременно световой поток на двух длинах волн – зеленой ($\lambda=510,6$ нм, P=2 Вт) и желтой ($\lambda=578,2$ нм, P=1 Вт). Режим работы лазера импульсный, частота 15 кГц. Диаметр светового пучка 10мм.

Результаты экспериментов с использованием зеленой и желтой линий лазера на парах меди (мощность порядка 1 Вт) показали, что облучение желтым светом приводит к реакции, схожей с эффектом от воздействия He-Ne и п/п лазеров. Интересный эффект наблюдается при облучении кожи зеленой линией лазера на парах меди мощностью 1 Вт: через 30 секунд после начала воздействия степень оксигенации возрастает на 2% и колеблется с периодичностью около 30 секунд в этом диапазоне (рис. 8, а).

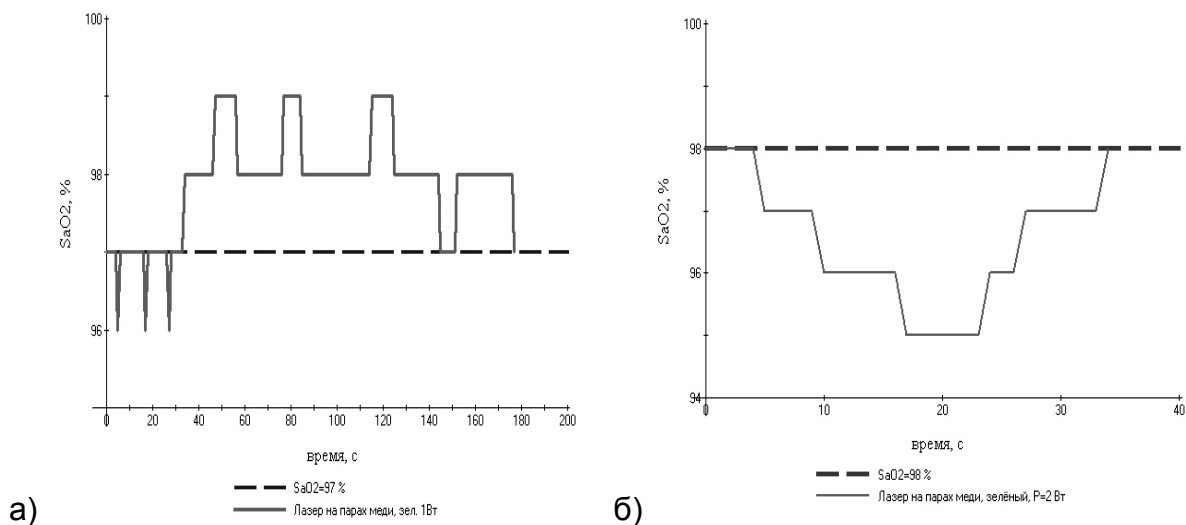


Рис. 8. Динамика степени оксигенации в капиллярном русле кожи руки при облучении поверхности кожи лазером на парах меди: а) зеленая часть спектра, P=1Вт; б) зеленая часть спектра, P=2Вт

Реакцию организма на облучение мощностью 2 Вт (рис. 8, б) можно объяснить активацией защитного механизма на возникновение болевого эффекта, но в целом адекватное объяснение происходящим процессам может быть получено при проведении дополнительных экспериментов, сопровождающихся биохимическим экспресс-анализом крови и повторным анализом через 1–2 часа для выяснения характера последствий [10].

Вторым механизмом преобразования световой энергии в кожном покрове, существующим наряду с процессом оксигенации, является преобразование в тепло, при этом лазерное излучение может приводить к существенной неоднородности температурного градиента в тканях, особенно на уровне одной клетки или ее органелл. Это, в свою очередь, может влиять на скорости биохимических реакций, приводить к деформации клеточных мембран, изменению их электропотенциала и т.д. Все эти процессы могут служить основой для интерпретации природы лечебного или биостимулирующего эффекта при воздействии на организм НИЛИ. В рамках теплового механизма преобразования световой энергии в биоткани можно объяснить изменения в процессах микроциркуляции крови. В работе [11] достаточно подробно рассматривается возможный механизм, приводящий к улучшению микроциркуляции.

Вопросы исследования и моделирования тепловых процессов при взаимодействии непрерывного и импульсного лазерного излучения с многослойной биотканью постоянно находятся в поле зрения исследователей [12–15]. В частности, в работе [14] рассматриваются физическая и расчетная модели лазерного блокирования кровотока. В основу методики положен наблюдаемый эффект сжатия (сужения) оболочки кровеносного сосуда при ее нагреве до некоторой критической температуры, что, скорее всего, является следствием термической денатурации внутренних оболочек сосуда. Проведенные в [15] измерения показывают, что пороговая температура сжатия (схлопывания) сосудов при длительности нагрева в несколько секунд составила 90°C , что хорошо соотносится с расчетным значением.

Результаты данной работы: ход изменения оксигенации тканей при облучении кожи излучением He-Ne лазера мощностью 5 мВт в течение 20 секунд и излучением светом с длиной волны 510,6 нм и мощностью 2 Вт (до достижения болевого порога) можно, в связи со сказанным, интерпретировать в первом случае как локальное усиление кровотока, компенсирующего нагрев тканей, а во втором случае – как спазмирование сосудов в зоне облучения, не сопровождающееся коагуляцией.

Обсуждение

Выполненный в данной работе комплекс измерений по определению динамики степени оксигенации биотканей пальцев руки при воздействии на поверхность кожного покрова лазерным излучением разных длин волн, лежащих в полосе поглощения HbO_2 крови человека, и разных уровней мощности и плотности мощности, позволяет сделать ряд выводов.

Лазерное облучение мощностью до 2 мВт на длинах волн 632,8 нм, 440 нм не вызывает изменения SaO_2 , отличающегося по величине от естественного. Однако наблюдаются некоторые отличия: регистрируются изменения SaO_2 как в большую, так и в меньшую сторону относительно среднего значения; но эти изменения носят кратковременный характер и могут быть связаны с иными механизмами реакции биоткани на световое воздействие.

Оптическое просветление кожи пальцев руки в области воздействия лазерным излучением для этих же уровней мощности приводит к заметному (порядка 4%) изменению степени оксигенации в капиллярном русле в процессе облучения. Такой же эффект

наблюдается и при воздействии лазерным излучением мощностью 5 мВт ($\lambda=632,8$ нм). Необходимо отметить, что во всех случаях изменение SaO_2 достигает максимального значения за время от 30 до 60 секунд от начала облучения. После достижения минимального значения SaO_2 , при продолжающемся облучении, значение SaO_2 возвращается к нормальному уровню примерно за такое же время. Такая динамика изменения SaO_2 в случае просветления кожи позволяет предположить, что в этом случае применение НИЛИ дает значительный физиологический эффект, однако время эффекта ограничено временами диффузии просветляющего реагента, и, если для получения терапевтического эффекта требуется большее время сохранения экстремального значения SaO_2 , то необходимо повторять просветление или подбирать просветляющее вещество с большим временем диффузии.

Увеличение мощности светового потока до 2 Вт приводит к заметному уменьшению сатурации (на 4%) относительно естественного уровня. Наблюдавшаяся динамика SaO_2 определяется разогревом тканей, приводящим к блокированию кровотока, при этом ожидаемое увеличение кровотока, компенсирующее разогрев тканей, оказывается недостаточным. Надо отметить, что периодичность излучения лазера на парах меди (частота 15 кГц) оказывает влияние на рассматриваемые процессы, однако выяснение особенностей этого механизма требует дальнейших исследований.

Полученные в работе результаты отражают динамику изменения SaO_2 , однако освобождаемый при фотодиссоциации оксигемоглобина кислород не полностью поглощается тканями, а частично рекомбинирует с гемоглобином крови и переносится плазмой крови. Следовательно, выяснение реальной динамики оксигенации тканей при облучении когерентным светом требует, в том числе, расширения набора измеряемых параметров, в частности: скорости микроциркуляции крови; динамики изменения SaO_2 в центре области воздействия, а не только на периферии; динамики спектра отраженного от области облучения белого света. Такое многопараметрическое исследование динамики SaO_2 под воздействием НИЛИ позволит получить более детальное представление о происходящих в биоткани процессах. Все оптико-физические измерения необходимо сопровождать биохимическим анализом крови, как экспресс-анализом, так и пролонгированным, для обнаружения возможного последствия НИЛИ. Однако, несмотря на то, что примененная в данной работе методика измерений не является исчерпывающей, полученные результаты позволяют утверждать о наличии достаточно выраженного влияния как НИЛИ, так и лазерного излучения средней (20 мВт) и большой мощности на динамику сатурации кислорода в капиллярном русле кожного покрова человека. При этом характер изменения SaO_2 зависит от параметров света при непосредственном воздействии излучения лазера на кожу и может заметно варьироваться при комбинированном воздействии: просветление кожи совместно со световым облучением.

Литература

1. Кару Т.Й. и др. Изменение спектра поглощения монослоя живых клеток после низкоинтенсивного лазерного облучения // ДАН – 1998. – Т. 360. – № 2. – С. 267–270.
2. Karu T.I Photobiological fundamentals of low-level laser therapy // IEEE J. Quant. Electr. – 1987. – V. QE-23 – P. 1703–1717.
3. Асимов М.М., Асимов Р.М., Рубинов А.Н. Спектр действия лазерного излучения на гемоглобин кровеносных сосудов кожи // Журнал прикладной спектроскопии – 1998. – Т. 65. – № 6. – С. 877–880.
4. Асимов М.М., Асимов Р.М., Рубинов А.Н., Мамилов С.А., Плаксий Ю.С. Влияние температуры на квантовый выход лазерно-индуцированной фотодиссоциации оксигемоглобина in vivo // Журнал прикладной спектроскопии – 2006. – Т. 73. – № 1. – С. 90–93.

5. Асимов М.М., Асимов Р.М., Рубинов А.Н., Мамилов С.А., Плаксий Ю.С. Стимулирование аэробного метаболизма клеток низкоинтенсивным лазерным излучением // Лазерная медицина. – 2007. – Т. 11. – Вып. 2. – С. 53.
6. Стратонников А.А., Лощенков В.Б., Дуплик А.Ю., Конов В.И. Контроль за степенью оксигенации гемоглобина в тканях крови при фотодинамической терапии // Рос. хим. журнал. – 1998. – Т. 52. – №5 – С. 63–67.
7. Мокрова Д.В. Динамика оксигенации тканей под воздействием лазерного излучения в полосе поглощения гемоглобина // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона. Материалы конференций политехнического симпозиума 2007 года – СПб: Изд. Политехнического ун-та, 2007. –124 с.
8. Мокрова Д.В. Исследование влияния неинвазивного лазерного облучения крови капиллярного русла на динамику оксигенации тканей // Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» 10 – 12 октября 2007 года. – СПб: Изд. Политехнического ун-та, 2007. – С. 186–188.
9. Проскурин С.Г., Ванг Р.К. Визуализация подкожных кровеносных сосудов человека посредством увеличения глубины когерентного зондирования // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 12. – С. 1157–1162.
10. Кару Т.Й., Календо Г.С., Летохов В.С. Действие низкоинтенсивного видимого излучения медного лазера на культуру клеток HeLa // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – № 1. – Т. 141–144.
11. Клебанов Г.И. Низкоинтенсивное лазерное облучение вызывает priming лейкоцитов // Использование лазеров для диагностики и лечения заболеваний. – М.: Изд-во ЛАС, 1996. – С. 11–14.
12. Щербаков Ю.Н., Якунин А.Н., Ярославский И.В., Тучин В.В. Моделирование тепловых процессов при взаимодействии некоагулирующего лазерного излучения с многослойной биотканью. ч. 1. Теория и модель расчета // Оптика и спектроскопия. – 1994. – Т. 76. – № 5. – С. 845–850.
13. Щербаков Ю.Н., Якунин А.Н., Ярославский И.В., Тучин В.В. Моделирование тепловых процессов при взаимодействии некоагулирующего лазерного излучения с многослойной биотканью. Ч. 2. Численные результаты // Оптика и спектроскопия. – 1994. – Т. 76. – № 5. – С.851–857.
14. Желтов Г.И., Астафьева Л.Г., Карстен А. Лазерное блокирование кровотока: физическая модель. 1. Прямоугольные импульсы излучения // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 102. – № 3. – С. 518–523.
15. Желтов Г.И., Астафьева Л.Г., Карстен А. Лазерное блокирование кровотока: физическая модель. 2. Режим импульсной модуляции излучения // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 102. – № 3. – С. 524–526.

ПЕПТИДНЫЕ ЭКСТРАКТЫ ИЗ ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ПЕРВИЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ *IN VIVO* НА МЫШИНОЙ МОДЕЛИ РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

И.И. Тепкеева, Ю.В. Кесслер (Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН)

Научный руководитель – д.х.н., в.н.с. В.П. Демушкин (Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН)

Выделены пептидные экстракты из ряда лекарственных растений. Изучен аминокислотный состав и проведен анализ компонентов пептидных экстрактов с помощью метода ионообменной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Изучено противоопухолевое действие экстрактов на мышиную модель рака молочной железы. Установлено, что пептидные экстракты зверобоя и смеси растительного сырья – РЕ-РМ и РЕ-Нр при локальной однократной инъекции обладают выраженной противоопухолевой активностью.

Введение

Рак молочной железы (далее РМЖ) – одно из самых распространенных опухолевых заболеваний у женщин [1, 2]. Механизмы этиологии и патогенеза этого заболевания включают большое количество молекулярных процессов, поэтому для лечения РМЖ наиболее перспективны препараты сочетанного действия, в частности препараты из растительного сырья [3, 4]. Недавно открытые противоопухолевые свойства растительных циклотидов [5–7] послужили предпосылкой к поиску других пептидов растений, обладающих аналогичным эффектом. Нами на основании анализа опубликованной информации о растениях, которые в народной медицине применяются как противоопухолевые [8, 9], в качестве источника пептидного материала выбрано растительное сырье, производимое на территории РФ и разрешенное фармакопеей РФ для использования в качестве лекарственных препаратов.

Целью исследования явилось получение пептидных экстрактов из лекарственного растительного сырья; анализ аминокислотного состава пептидных экстрактов и компонентов методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и изучение противоопухолевого действия экстрактов *in vivo* на трансплантируемой мышиную модель рака молочной железы.

Материалы и методы

Методика экстракции пептидного материала. Для получения пептидных экстрактов использовали ранее опубликованную нами методику экстракции пептидного материала, свободного от аминокислот, белков и высокомолекулярных пептидов [10]. Сухое растительное сырье (100 г) растирали в фарфоровой ступке, замачивали в 500–600 мл 1 М уксусной кислоты (ХИММЕД, «хч»), выдерживали 1 час при комнатной температуре. Суспензию 3–5 раз через 10 мин подвергали ультразвуковому воздействию (ультразвуковая баня фирма Elma, серия LC T 890/Н). Суспензию нагревали на бане при 100°C в течение 30 мин. Смесь охлаждали и центрифугировали в стаканах емкостью 250 мл на центрифуге Beckman Model J 2-21 (ротор 14000 RPM, ser E3628) 40 мин при 75000 g. К супернатанту добавляли ацетон (ХИММЕД, «осч 9-5») в объемном соотношении 2:5 и оставляли на ночь в холодильнике при +4°C. Выпавший осадок отделяли центрифугированием в стаканах емкостью 50 мл (ротор 17000 RPM, ser E21759) в течение 40 мин при 40000 g, растворяли в 0,1 М уксусной кислоте и центрифугировали 20 мин при 40000 g. Полученный супернатант лиофилизировали дважды, растворяя сухой остаток в 20–50 мл воды. Выход пептидного материала 120–180 мг.

Получены пептидные экстракты из сухого растительного сырья (АОЗТ «Здоровье», Москва): девясила высокого (*Inula helenium* L.) – PE-Ih, зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum* L.) – PE-Hp, лавра благородного (*Laurus nobilis* L.) – PE-Ln, чистотела большого (*Chelidonium majus*) – PE-Cm, хвоща полевого (*Equisetum arvense* L.) – PE-Ea, чаги (гриб) (*Inonotus obliquus*) – PE-Io и смеси (девясила, чистотела, хвоща и чаги) – PE-PM.

Анализ аминокислотного состава. К 0,2–0,3 мг пептидного экстракта в реакционных пробирках (vacuum reaction tube, PIERCE, USA) добавляли 0,2 мл смеси конц. HCl – пропионовой кислоты (50:50 v/v, PIERCE, USA). Пробирки замораживали, вакуумировали на водоструйном насосе и нагревали при 140°C 2,5 часа. Раствор из пробирок упаривали, к остатку добавляли 0,2 мл деионизованной воды и еще раз упаривали. Сухой остаток растворяли в 0,1–0,2 мл буфера А, содержащего в 1 л 8,20 г ацетата натрия, 75,0 мл метанола, 5,0 мл ледяной уксусной кислоты, 4,0 мл муравьиной кислоты и 100 мкл каприловой кислоты, pH 3.30; центрифугировали. Анализ аминокислот проводили на аминокислотном анализаторе Biotronik LC-3000 (Biotronik, Германия). Пробу в объеме 20 мкл наносили на колонку 4x125 мм со смолой ВТС-2410 и элюировали последовательно системой буферных растворов по протоколам фирмы Biotronik (Германия). Скорость элюции – 0,2 мл/мин. Для визуализации использовали раствор нингидрина, содержащий 20 г нингидрина, 0,6 г гидриндантина, 50 мл фенола, 550 мл монометилового эфира этиленгликоля и 400 мл 4 М ацетата натрия (pH 5.5). Детекцию проводили при 440 и 570 нм.

Ионообменная высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ). Ионообменную ВЭЖХ проводили на аминокислотном анализаторе LC 3000 (Biotronik, Германия) по методике, разработанной в лаборатории химии пептидов ИБХ им. академиком М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН. Пептидные экстракты растворяли в 20–60 мкл буфера, содержащего в 1 л 0,82 г ацетата натрия, 75,0 мл метанола, 0,5 мл ледяной уксусной кислоты, 100 мкл каприловой кислоты и 10 % муравьиной кислоты, так чтобы концентрация пептидов составляла 10–100 мг/мл, и наносили на колонку 1 x 125 мм со смолой ВТ-2410 (Biotronik, Германия), уравновешенную буфером А.

Для элюции использовали: буфер А, буфер Б, содержащий в 1 л 4,0 г гидроксида натрия, 2,7 мл ледяной уксусной кислоты, 2,5 мл муравьиной кислоты и 100 мкл каприловой кислоты, pH 3.60; буфер В, содержащий в 1 л 4,0 г гидроксида натрия, 2,7 мл ледяной уксусной кислоты, 2,5 мл муравьиной кислоты и 100 мкл каприловой кислоты, pH 4.90, и буфер Г, содержащий в 1 л 1,0 мл ледяной уксусной кислоты, 83 мМ тринатрий-фосфата, 1,0 г EDTA и 100 мкл каприловой кислоты, pH 10.50.

Пептиды элюировали последовательно буфером А (30,5 мин при 40°C), Б (7,5 мин при 60°C), В (12 мин при 60°C) и Г (27 мин при 60°C). Скорость элюции 0,2 мл/мин. Для визуализации использовали раствор нингидрина. Детекцию проводили при 440 и 570 нм.

Данные анализа фиксировали в виде хроматограмм и в виде пептидограмм, полученных с помощью компьютерной программы реализованной с помощью Delphi 7.0 (лаборатория химии пептидов ИБХ им. академиком М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН).

Методика биологических испытаний пептидных экстрактов

Для исследования противоопухолевой активности использовали зарегистрированную линию мышей CBRB-Rb(8.17)1em (далее называемые CBRB) [11]. Были использованы самцы данной линии в возрасте 4.5±0.5 месяцев (в каждой группе по 7–9 животных). На день 0 реципиентам были перевиты 10⁶ опухолевых клеток, полученных из медленно растущей спонтанной аденокарциномы молочных желез сингенной

самки по разработанной ранее методике [12]. На следующий день опытным животным однократно подкожно в область перевивки ввели пептидные экстракты растений в количестве 1 мг в объеме 0,1 мл физиологического раствора. Контрольным животным вводили таким же образом одновременно лишь физиологический раствор в том же объеме.

Противораковую активность препаратов оценивали по динамике появления и роста перевитого пальпируемого РМЖ мышей. Измеряли три взаимно перпендикулярных размера опухоли и на основании полученных данных вычисляли средний диаметр опухоли для каждого реципиента, как описано ранее [12]. Результаты оценивали с использованием t-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Получение и анализ пептидных экстрактов из растений. Полученные пептидные экстракты подвергали аминокислотному анализу и анализу пептидного состава.

Анализ аминокислотного состава пептидных экстрактов. В табл. 1 показано различие в соотношениях аминокислот в полученных пептидных экстрактах.

Аминокислота (нмоль/проба)	Растительное сырье						
	PE-Ih	PE-Hp	PE-Ln	PE-Io	PE-Cm	PE-Ea	PE-PM
Asp	2.49	2.96	2.71	8.21	5.95	4.04	5.16
Glu	1.56	4.56	2.95	9.13	5.26	5.31	7.24
Thr	0.01	0.61	1.42	0.55	1.57	1.62	1.52
Ser	0.01	0.79	1.45	1.43	1.47	1.85	1.63
Pro	2.56	1.83	1.84	0.49	1.85	2.38	2.23
Gly	0.67	2.46	2.31	3.49	3.46	3.22	3.76
Ala	0.01	1.01	1.53	0.64	1.96	2.28	1.02
Val	0.01	0.42	0.98	0.27	1.13	1.24	0.87
Met	0.01	0.01	0.18	0.01	0.29	0.37	0.22
Ile	0.01	0.06	0.51	0.01	0.65	0.68	0.26
Leu	0.01	0.22	0.83	0.01	0.88	0.98	0.33
Phe	0.01	0.01	0.26	0.01	0.04	0.35	0.02
Tyr	0.01	0.01	0.79	0.01	0.06	0.71	0.03
His	0.55	0.32	0.58	0.53	0.07	0.11	0.27
Lys	1.05	1.08	2.15	1.42	1.56	1.37	1.74
Arg	17.8	0.61	0.48	0.82	0.61	0.41	2.59

Таблица 1. Аминокислотный состав гидролизатов пептидных экстрактов из растительного сырья

Все пептидные экстракты содержат относительно малое количество метионина, изолейцина, лейцина, тирозина, фенилаланина, гистидина, небольшие количества аланина, треонина, серина, валина, лизина. Некоторые экстракты, например, экстракт из девясила, содержит относительно малое количество гидрофобных аминокислот и значительное количество заряженных аминокислот и пролина. Содержание аргинина в этом препарате намного больше, чем в других пептидных экстрактах. В пептидном экстракте из зверобоя большое содержание глутаминовой кислоты. Пептидный экстракт из чаги богат аспарагиновой и глутаминовой кислотами, но содержит мало гидрофобных аминокислот. Пептидный экстракт из смеси растений и гриба чаги богат глутаминовой и аспарагиновой кислотами и глицином.

На основании данных количественного анализа аминокислот после гидролиза в пептидных экстрактах содержание пептидного материала составляет 85–95%.

Сравнительный анализ биологических активностей пептидных экстрактов. Для тестирования противоракового эффекта однократной инъекции пептидных экстрактов была использована перевивка из медленно растущей спонтанной аденокарциномы молочных желез мышей СБРВ. Эта модель позволила проследить динамику как появления, так и последующего роста пальпируемых опухолей в течение четырех недель после перевивки.

Динамика появления пальпируемых РМЖ по группам представлена на рис. 1 как доля мышей с уже появившимися опухолями. Как видно из представленных данных, исследуемые препараты отличались по степени и продолжительности проявленной противоопухолевой активности, оказав или краткосрочное (первая неделя) или долгосрочное действие (вплоть до третьей недели после перевивки опухоли).

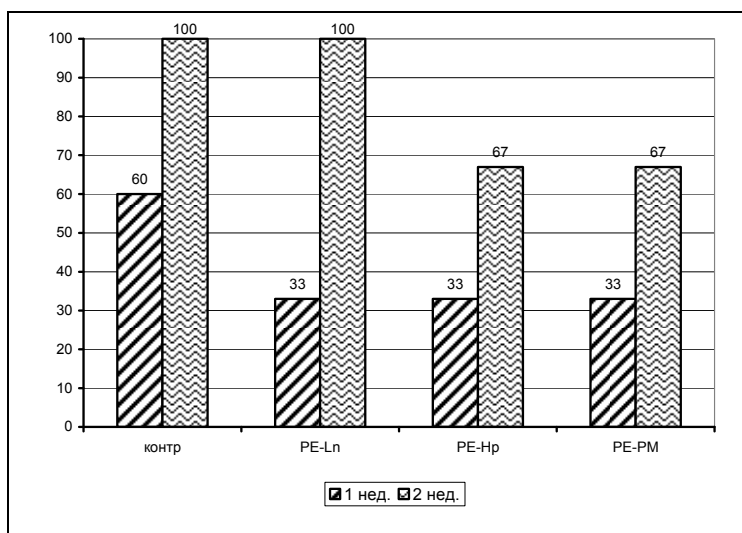


Рис. 1. Задержка появления опухолей у мышей СБРВ, однократно обработанных пептидными экстрактами растений

На первую неделю после перевивки задержка появления опухолей была выявлена для всех пептидных экстрактов. Пальпируемые опухоли были обнаружены у 33% леченых мышей, в то время как в контроле опухоли пальпировались уже у 60% мышей.

На вторую неделю после перевивки задержку появления опухолей наблюдали только в группах, однократно обработанных пептидными экстрактами PE-Hr и PE-PM. Пальпируемые опухоли были обнаружены у 67% леченых мышей, в то время как в контроле опухоли пальпировались уже у 100% мышей.

Таким образом, однократные инъекции пептидным экстрактом PE-Ln оказала краткосрочное влияние на динамику появления опухолей. Наиболее длительную задержку появления опухолей наблюдали у мышей, обработанных пептидными экстрактами PE-PM и PE-Hr.

На рис. 2 представлена динамика роста опухолей у мышей, однократно леченных пептидными экстрактами. Достоверное замедление роста опухолей на 20 и 25% на четвертую неделю после перевивки наблюдали только для пептидов PE-Hr и PE-PM, соответственно. Под действием пептидного экстракта из лавра PE-Ln рост опухолей практически не отличался от контроля.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Экстракты из зверобоя продырявленного и смеси растений обладали выраженной противоопухолевой активностью после локальной однократной инъекции РМЖ мышей

СВРВ. Пептидный экстракт из лавра благородного оказал лишь краткосрочное действие на динамику появления и роста пальпируемого РМЖ.

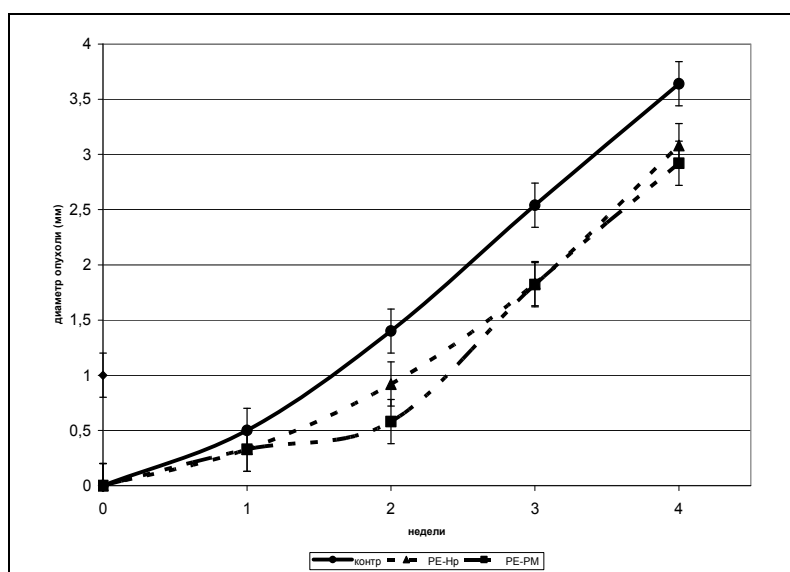


Рис. 2. Замедление роста опухолей у мышей СВРВ, однократно обработанных пептидными экстрактами

Сравнительный анализ компонентов пептидных экстрактов методом ионообменной ВЭЖХ. Анализ компонентов проводили с помощью ионообменной высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Результаты анализов представлены на рис. 3–10 в виде хроматограмм и пептидограмм. Пептидограммы построены из данных хроматограмм в виде зависимости времени выхода пика и его площади в логарифмической шкале, что позволяет проводить сравнительный анализ различных пептидных экстрактов, выявляя сходные и различные по хроматографическим данным компоненты.

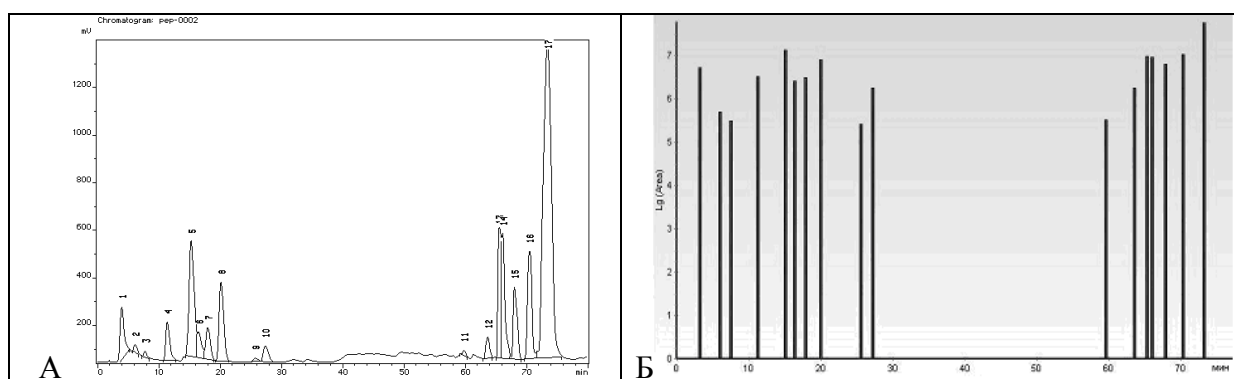


Рис. 3. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-Ih
А – хроматограмма; Б – пептидограмма

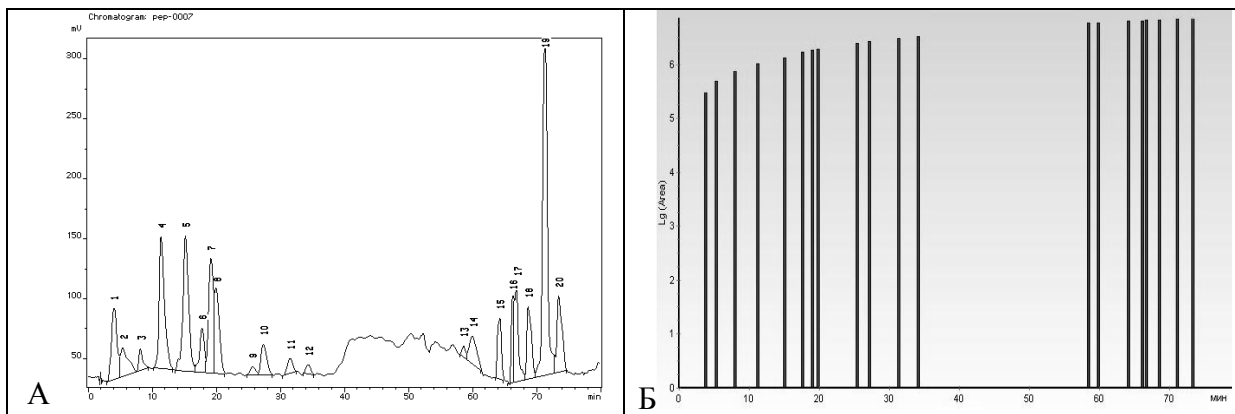


Рис. 4. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-Hp
 А - хроматограмма; Б – пептидограмма

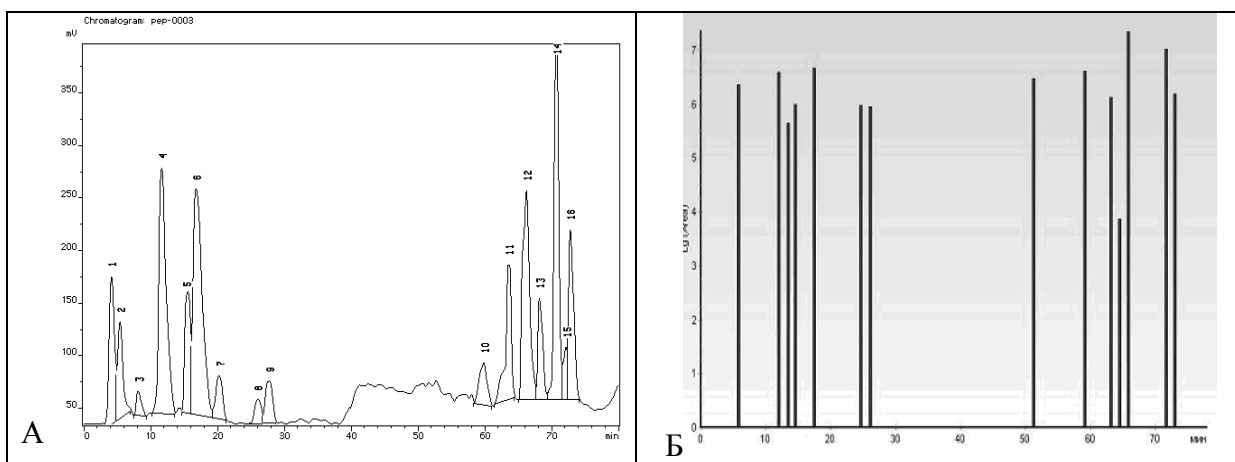


Рис. 5. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-Lp
 А – хроматограмма; Б – пептидограмма

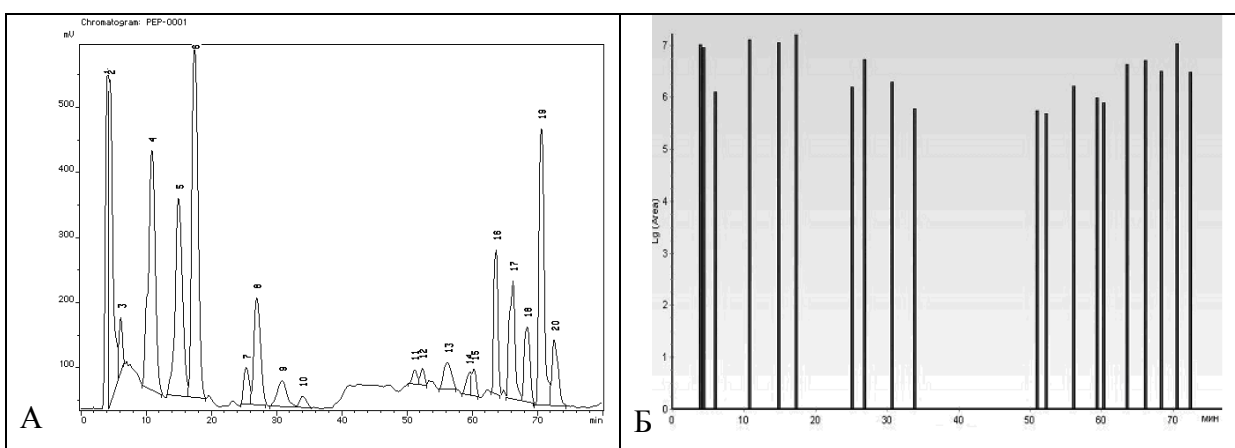


Рис. 6. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-Ea
 А – хроматограмма; Б – пептидограмма

На рис. 7 представлены данных ВЭЖХ состава PE-Ю. В пептидном экстракте, полученном из чаги, наименьшее количество пептидных компонентов.

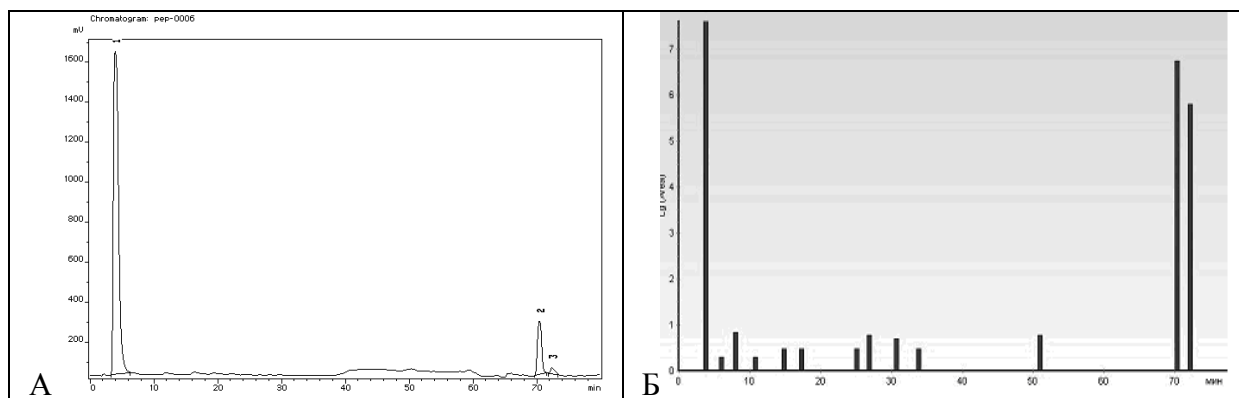


Рис. 7. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-10
 А – хроматограмма; Б – пептидограмма

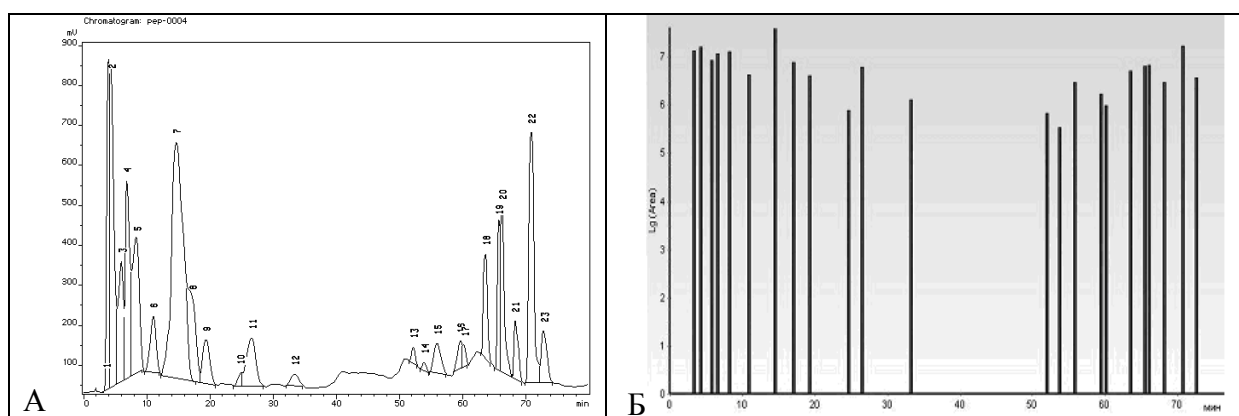


Рис. 8. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-St
 А – хроматограмма; Б – пептидограмма

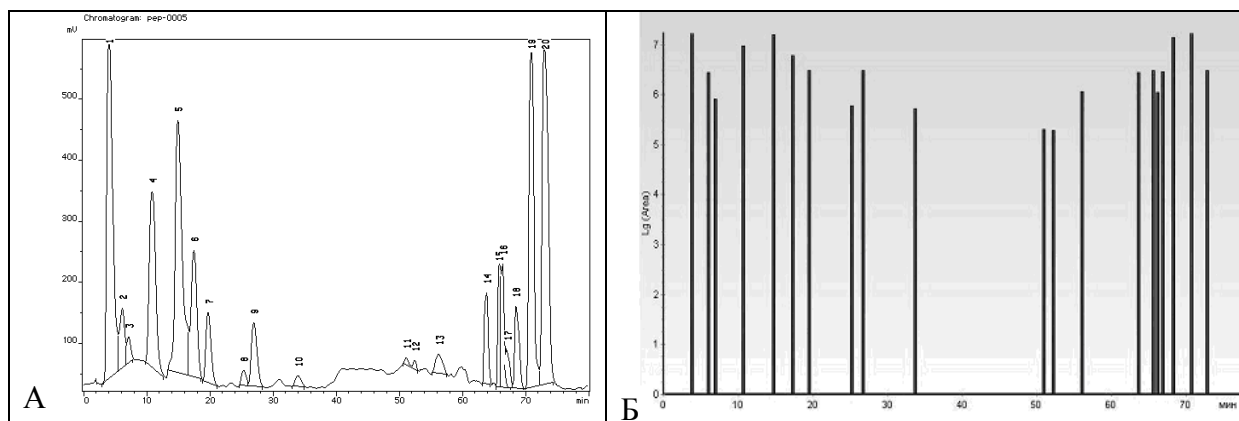


Рис. 9. Данные ВЭЖХ анализа состава PE-PM
 А – хроматограмма; Б – пептидограмма

Для пептидных экстрактов PE-Нр и PE-PM, обладающих противоопухолевой активностью, провели сравнительный анализ пептидограмм на наличие сходных и различных компонентов. На рис. 10 представлены пептидограммы препаратов PE-PM и PE-Нр, из которых следует, что лишь 6 пептидных фракций в обоих препаратах имеют одинаковую хроматографическую подвижность, а остальные фракции, представленные на рис.10, характерны лишь для сравниваемых экстрактов.

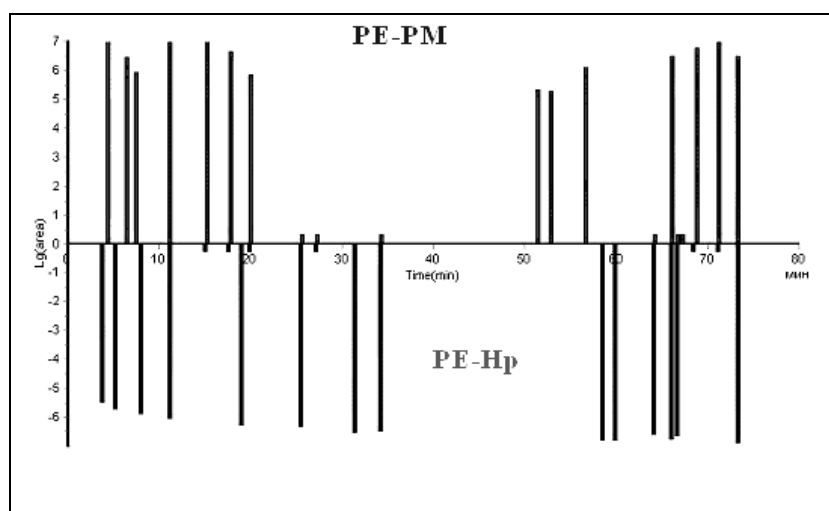


Рис. 10. Индивидуальные компоненты на основании сравнительного анализа пептидограмм PE-PM и PE-Hp

Можно предположить, что именно совпадающие по подвижности при хроматографии компоненты определяют противоопухолевую активность данных двух препаратов.

Заключение

Выделено семь пептидных экстрактов из растительного лекарственного сырья. Методика включает экстракцию исследуемого растительного лекарственного материала уксусной кислотой с последующим осаждением пептидной фракции добавлением ацетона. Пептидные экстракты охарактеризованы аминокислотным составом и данными хроматографического анализа методом ионообменной ВЭЖХ. Изучена биологическая активность пептидных экстрактов на мышинной модели РМЖ. Результаты биологических испытаний показали, что для дальнейших исследований наиболее перспективными являются пептидные препараты из зверобоя продырявленного – PE-Hp, чистотела большого, девясила высокого, хвоща полевого и гриба чаги – PE-PM.

Литература

1. Старинский В.В., Мирабишвилли В.М., Грецова О.П., Дьяченко О.Т., Простов Ю.И., Цветкова Т.Л., Аналькова Т.А. Развитие системы популяционных раковых регистров в России // Вопросы онкологии. – 2003. – Т. 49. – С. 422–426.
2. American Cancer Society: Cancer facts and figures, 2003. – Режим доступа: [<http://www.cancer.org/downloads/STT/CAFF2003PWSecured.pdf>]
3. Головкин Б.Н., Руденская Р.Н., Трофимова И.А., Шретер А.И., Биологически активные вещества растительного происхождения. – М.: Наука, 2001. Т. 1. – 349 с.
4. Трещалина Е.М. Противоопухолевая активность веществ природного происхождения. – М.: Практическая медицина, 2005. – 270 с.
5. Craik D.J., Cemazar M., Daly N.L. The chemistry and biology of cyclotides // Curr.Opin Drug Discov Devel., 2007. – V. 10. – P. 176–184.
6. Svängard E., Burman R., Gunasekera S., Lövborg H., Gullbo J., Göransson U. Mechanism of action of cytotoxic cyclotides: cycloviolacin O2 disrupts lipid membranes // J Nat Prod. – 2007. – V. 70. – P. 643–647.
7. Svängård E., Göransson U., Hocaoglu Z., Gullbo J., Larsson R., Claeson P., Bohlin L. Cytotoxic cyclotides from Viola tricolor // J. Nat. Prod. – 2004. – V. 67. – P. 144–147.

8. Головкин Б.Н., Руденская Р.Н., Трофимова И.А., Шретер А.И. Биологически активные вещества растительного происхождения. – М.: Наука, 2001. Т. 2. – 763 с. Т.3. – 216 с.
9. Пустырников И.Н., Прохоров В.Н. Универсальная энциклопедия лекарственных растений. – М.: Книжный дом «Махаон», 2000. – 656 с.
10. Шваб О.В., Тришкин С.В., Шепель Е.Н., Васьковский Б.В., Сухих Г.Т., Демушкин В.П. Анализ пептидов из тканей животных и растений // Биоорганическая химия. – 1999. – Т. 25. – С. 20–24.
11. The Mouse Tumour Biology Database, 1999. – Режим доступа: [<http://www.informatics.jax.org/external/festing/mouse/docs/CBRB.shtml>]
12. Moiseeva E.V., Merkulova I.B., Bijleveld C., Koten J.W., Miroshnikov A.I., Den Otter W. Therapeutid effect of a single peritumoural dose of IL-2 on transplanted murine breast cancer // Cancer Immunol. Immunother. – 2003. – V. 8. – P. 487–496.

ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ КАК СРЕДСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ

Е.Н. Терещенко

Научный руководитель – д.т.н., профессор М.Я. Марусина

В статье рассмотрена проблема определения коэффициента диффузии по серии динамических ПЭТ-сканов с использованием закона Фика.

Введение

Лучевая диагностика опухолей головного мозга, несмотря на внедрение в клиническую практику высокоинформативных и малоинвазивных методов исследования, продолжает оставаться актуальной проблемой в нейрохирургии. Современное состояние характеризуется все более широким применением компьютерной томографии (КТ), магнитно-резонансной томографии (МРТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) для диагностики различных видов и типов опухолей головного мозга.

Применение в первую очередь КТ и МРТ значительно улучшило не только распознавание опухолей головного мозга, но и позволило проводить дифференциальную диагностику между ними и неопухолевыми заболеваниями головного мозга. При этом сегодня речь идет не просто о диагностике, а о возможно более раннем распознавании новообразований головного мозга. Ранняя диагностика с применением комплекса лучевых методов исследования способствует улучшению результатов лечения больных с опухолями головного мозга.

Дополнительными диагностическими возможностями обладает позитронно-эмиссионная томография. Суть этой технологии состоит в регистрации физиологических процессов в ткани путем слежения за малым количеством ультракороткоживущих изотопов, которыми помечены вещества, принимающие участие в исследуемом процессе.

В основе многих биохимических процессов обмена веществ в живых тканях лежит процесс диффузии [1]. Поэтому для диагностики многих патологий, как на ранних, так и на более поздних стадиях развития важен такой показатель как коэффициент диффузии. Существующие в настоящий момент программные продукты, реализующие возможность нахождения коэффициента диффузии и построения диффузионных карт, требуют значительных материальных затрат на их приобретение, и поэтому их использование не всегда возможно. Описанный в этой статье метод позволит находить коэффициент диффузии.

Описание метода

Диффузия – это самопроизвольный процесс выравнивания концентрации частиц во всем объеме коллоидной системы или молекул в растворах [2]. Во всех случаях диффузия идет из слоя соля с более высокой концентрацией частиц до полного выравнивания их концентраций во всех частях системы. Если обозначить dm – количество вещества, перенесенного через сечение S по направлению x за время dt , то в соответствии с первым законом А. Фика (1855 г.)

$$dm = -DS \frac{dc}{dx} dt, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; dc/dx – градиент концентрации. Знак «минус» показывает, что процесс идет в сторону уменьшения концентрации [3]. Решая уравнение аналитически, получаем выражение для коэффициента диффузии:

$$D = -\frac{dmdx}{Sdcdt} \quad (2)$$

Рассмотренный в данной статье метод основан на использовании для вычисления коэффициента диффузии формулы А.Фика (1). Приведенный выше закон А.Фика положен в основу программного продукта, выполненного в среде Matlab. Все величины, использованные в формуле для вычисления коэффициента диффузии, будут получены нами из ПЭТ-скана.

Для тестирования программного продукта разработан фантом, представляющий собой кубическую емкость со сменной перегородкой посередине. Данный фантом моделирует собой двухкомпарментную модель, участвующую в процессе диффузии, а сменная перегородка необходима для возможности проведения исследований с различными образцами тканей. В один из отсеков кубической емкости помещено диффундирующее вещество, коэффициент диффузии которого и необходимо определить.

Исследования проведены на томографе РС 2048-15В фирмы Scanditronix (Швеция). Параметры томографа приведены в таблице.

Диаметр кольца	270 мм
Количество колец детекторов / общее количество детекторов	8 / 2048
Количество одновременно получаемых срезов	8 «прямых» и 7 «кросс»-срезов
Размеры ВГО кристаллов детекторов	6×12×30 мм
Трансаксиальное пространственное разрешение (в плоскости одного среза)	6,5 мм в центре поля зрения, 7,7 мм на расстоянии 9 см от центра
Аксиальное пространственное разрешение (расстояние между срезами)	6,5 мм
Минимальный элемент изображения (пиксел)	2×2×6,5 мм
Матрица изображения	128×128×15

Таблица. Параметры томографа РС 2048-15В

Достоверность результатов будет проверена с помощью методов определения коэффициента диффузии, которые используются в настоящее время в химической практике. Работа ведется с использованием материальной базы лаборатории ПЭТ Института мозга человека РАН.

Заключение

На основе обобщения опыта использования различных методик лучевого исследования головного мозга очевидно, что ни одна из них, включая самые современные, технически сложные и высокоинформативные, не может гарантировать получение исчерпывающей диагностической информации. В каждом конкретном случае определение тактики нейрохирурга должно опираться на всесторонний комплексный анализ всех данных клинико-лучевого обследования больного. При этом представляется очевидным, что значимость тех или иных данных не зависит от сложности методики, с помощью которой они получены. Очевидно, что работа над определением коэффициента диффузии актуальна и найдет свое практическое применение в современных условиях.

Литература

1. Ташмухамедов Б.А., Гагельганс А.И. Активный транспорт ионов через биологические мембраны. – Ташкент, 1973. – С. 43–47.
2. Овчинников Ю.А., Иванов В.Т., Шкроб А.М. Мембрано-активные комплексоны. – М., 1974. – С. 56–78.
3. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. / 2 изд. – М., 1967. – С. 3–8.

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И КВАДРАТУР С РЕГУЛЯРИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СМАЗАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В MATLAB'е

М.В. Римских

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.С. Сизиков

Рассматривается задача реконструкции смазанных изображений. Задача сводится к решению множества одномерных интегральных уравнений Фредгольма I рода типа свертки. Делается сравнение двух методов решения таких уравнений: метода преобразования Фурье и метода квадратур (с использованием метода регуляризации Тихонова в обоих случаях). Приведены численные результаты. Делается вывод, что метод квадратур более эффективен, чем метод преобразования Фурье с регуляризацией.

Введение

Известно, что изображения подвергаются различного рода искажениям. При этом существуют следующие типы искажений, требующие сложной математической обработки: смаз, дефокусировка и зашумленность изображения [1].

Реконструкция смазанных (смещенных, сдвинутых) изображений является одной из актуальных задач цифровой обработки изображений [1–5]. Эта некорректная задача описывается обычно интегральным уравнением Фредгольма I рода типа свертки [6–13]. Одним из распространенных способов решения этой задачи (как прямой, так и обратной) является использование преобразования Фурье (ПФ) с фильтрацией Винера, Тихонова и т.д. (для устойчивости решения). При этом края смазанного изображения обычно формируются с использованием так называемых граничных условий [5, с. 108], [14, 15]. В данной работе отмечен ряд недостатков такого подхода: неадекватность описания физической задачи смазывания с помощью ПФ, а также искусственность граничных условий при формировании краев смазанного изображения. Разработаны программы на MATLAB'е и путем моделирования показано, что одним из лучших путей восстановления смазанных изображений является решение совокупности одномерных интегральных уравнений методом квадратур (но не ПФ) с регуляризацией Тихонова и с новым решением проблемы граничных условий. Произведено сравнение разработанных алгоритмов и программ с классическими методами (параметрической фильтрации Винера и др.) и соответствующими программами реконструкции (`deconvnr.m`, `deconvlucy.m`, `deconvreg.m`), а также дана качественная и количественная оценка погрешностей полученных результатов.

В данной работе рассматривается задача реконструкции (восстановления, реставрации) смазанных изображений. Под изображением будем подразумевать фотоснимок или оптикоэлектронное воспроизведение объекта природы, текста, человека, здания, самолета, автомобиля, космического объекта, наземного объекта из космоса и т.д.

Математическое описание задачи реконструкции смазанного изображения

Изображение можно описать действительной ограниченной неотрицательной функцией $f(\xi, \eta)$ двух пространственных перемещений ξ, η , представляющей интенсивность или яркость изображения в каждой точке (ξ, η) плоскости. Никакая оптическая система воспроизведения не может обеспечить совершенство качества изображений, поэтому реально получается искаженное зашумленное изображение, для улучшения качества которого необходимо выполнить определенную коррекцию [1].

Математически задача восстановления изображений, искаженных линейной системой, пространственно-инвариантной относительно сдвига (однородной системой), описывается интегральным уравнением типа свертки вида [4–13, 16, 17]:

$$Af \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} k(x-\xi, y-\eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y), \quad -\infty < x, y < +\infty, \quad (1)$$

где $g(x, y)$ – искаженное изображение на выходе системы (точнее, распределение интенсивности по искаженному изображению); $f(\xi, \eta)$ – оригинал, или исходное, идеальное изображение на входе системы; $k(x-\xi, y-\eta)$ – импульсная характеристика системы, или функция рассеяния точки (ФРТ), являющаяся трансляционно-инвариантной (разностной) [4, с. 380].

Одной из важных частных задач обработки изображений является задача повышения качества смазанных изображений. В случае одномерного смаза потеря четкости изображений происходит в направлении одной координаты, например, в результате прямолинейного движения устройства – носителя изображения (регистрирующей системы, пленки фотоаппарата и т.д.). При этом функция рассеяния точки допускает разделение переменных и имеет вид [6]:

$$k(x-\xi, y-\eta) = k_1(x-\xi)\delta(y-\eta). \quad (2)$$

В частном случае равномерного и прямолинейного движения изображения функция $k_1(x-\xi)$ принимает постоянные значения в некоторой полосе:

$$k_1(x-\xi) = \begin{cases} 1/(b-a), & a \leq x-\xi \leq b, \\ 0, & x-\xi < a, \quad x-\xi > b. \end{cases} \quad (3)$$

Основное уравнение (1) при реставрации смазанных изображений эквивалентно уравнению

$$\int_{-\infty}^{+\infty} k_1(x-\xi) f(\xi, y) d\xi = g(x, y), \quad -\infty < y < +\infty, \quad (4)$$

т.е. задача сводится к многократному решению одномерных интегральных уравнений типа свертки [8–13, 18].

Смазанность изображения может быть обусловлена различными *причинами*, такими как атмосферная турбулентность [4, с. 384], смещение фотоаппарата и движение самого объекта. Обычно математически смаз описывается функцией рассеяния точки (ФРТ, PSF) – функцией, которая определяет характер искажения точек изображения [5, с. 155]. Смазывание изображения может возникнуть также, например, в результате равномерного поступательного движения сцены относительно регистрирующей системы в процессе фотосъемки. При этом наблюдаемое изображение окажется как бы результатом наложения со смещением множества исходных изображений [3].

Рассмотрим вначале задачу восстановления смазанных изображений на примере смазанного (сдвинутого, смещенного) фотоснимка. Пусть фотографируемый объект (полагаемый плоским вследствие его удаленности) и фотопленка фотоаппарата расположены параллельно апертуре линзы фотоаппарата на расстояниях соответственно f_1 и f_2 от линзы. При этом $1/f_1 + 1/f_2 = 1/f$, $f_1 \geq f_2$, где f – фокусное расстояние линзы (см. рис. 1) [10–13].

Полагаем, что за время экспозиции фотопленка совершила прямолинейный и равномерный *сдвиг* (смещение) на величину Δ или сдвиг совершил объект (например, быстролетящая цель [12, с. 196]) на величину $-\Delta \cdot (f_1/f_2)$. В результате изображение на фотопленке будет смазанным (рис. 2).

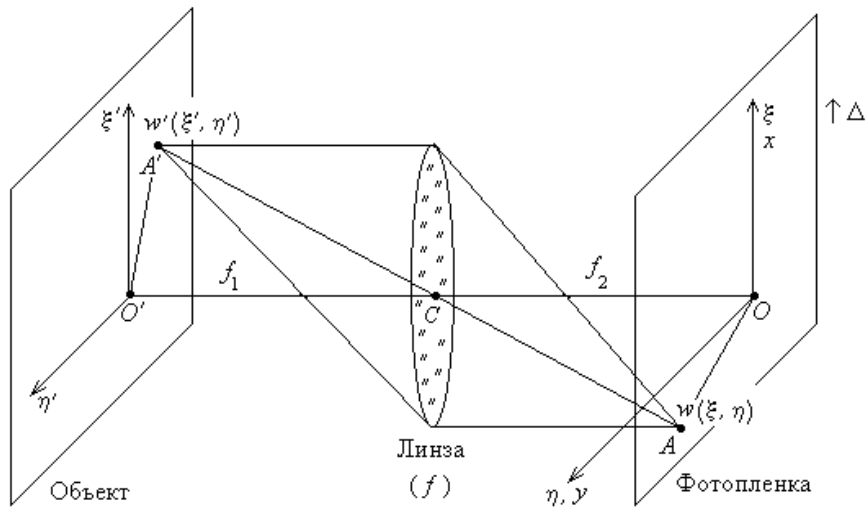


Рис. 1. Схема получения смазанного изображения



Рис. 2. Смазанное изображение фотографа ($\Delta = 20$ пикселей)

Основное интегральное уравнение задачи восстановления смазанных изображений. Основной математической моделью задачи восстановления смазанных изображений будем полагать одномерное интегральное уравнение Фредгольма I рода типа свертки [8–13, 16, 18]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(x - \xi) w(\xi, y) d\xi = g(x, y), \quad -\infty < x, y < \infty, \quad (5)$$

где $g(x, y)$ – распределение интенсивности вдоль смазанного изображения, например, вдоль смазанной томограммы (измеренная функция); $w(\xi, y)$ – распределение интенсивности вдоль неискаженного изображения, которое было бы получено в отсутствие сдвига, т.е. при $\Delta = 0$ (искомая функция); $k(x - \xi)$ – математическое ядро интегрального уравнения, а физически импульсная характеристика системы или функция рассеяния точки, равная в случае равномерного и прямолинейного смаза

$$k(x) = \begin{cases} 1/\Delta & \text{при } x \in [-\Delta, 0], \\ 0 & \text{при } x \notin [-\Delta, 0]. \end{cases} \quad (6)$$

Задача решения уравнения (5) является некорректной (неустойчивой) [9, 11–13, 16, 19]. Однако к настоящему времени достаточно подробно разработаны устойчивые методы решения уравнений типа (5) [6, 8–13, 16, 19]. Основным (устойчивым) методом решения уравнения (5) обычно считается метод преобразования Фурье (ПФ) с регуляризацией Тихонова. Однако в данной работе (как и в работе [18]) мы хотим показать, что еще более эффективным (и также устойчивым) является метод квадратур с регуляризацией Тихонова.

Два метода решения интегрального уравнения и их численная реализация в системе MATLAB

Реконструкция изображения методом преобразования Фурье и регуляризации Тихонова

В рамках данной работы использовалось моделирование смазывания изображений, которое позволяет проникнуть в суть задачи восстановления изображений, а в некоторых случаях – учесть внешние условия, вызывающие искажения (например, атмосферная турбулентность) [4, с. 384].

Прямая задача. Сначала решалась прямая задача – по исходному, неискаженному изображению (без учета воздействия шума) вычислялась функция, определяющая результирующую интенсивность смазанного изображения. В непрерывном (интегральном) виде данная задача описывается соотношением [8–13, 18]:

$$g(x, y) = \frac{1}{\Delta} \int_x^{x+\Delta} w(\xi, y) d\xi, \quad (7)$$

где $g(x, y)$ – интенсивность на фотопленке (смазанное изображение) в функции прямоугольных координат x, y , причем ось x направлена вдоль сдвига (смаза); $w(\xi, y)$ – распределение интенсивности по истинному неискаженному изображению; Δ – величина смаза.

Отметим также, что если на носителе фиксируется серое изображение (gray image), то под $g(x, y)$ и $w(\xi, y)$ будем подразумевать интенсивности $g_g(x, y)$ и $w_g(\xi, y)$ в сером цвете. Если же фиксируется цветное изображение (RGB image), то можно преобразовать RGB-изображение в gray-изображение (это особенно эффективно выполняется в MatLab'e) или под записью (7) будем подразумевать три соотношения для трех цветов – красного, зеленого и синего (R, G, B), причем сначала нужно выполнить извлечение трех цветовых составляющих и получить распределение интенсивностей $g_R(x, y)$, $g_G(x, y)$, $g_B(x, y)$, затем восстановить $w_R(\xi, y)$, $w_G(\xi, y)$, $w_B(\xi, y)$ и, наконец, вычислить суммарную интенсивность $w(\xi, y) = w_R(\xi, y) + w_G(\xi, y) + w_B(\xi, y)$ (с помощью m-функции cat).

В случае, когда смазывание изображения имеет прямолинейный и равномерный характер, а ось x мы направили вдоль смаза, в выражении (7) y будет выступать в роли параметра, и выражение (7) может быть записано как

$$g_y(x) = \frac{1}{\Delta} \int_x^{x+\Delta} w_y(\xi) d\xi \quad (8)$$

при каждом фиксированном значении y .

В дискретном виде эта же задача может быть описана выражением

$$g_j(i) = \frac{1}{\Delta} \sum_{k=i}^{i+\Delta} q_j(k), \quad (9)$$

где $i = \overline{1, n+\Delta}$ и $k = \overline{1, n}$ – номера столбцов в матрицах g и w соответственно, а n – число столбцов в матрице w ; $j = \overline{1, m}$ – номер строки в матрицах g и w , m – число строк, т.е. матрица w имеет размер $m \times n$, а матрица g – размер $m \times (n + \Delta)$; $q_j(k)$ – ФРТ, определяющая смазывание исходного изображения, задаваемая выражением

$$q_j(k) = \begin{cases} w_j(k - \Delta), & 1 \leq k - \Delta \leq n, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (10)$$

Отметим, что в ряде работ [8, 9] рассмотрена более сложная задача – неравномерный сдвиг фотоаппарата или объекта, а также непараллельность плоскостей фотопленки и объекта и т.д.

Рассматриваемая прямая задача формирования смазанного изображения была реализована с использованием средств MATLAB в виде программы-функции SmIm0.m. При этом в качестве неискаженного изображения была использована собственная томограмма-фантом (рис. 3). Результат смазывания изображения см. дальше.

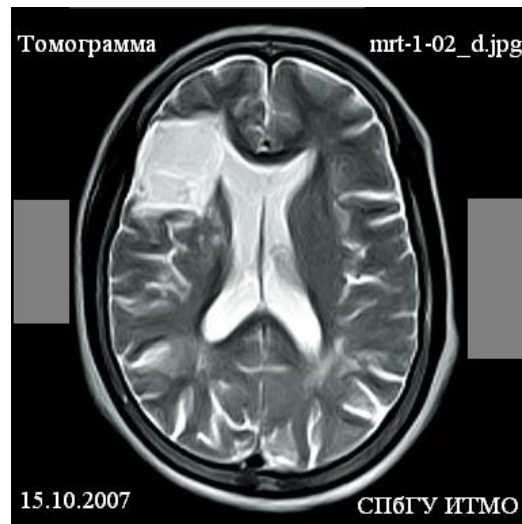


Рис. 3. Изображение головного мозга человека

Обратная задача. Далее рассмотрим обратную задачу – восстановление изображения w по смазанному изображению g и ФРТ. Решение (восстановленное изображение) уравнения (5) методом ПФ и регуляризации Тихонова может быть записано в виде обратного ПФ [4, 6–13, 18]:

$$w_\alpha(\xi, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_\alpha(\omega, y) e^{-i\omega \xi} d\omega, \quad (11)$$

где регуляризованный одномерный Фурье-спектр решения (при некотором y) равен

$$W_\alpha(\omega, y) = \frac{K(-\omega) G(\omega, y)}{L(\omega) + \alpha M(\omega)}, \quad (12)$$

причем

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k(x) e^{i\omega x} dx = \frac{\sin(\omega\Delta)}{\omega\Delta} + \frac{\cos(\omega\Delta) - 1}{\omega\Delta} i, \quad (13)$$

$$G(\omega, y) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{i\omega x} dx. \quad (14)$$

Здесь $K(\omega)$ и $G(\omega, y)$ – одномерные Фурье-спектры ядра (функции рассеяния точки) $k(x)$ и правой части (смазанного изображения) $g(x, y)$ уравнения (5) при некотором y ; $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, $M(\omega)$ – регуляризатор, который может быть выбран, например, в виде $M(\omega) = \omega^{2p}$, $p \geq 0$ – порядок регуляризации (обычно $p = 1$); Δ – величина смаза;

$$L(\omega) = |K(\omega)|^2 = K(\omega)K(-\omega) = \text{Re}^2 K(\omega) + \text{Im}^2 K(\omega). \quad (15)$$

Фурье-спектр ядра $K(\omega)$ (не зависящий от y) может быть вычислен аналитически согласно (13), а $G(\omega, y)$ может быть найдено численно для каждого значения y с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Выбор параметра регуляризации. Важным является вопрос о выборе значения параметра регуляризации α . Разработан ряд способов выбора α в методе регуляризации Тихонова [16, 19].

Выбор α можно осуществлять, например, способом невязки или обобщенным принципом невязки [8, 9, 16, 19]. Разработаны также следующие способы выбора параметра регуляризации α : способ квазиоптимального (квазинаилучшего), способ отношения, способ независимых реализаций, способ перекрестной значимости, способ моделирования и др. [16, 20]. Однако для задачи реконструкции изображений, как показала практика, более эффективен способ подбора [10–13, 18].

В данной работе для задачи реконструкции смазанных изображений выбор α осуществлялся способом подбора. Согласно нему, для ряда значений α вычисляются решения $w_\alpha(\xi, y)$ по формулам (11)–(15), они выводятся на дисплей в графической форме и выбирается значение α , дающее наилучшее восстановление изображения с точки зрения визуальных, физиологических (но не математических) критериев восприятия. Этот способ аналогичен способу настройки контраста телеизображения (в этом случае α обратно пропорционален контрасту). Способ подбора можно назвать также визуальным критерием, или критерием качественной оценки. Этот способ эффективен при реконструкции реальных смазанных изображений, когда истинное изображение w неизвестно. Когда же обрабатывается смоделированное изображение, когда w известно (задается), то наряду с качественной оценкой следует использовать также количественную оценку среднеквадратического отклонения (СКО) регуляризованного решения $w_\alpha(\xi, y)$ от точного w .

Для количественной оценки погрешности метода реконструкции изображений использовалось относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) восстановленного распределения плотности от точного распределения плотности [21]:

$$\sigma_{\text{отн}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - f_{ij}^0)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}^0{}^2}}, \quad (16)$$

где f_{ij} – значения восстановленного распределения плотности; f_{ij}^0 – значения исходного (точного) распределения плотности; M , N – соответственно, количество строк и столбцов матрицы плотности.

При компьютерном моделировании выражения (16) при помощи средств системы программирования MATLAB была составлена соответствующая программа `RMSD0.m`.

О величине смаза. Отметим, что величина смаза Δ априори неизвестна и ее можно оценить путем подбора или по величине штрихов на искаженном изображении. Что же касается направления смаза (вдоль которого устанавливается ось x), то его можно определить по направлению штрихов на искаженном изображении.

Итак, правильно выбрав направление оси x (вдоль смаза) на искаженном изображении (фотоснимке или томограмме) и величину смаза Δ , можно, решив уравнение (5) (точнее, совокупность уравнений) и выбрав α , например, способом подбора, восстановить устойчивым образом неискаженную интенсивность на изображении, например, на томограмме $w_\alpha(x, y)$ по интенсивности на искаженном изображении $g(x, y)$.

Численный алгоритм решения $w_\alpha(\xi, y)$ получается в результате замены интегралов конечными суммами (по формулам прямоугольников, трапеций и т.д.). В результате непрерывные преобразования Фурье (НПФ) заменяются на дискретные преобразования Фурье (ДПФ) или даже на быстрые преобразования Фурье (БПФ) [6, 16, 18].

Заметим, что при решении прямых задач смазывания изображений (в частности, томограмм) мы стремились адекватно описать физическую ситуацию (природу смаза), а она состоит в усреднении интенсивностей в пределах длины смаза Δ .

В результате обращения к программе `RecSmIm0.m` (с использованием алгоритма БПФ) были получены следующие изображения (см. рис. 4).

Численно решение на компьютере обратной задачи было реализовано в собственных m -функциях `desmearing0.m` и `desmearingf.m` в среде программирования MATLAB. Другими словами, решение задачи восстановления исходного изображения в данной работе по известному распределению плотности смазанного изображения осуществлялось в двух вариантах:

1. с использованием разработанной нами собственной m -функции `DFT1.m` для вычисления ДПФ или ОДПФ (`desmearing0.m`);
2. с использованием внешних m -функций MATLAB'a `fft.m` и `ifft.m` для вычисления одномерных БПФ и ОБПФ (`desmearingf.m`).

При этом в обоих вариантах (использование `DFT1.m` или `fft.m` и `ifft.m`) смаз выполнялся или усреднением по длине Δ (см. (9)), или с помощью внешних m -функций `fspecial.m` и `imfilter.m` (соответственно, головные программы `RecSmIm0.m` и `RecSmIm3.m`).

Также в программе `RecSmIm0.m` для решения прямой задачи использована m -функция `SmIm0.m`, основанная на моделировании процесса смазывания изображения выражением (9), содержащим лишь операции суммирования (накопления), что адекватно физике процесса смазывания, и не использующим преобразование Фурье (содержащее косинусы и синусы), что неадекватно физике данного явления (процесса). В то же время, такие внешние m -функции MATLAB'a, как `fspecial.m` и `imfilter.m`, моделирующие также процесс смазывания, используют преобразование Фурье [4, 5], что неадекватно физике процесса смазывания. Однако при решении обратной задачи используются такие внешние m -функции, как `deconvwnr.m`, `deconvreg.m` и др., в которых также используется преобразование Фурье [5, с. 184, 188], что хотя и неадекватно физике процесса смазывания, но согласуется с математическим аппаратом m -функций `fspecial.m` и `imfilter.m` и это приводит к неплохим результатам реконструкции смазанных изображений-фантомов [5, с. 186, 189].

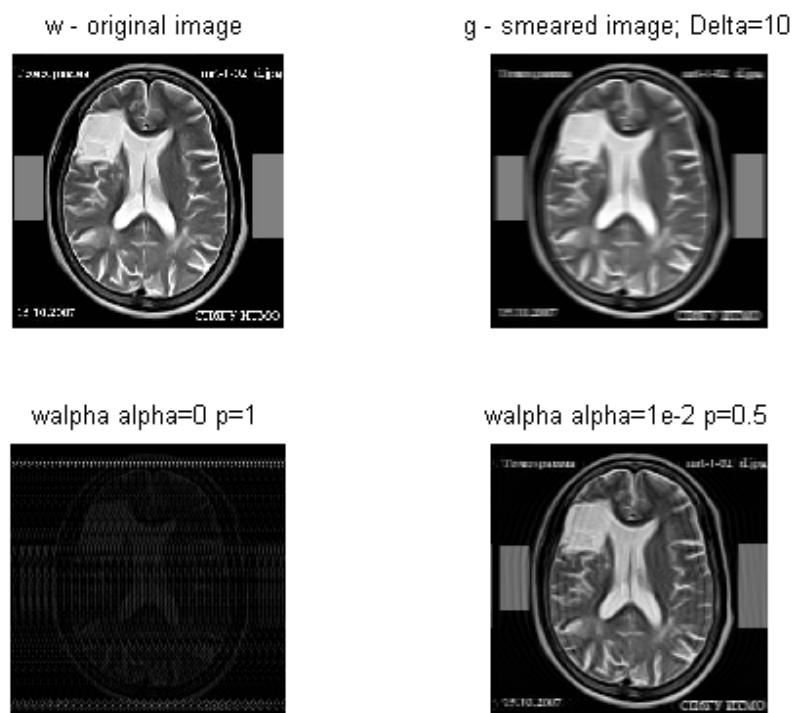


Рис. 4. Исходное изображение, смазанное изображение и реконструированное изображение методом ПФ с регуляризацией Тихонова при $\alpha = 0$ и $\alpha = 10^{-2}$ ($p = 0.5$, $\sigma_{\text{отн}} = 0.315$)

Поскольку в нашей m -функции `desmearing0.m` (и `desmearingf.m`), предназначенной для решения обратной задачи, используется преобразование Фурье, то для решения прямой задачи, помимо m -функции `SmIm0.m`, использовались также m -функции `fspecial.m` и `imfilter.m`, что ведет к согласованию математических аппаратов прямой и обратной задач, хотя и рассогласовывается с физикой процесса смазывания. Такой вариант решения прямой и обратной задач реализован в головной программе `RecSmIm3.m`.

Наилучшим вариантом нужно считать решение прямой задачи с помощью функции типа `SmIm0.m`, использующей соотношение (9), и решение обратной задачи методом, использующим лишь алгебраические операции, например, методом квадратур (с регуляризацией Тихонова) [11, с. 195] или методом итераций (с регуляризацией) [16, с. 272].

Реконструкция изображения методом квадратур с тихоновской регуляризацией

Итак, рассмотрим вариант реконструкции смазанного изображения, когда и прямая, и обратная задачи используют лишь алгебраические операции, а именно, смазывание изображения (прямая задача) моделируется выражением типа (9), а реконструкция изображения (обратная задача) выполняется путем решения интегрального уравнения типа (5) методом квадратур и регуляризации Тихонова.

Обратная задача. Задача реконструкции смазанного изображения в непрерывной форме описывается интегральным уравнением типа свертки (5), которое можно записать в виде (полагая u параметром):

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(x-\xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x), \quad -\infty < x < \infty. \quad (17)$$

Полагаем, что при некотором фиксированном значении y правая часть $g_y(x)$ задана при $x \in [c, d]$, причем пределы $[c, d]$ не зависят от y , а функция $w_y(\xi)$ ищется при $\xi \in [a, b]$ (обычно $[a, b] \subseteq [c, d]$). При этом уравнение свертки (17) будем рассматривать как уравнение общего вида:

$$Kw_y \equiv \int_a^b k(x, \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x), \quad c < x < d, \quad (18)$$

где

$$k(x, \xi) = k(x - \xi) = \begin{cases} 1/\Delta & \text{при } -\Delta \leq x - s \leq 0, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (19)$$

Здесь K – интегральный оператор.

Интеграл в (18) заменяем конечной суммой по формуле прямоугольников, при этом координатам приписываем целые значения (поскольку они выражаются в пикселах). Получим (ср. [11, с. 195]):

$$Kw_j \equiv \sum_{l=1}^n k_{il} w_{j,l} = g_{j,i}, \quad i = \overline{1, n + \Delta}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (20)$$

где

$$k_{il} = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{при } i - \Delta \leq l \leq i - 1, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (21)$$

или, опустив для простоты индекс j ,

$$Kw \equiv \sum_{l=1}^n k_{il} w_l = g_i, \quad i = \overline{1, n + \Delta}, \quad (22)$$

где k_{il} выражается формулой (21). Здесь K – ленточная матрица.

В результате при каждом фиксированном номере строки j мы имеем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (22), причем это избыточная (переопределенная) СЛАУ, так как в ней $n + \Delta$ уравнений и n неизвестных (искомых) w_l .

Более кратко запишем (22) в виде:

$$K w = g. \quad (23)$$

Здесь g – вектор-столбец размера $(n + \Delta) \times 1$, K – матрица размера $(n + \Delta) \times n$ из коэффициентов k_{il} , w – искомый вектор-столбец размера $n \times 1$.

Избыточная СЛАУ обычно решается методом наименьших квадратов (МНК) Гаусса, согласно которому вместо СЛАУ (23) решается СЛАУ

$$K^T K w = K^T g \quad (24)$$

– система n уравнений с n неизвестными, K^T – транспонированная матрица (ее размер $n \times (n + \Delta)$).

Однако задача решения СЛАУ (24), как показывает решение примеров, является некорректной (сильно неустойчивой). Для получения устойчивого решения воспользуемся методом регуляризации Тихонова [11, 16, 19]. В этом методе вместо СЛАУ (24) решается СЛАУ

$$(\alpha I + K^T K) w_\alpha = K^T g, \quad (25)$$

где I – единичная матрица $n \times n$ (по диагонали – единицы, вне диагонали – нули), а $\alpha > 0$ – параметр регуляризации. Решение СЛАУ (25):

$$w_\alpha = (\alpha I + K^T K)^{-1} K^T g. \quad (26)$$

Решение (26) нужно выполнить для каждого значения $j = \overline{1, m}$ – номера строки в изображении. В результате получим регуляризованное решение в виде матрицы w_α с элементами $(w_\alpha)_{jl}$.

Программы-функции. Для моделирования прямой задачи смазывания изображения разработана m-функция `SmIm0.m` и соответствующая ей головная программа `RecSmIm0.m`. А для решения обратной задачи реконструкции смазанного изображения методом квадратур и регуляризации Тихонова разработана m-функция `desmearing.m` и соответствующая ей головная программа `RecSmIm.m`.

На рис. 5 и 6 приведены некоторые результаты расчетов по программам-функциям `RecSmIm.m`, `SmIm0.m` и `desmearing.m`.

Сравнение этих результатов с результатами на рис. 4 показывает, что метод квадратур (с регуляризацией Тихонова) ведет к более точной реконструкции изображений, чем метод преобразования Фурье (также с регуляризацией). На это указывает и визуальный критерий, и количественный критерий (значение $\sigma_{\text{отн}}$ в методе квадратур на порядок меньше, чем в методе ПФ). Отметим также, что в смазанные изображения мы ввели размытые края. Если же размытые края не вводить (или усекать), то реконструкция изображений будет гораздо менее эффективной.

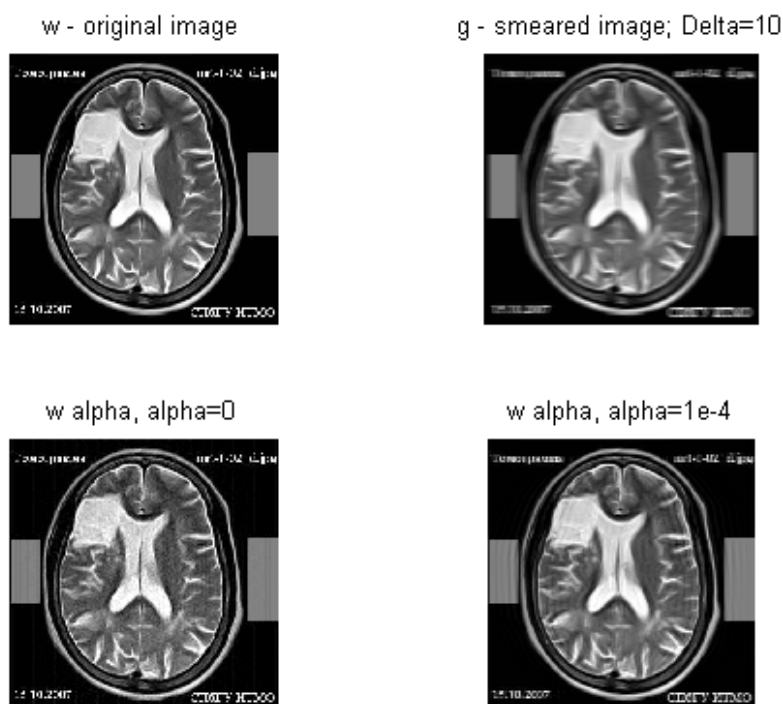


Рис. 5. Исходное изображение, смазанное изображение и реконструированное изображение методом квадратур и регуляризации Тихонова

при $\alpha = 0$ ($\sigma_{\text{отн}} = 0.063$), $\alpha = 10^{-4}$ ($\sigma_{\text{отн}} = 0.034$)

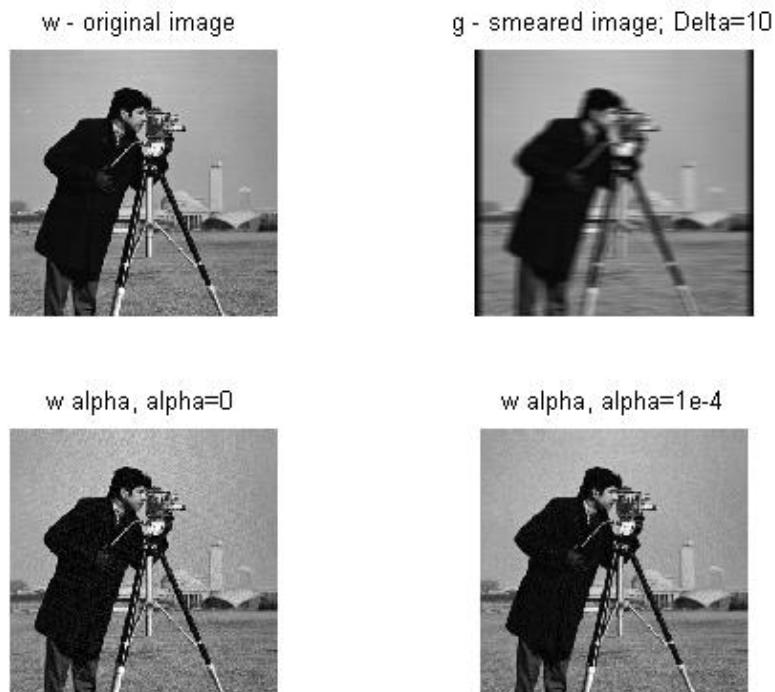


Рис. 6. Исходное изображение, смазанное изображение и реконструированное изображение методом квадратур и регуляризации Тихонова при $\alpha = 0$ ($\sigma_{\text{отн}} = 0.062$) и $\alpha = 10^{-4}$ ($\sigma_{\text{отн}} = 0.041$)

Заключение

1. В работах [4, 5, 14, 15] при моделировании прямой задачи для расчета интенсивностей вблизи краев изображения используется такой прием, как граничные условия (boundary conditions). Однако в случаях, когда этот прием создает резкие края у смазанного изображения, возникают помехи (эффект Гиббса и т.д.) на реконструированном изображении. Для устранения таких помех предложено моделировать размытые края у смазанного изображения, что повышает точность реконструкции.

2. В работах [4, 5] используются также такие методы реконструкции смазанных изображений, как метод фильтрации Винера, метод регуляризации Тихонова и др. При этом как прямая, так и обратная задачи в них решаются с использованием преобразования Фурье. Однако аппарат ПФ неадекватен физической сути задачи смазывания, в которой сама природа использует лишь операция накопления (суммирования) в пределах величины смаза Δ . Делается вывод, что наилучшие результаты должны давать методы, в которых как прямая, так и обратная задачи решаются с использованием лишь операций суммирования. Это – методы квадратур, итераций и т.п.

3. Построено два варианта алгоритма решения прямой задачи: с использованием лишь операции накопления (суммирования) в пределах величины смаза Δ и с использованием аппарата преобразования Фурье.

4. Построен устойчивый алгоритм решения обратной задачи (восстановление истинного изображения по смазанному изображению и функции рассеяния точки), использующий метод преобразования Фурье или метод квадратур (и регуляризацию Тихонова).

5. Разработаны программы в виде собственных m-функций в системе MATLAB.

6. Анализ результатов показал, что наилучшая реконструкция изображений (согласно визуальному критерию и численному критерию, связанному со значением $\sigma_{\text{отн}}$) получается в случае, когда прямая и обратная задачи решаются в одинаковом ключе, а именно, с использованием квадратур.

Литература

1. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Т. 2. – 792 с.
3. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
5. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Арефьева М.В., Сысоев А.Ф. Быстрые регуляризирующие алгоритмы цифрового восстановления изображений // Вычислительные методы и программирование. – 1983. – Вып. 39. – С. 40–55.
7. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
8. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. Обратные задачи обработки фотоизображений // Некорректные задачи естествознания / Под ред. А.Н. Тихонова, А.В. Гончарского. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 185–195.
9. Бакушинский А.Б., Гончарский А.В. Некорректные задачи. Численные методы и приложения. – М.: Изд-во МГУ. – 1989. – 199 с.
10. Сизиков В.С., Белов И.А. Реконструкция смазанных и дефокусированных изображений методом регуляризации // Оптический журнал. – 2000. – Т. 67. – № 4. – С. 60–63.
11. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. – СПб.: Политехника, 2001. – 240 с.
12. Петров Ю.П., Сизиков В.С. Корректные, некорректные и промежуточные задачи с приложениями: Учебное пособие для вузов. – СПб.: Политехника, 2003. – 261 с.
13. Petrov Yu.P., Sizikov V.S. Well-Posed, Ill-Posed, and Intermediate Problems with Applications. – Leiden–Boston: VSP, 2005. – 234 p.
14. Lee K.P., Nagy J.G., Perrone L. Iterative methods for image restoration: a Matlab object oriented approach, 2002. <http://www.matcs.emory.edu>
15. Donatelli M. et al. Improved image deblurring with anti-reflective boundary conditions and re-blurring // Inverse Problems. – 2006. – Vol. 22. – P. 2035–2053.
16. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Наук. думка, 1986. – 544 с.
17. Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А. Устойчивый алгоритм восстановления изображения при неточно заданной аппаратной функции // Автометрия. – 2006. – Т. 42. – № 6. – С. 3–15.
18. Римских М.В., Евсеев В.О., Сизиков В.С. Реконструкция смазанных изображений различными методами // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 11. – С. 53–57.
19. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990. – 232 с.

20. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 240 с.
21. Пикалов В.В., Непомнящий А.В. Итерационный алгоритм с вэйвлет-фильтрацией в задаче двумерной томографии // Вычислительные методы и программирование. – 2003. – Т. 4. – С. 244–253.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЫ

Н.Г. Тихонова

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.П. Вейко

В статье приведено обоснование использования аналитических методов в совокупности с биологическими при оценке загрязнения окружающей урбанизированной среды в рамках проектирования градостроительной документации.

Введение

Основной целью разработки документации территориального планирования является обеспечение устойчивого и безопасного развития территории, комфортных условий проживания населения. Особое внимание при разработке документации уделяется требованиям в области охраны окружающей среды.

Согласно Федеральному закону РФ «Об охране окружающей среды» №7-ФЗ от 10 января 2002 г., органы местного самоуправления ответственны за состояние всей подведомственной территории и обязаны оказывать содействие гражданам в реализации их прав в области охраны окружающей среды. Муниципальные власти вправе использовать данные экологического мониторинга для разработки прогнозов социально-экономического развития и целевых программ в области охраны окружающей среды. Полномочия и обязанности муниципальных властей в области охраны окружающей среды определены и в Федеральном законе №131 «Об общих принципах организации местного самоуправления» от 6 октября 2003 г.

В задачи раздела «Охрана окружающей среды», входящего в состав документации территориального планирования, входит выявление наиболее острых экологических проблем, причин их возникновения, определение наиболее проблемных участков. На основании анализа ситуации разрабатывается комплекс градостроительных мероприятий по улучшению экологической обстановки на проектируемой территории в целом, а также рекомендации по градостроительному освоению территории на перспективу. В рамках данного исследования рассматривается проектирование генерального плана муниципального образования города Йошкар-Ола.

Аналитические методы, использованные при оценке загрязнения окружающей среды в г. Йошкар-Ола

Очевидно, чтобы предложить наиболее эффективные мероприятия по оздоровлению окружающей среды в условиях города, необходимо провести компетентную оценку существующего ее состояния в целях управления ее качеством. На данный момент для оценки загрязнения окружающей среды, в основном, используется анализ ингредиентного или параметрического загрязнения экологических факторов (группа методов физико-химического или аналитического анализа).

Ингредиентное (химическое) загрязнение наблюдается вследствие увеличения концентрации вредных веществ, входящих в состав атмосферного воздуха, водной среды, почвенного и растительного покрова, выше предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ; параметрическое (физическое) – при увеличении значений параметров физических факторов, таких как шум, вибрация, электромагнитное и радиационное излучение, выше предельно допустимых уровней (ПДУ) воздействия. Затем полученные данные сравнивают с нормативно установленными значениями ПДК загрязняющих веществ в какой-либо среде или с превышениями ПДУ значений параметров физических факторов. На основании проведенного анализа делается вывод о

На последующих этапах проводилась разработка мероприятий, проведение которых необходимо для улучшения экологического состояния территории: озеленение территорий с целью улучшения качества воздуха; снижения шумового воздействия от промышленных предприятий, транспорта, строительства и организация санитарно-защитных зон; а также проведение мероприятий на конкретных промышленных установках, сбрасывающих или выбрасывающих загрязнения в окружающую среду для очистки выбрасываемых загрязнений и многое другое.

Завершает работу составление резюме в форме пояснительной записки для более детального описания нанесенных на карту комплексной оценки территории ограничений и проектных мероприятий.

Преимущества и недостатки аналитических методов исследования

Далеко не всегда применение аналитических методов дает адекватное представление о реальном состоянии природной среды, особенно в зонах слабого и умеренного техногенного загрязнения. Это обусловлено высокой дифференцированностью различных организмов по устойчивости к различным типам промышленного загрязнения, с одной стороны, и нелинейным характером зависимости биологических эффектов от дозы загрязняющих соединений в условиях комплексного загрязнения с одновременным действием экстремальных метеорологических условий – с другой [1].

Аналитические методы, во-первых, не учитывают совокупное влияние всех факторов на природу и человека, во-вторых, достаточно условно анализируют аккумулятивное воздействие от загрязнения, в-третьих, не учитывают нелинейную зависимость между воздействием фактора и реакцией организмов на данное воздействие, вследствие чего такие методы контроля экологических факторов в пределах ПДК и ПДУ является несколько ограниченными. Также эти методы не позволяют непосредственно наблюдать эффект от загрязнения, что является важнейшим недостатком данных методов.

В связи с этим в последние годы все более популярными становятся методы биологической индикации, которые имеют явное преимущество по сравнению с физико-химическими методами, поскольку с их помощью оценивается прямой отклик природного объекта на изменение качества внешней среды [1].

Обоснование использования биологических методов оценки санитарного состояния территории в совокупности с аналитическими

В изучении взаимоотношений городской среды и растений прослеживаются два направления. В первом случае растения рассматриваются как терморегуляторы и фитофильтры загрязнителей и шумов; оцениваются их ландшафтная, санитарно-гигиеническая, рекреационная и эстетическая ценность. Этот круг вопросов изучен достаточно полно.

Второе направление связано с изучением воздействий факторов городской среды на жизнедеятельность самих растений. Многие из изучаемых биологических и экологических характеристик отражают реальное состояние зеленых насаждений в городе и закономерности изменений, происходящих во времени, а также являются достоверными индикаторами качества городской среды и могут использоваться в вопросах мониторинга загрязнения воздуха и почв [2].

По данным лаборатории биомониторинга ВятГГУ, к биологическим методам, используемым для оценки загрязнения окружающей урбанизированной среды, могут быть отнесены: методы альгоиндикации, палинологический анализ (основанный на определении процента abortивности пыльцевых зерен), метод анализа отклика педобионтов, исследования состояния почвы по ее цветению, метод анализа флуктуирующей

асимметрии билатеральных морфологических признаков, метод стеклообрастания (применяемый в почвенной микробиологии), изучение состава снегового покрова или микроскопических водорослей (мониторинг атмосферного воздуха) и др.

Особую значимость имеет то обстоятельство, что биоиндикаторы отражают степень опасности соответствующего состояния окружающей среды для всех живых организмов, в том числе и для человека. Высокочувствительными к антропогенному загрязнению представителями биоты являются организмы-индикаторы, которые используются для идентификации изменений в окружающей среде, обусловленной действием смеси загрязнителей.

К чувствительным биоиндикаторам относятся лишайники, мхи, почвенные и водные микроорганизмы (водоросли, бактерии, микрогрибы). В роли биоиндикаторов могут быть использованы пыльца растений, хвоя сосны обыкновенной и др. Среди животных также выделяются группы организмов, положительно или отрицательно реагирующие на различные формы антропогенной трансформации среды (ракообразные, хируномиды, моллюски, личинки ручейников, поденок, веснянок и др.) [3].

Данные методики биотестирования отличаются высокой чувствительностью. Они позволяют регистрировать загрязнения воздуха в 3–5 раз ниже санитарно-гигиенических ПДК, практически без физико-химических анализов проб воздуха определять уровни загрязнения воздуха на обширных территориях, определять степень и опасность воздействия загрязнителей на экосистемы, изучать характер антропогенной дигрессии компонентов экосистем, разрабатывать экологические нормативы антропогенных воздействий на экосистемы и многое другое [2].

Преимуществом методов биоиндикации и биотестирования перед физико-химическими методами является интегральный характер ответных реакций организмов, которые суммируют все без исключения биологически важные данные об окружающей среде, отражают ее состояние в целом, реагируют на очень слабые воздействия в условиях хронической антропогенной нагрузки в силу аккумуляции дозы, фиксируют скорость происходящих в окружающей среде изменений и проч. [3]. К недостаткам биологических методов перед физико-химическими можно отнести те обстоятельства, что они, во-первых, не дают информации об источнике загрязнения, во-вторых, о количественном содержании каждого загрязнителя в среде, так как позволяют оценить суммарное воздействие от всех видов загрязнений. Но в исследованиях состояния окружающей среды в рамках проектирования градостроительных документов, о которых говорилось выше, к сожалению, не используются биологические методы.

Заключение

С помощью результатов, полученных при исследовании территории биологическими методами в совокупности с методами ингредиентного и параметрического анализа, можно осуществить более эффективный анализ состояния окружающей среды в условиях города.

На основании сказанного можно выделить границы территории, наиболее и менее загрязненные по состоянию биоты, которые являются прямым индикатором загрязнения среды. На базе этого можно начертить комплексную схему загрязнения территории, отражающую нагрузку на окружающую среду.

Методы ингредиентного и параметрического анализа не позволяют построить такой интегральной схемы, так как позволяют лишь вычислить коэффициент антропогенной нагрузки на территорию, который является достаточно условной характеристикой.

Задачу, которая была поставлена в начале статьи, можно решить путем проведения компетентной оценки существующего ее состояния, которое возможно при исполь-

зовании физико-химических и биологических методов исследования санитарного состояния территории в совокупности.

Литература

1. Жиров В.К., Голубева Е.И., Говорова А.Ф., Хаитбаев А.Х. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем севере. Полярно-альпийский ботанический сад-институт КНЦ РАН. – М.: Наука, 2007. – 166 с.
2. Неверова О.А. Экологическая оценка состояния древесных растений и загрязнения окружающей среды промышленного города: Дисс докт. биол. наук. – Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2005. – 332 с.
3. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Огородникова С.Ю., Тимонюк В.М., Кондаков И.А. Биоиндикация и биотестирование природных сред и объектов в организации экологического мониторинга на территории зоны защитных мероприятий объектов уничтожения химического оружия // Информационно-аналитический сборник «Федеральные и региональные проблемы уничтожения химического оружия». – 2004. – Вып. 6.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЛ-2 ПРИ НЕПОЛНОМ УДАЛЕНИИ СПОНТАННОГО РАКА МОЛОЧНЫХ ЖЕЛЕЗ МЫШЕЙ

Ю.О. Носкова, А.В. Чаадаева (Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова)

Научный руководитель – к.б.н., н.с. Е.В. Моисеева (Институт биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова)

Эффективность однократной терапии интерлейкином-2 для снижения темпов роста остаточных опухолевых масс при неполном удалении рака молочных желез была изучена на мышинной модели. Данный вид иммунотерапии существенно продлил выживание самок с медленно растущими опухолями с выраженным латентным периодом, особенно с преобладающими патоморфологическими признаками спонтанного отторжения.

Введение

Несмотря на значительные успехи в лечении и изучении причин и особенностей рака молочной железы (РМЖ) и даже некоторое снижение частоты этого заболевания в ряде стран, смертность от РМЖ продолжает увеличиваться [1]. Это обуславливает актуальность разработки новых и совершенствования существующих методов лечения РМЖ, в том числе и иммунотерапевтических подходов. Иммунотерапия интерлейкином-2 (ИЛ-2) широко применяется в клинической практике для лечения меланомы и рака почки, тогда как эффективность этого вида иммунотерапии при РМЖ изучена явно недостаточно, результаты исследований по данному вопросу неоднозначны и противоречат друг другу [2]. В связи с этим возникает необходимость поиска возможных прогностических факторов с целью предварительного отбора пациентов для применения иммунотерапии ИЛ-2 [3] с использованием адекватных мышинных моделей человеческого РМЖ.

В результате исследований противоопухолевого эффекта однократной локальной инъекции ИЛ-2 на перевитых [4] и спонтанных мышинных моделях РМЖ человека [5] было показано, что опухоли, проявляющиеся быстрее как видимые узелки, более чувствительны к действию данного цитокина. Кроме того, было замечено, что при хирургическом удалении первичных возникающие у мышей вторичные опухоли молочной железы более агрессивны и растут быстрее, чем первичные, особенно при неполном удалении первичной опухоли (Моисеева, неопубликованные данные). Известно, что в некоторых клинических случаях РМЖ по тем или иным причинам невозможно полное удаление опухолевой массы (особенно в ветеринарной практике [6]), что является причиной рецидивов и исключает возможность излечения пациента. В связи с этим исследование эффективности иммунотерапии РМЖ при неполном удалении опухоли является актуальным. В нашей лаборатории проводится изучение противоопухолевой активности различных препаратов на модели спонтанного РМЖ самок мышей родственных линий BLRB-Rb(8.17)1em и BYRB-Rb(8.17)1em, которая по патоморфологическим характеристикам адекватно отражает клиническую картину семейного РМЖ человека [5]. Мы предположили, что однократная локальная инъекция ИЛ-2 при неполном иссечении опухолевой массы поможет снизить интенсивность роста остаточной опухоли, предупредить появление вторичных опухолей и увеличить продолжительность жизни реципиентов. Таким образом, целью исследования было проверить данную гипотезу и выявить возможные прогностические факторы, определяющие исход иммунотерапии, как связанные с самим реципиентом, так и с патоморфологическими особенностями частично удаленной опухоли.

Постановка задачи

В связи с целью исследования были поставлены следующие задачи:

1. разработать модель неполного удаления РМЖ;
2. исследовать эффект однократной локальной инъекции ИЛ-2 во время частичной мастэктомии (ЧМЭ) спонтанного РМЖ мышей на выживание реципиентов;
3. оценить возможное влияние факторов, связанных с реципиентом (статус разведения и возраст возникновения первой опухоли) и особенностями роста опухоли (наличие/отсутствие латентного периода, динамика роста опухоли до и после операции) на выживание самок;
4. методом гистопатологического анализа охарактеризовать как удаленную опухоль, так и локализацию, количество и, по возможности, состав лейкоцитарных инфильтратов.

Материалы и методы

Линии мышей. В работе использовали самок мышей двух оригинальных родственных линий BLRB-Rb(8.17)1em и BYRB-Rb(8.17)1em, далее называемых BLRB и BYRB, соответственно. Обе линии характеризуются высокой частотой возникновения спонтанного РМЖ с возможным участием экзогенного MMTV-ретровируса, обнаруженного у них в лейкоцитарной фракции [5]. Частота возникновения опухолей молочных желез близка к 100% для много рожавших самок данных линий мышей. Средний возраст самок к моменту обнаружения первой опухоли около 9,5 и 11 месяцев для много рожавших самок линий BYRB и BLRB, соответственно [5]. Мыши содержались в тщательно контролируемых условиях в отделении Биомоделей лаборатории биотехнологии Института биоорганической химии. Мыши находились в условиях обычного светового режима, получали полнорационный гранулированный комбикорм, стандартные добавки (каша на молоке, растительное масло, витамины А,Е,Д,Ф) и воду без ограничений.

За каждой самкой наблюдали индивидуально в течение всей ее жизни: помету при отсадке от родителей и регистрации в племенном журнале присваивали ушную метку («фамилия», одинаковая для самок одного помета, рис. 1, б). Индивидуальные метки по пальцам задних лап («имя») самки получали при рассадке по парам с самцами (рожавшие) или в группы стареющих самок (девственные). Сведения о статусе разведения (девственная/рожавшая), физическом состоянии самки, появлении и росте опухолей еженедельно заносили в специальные протоколы. Базу данных хранили в программе Excel.

Выявление подкожных опухолей. Подкожные опухоли выявляли у стареющих самок после выведения их из разведения, а также по достижении девственными самками возраста ожидаемого появления опухоли (более 6 месяцев). Еженедельно оценивали физическое состояние самок и выявляли появляющиеся опухоли визуально и путем пальпации. Подкожные опухоли, которые определялись только на ощупь (меньше 4 мм), по крайней мере, две недели или дольше (т.е. имели латентный период), называли «постепенно проявляющимися», или лаг-положительными (лаг⁺). Опухоли, видимые глазом уже при первом обнаружении (средний размер 4–5 мм), называли «внезапно появившимися» или лаг-отрицательными (лаг⁻). Под латентным периодом (лаг-периодом) понимали – период от момента обнаружения опухоли методом пальпации до ее видимого проявления, продолжающийся две и более недели. Локализацию опухоли регистрировали латинскими буквами и номером в зависимости от близости к одному из 5 пар сосков (рис. 1).

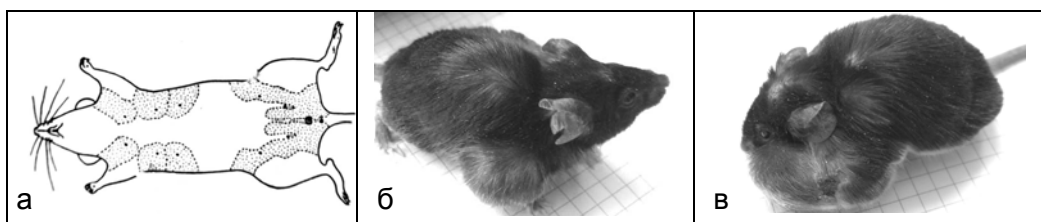


Рис. 1. Различная локализация опухолей: а – схема 5 пар сосков самки мыши (Biology of laboratory mouse, 1949); б – операбельная опухоль R2 самки BLRB; в – неоперабельная опухоль L1 самки BYRB

Определение размеров опухолей. Методика измерения размера опухолей как среднего диаметра по трем взаимно перпендикулярным параметрам была разработана Е.В. Моисеевой с соавторами [7]. Индивидуальный рост визуально определяемой ОМЖ выражали с помощью динамики роста среднего диаметра опухоли (СДО), вычисляемого по формуле $(a+b+h)/3$; где **a** – максимальная длина, **b** – максимальная ширина, а **h** – средняя высота более или менее симметричной опухоли (этот подход используется для визуализации фазы линейного роста опухоли [8]). Для несимметричных опухолей или нескольких локализаций подсчет СДО имел свои особенности. Сначала измеряли объемы более мелких сферических опухолей по формуле $V = 1/6\pi abh$ (Schreck, 1936) и суммировали их. Далее рассчитывали диаметр результирующей сферы, который и принимали за средний диаметр опухоли.

Частичная мастэктомия. Прооперировали 5 самок с целью разработки методики, затем были прооперированы еще 15 самок мышей с операбельными спонтанными опухолями. Перед операцией шерсть с операционного поля удаляли с помощью депиляционного крема. Мышей наркотизировали внутримышечной инъекцией Zoletil50:Vetrankvil:PBS (1:1:9) из расчета 0,01 мл на 10 г веса. Инъекцию делали в мышцы бедра задней лапы, предпочтительно противоположной локализации опухоли. При проведении частичной мастэктомии иссекали 50–80% опухолевой массы. Операционную рану с остатком опухоли закрывали непрерывным кожным швом. Использовали шовный материал – атравматическую нить Ethilon № 6.0. Во время операции производили локальную терапию ИЛ-2. Ежедневно проверяли физическое состояние прооперированных самок, еженедельно измеряли размер опухолей.

Локальная терапия ИЛ-2. ИЛ-2 был любезно предоставлен профессором В. Ден Оттером (Нидерланды). Из 20 прооперированных самок 10 были пролечены ИЛ-2, 10 самок лечения не получали и составили контрольную группу. После иссечения опухолевой массы в остаток опухоли опытным мышам вводили однократно 0,2 мл стерильного раствора, содержащего 1×10^6 МЕ ИЛ-2 с частичками туши для дальнейшей визуализации места инъекции при анализе гистологического образца. Контрольным мышам ($n=5$) – соответствующее количество физиологического раствора с частичками туши. Следует отметить, что в связи с особенностями опухолевой структуры полную дозу ИЛ-2 удалось ввести только в солидные опухоли, а в кистозные – примерно половину дозы, остальная часть из остаточной опухолевой массы выливалась в поле операции. Операционную рану с остатком опухоли закрывали непрерывным кожным швом. Одной самке не удалось ввести ИЛ-2, у одной с локализацией опухоли около левого уха цитологически была диагностирована лимфома (впоследствии подтвержденная гистологически и фенотипически как Т-лимфолейкоз). Эти 2 самки были выведены из дальнейшего рассмотрения. Эффективность лечения оценивали по темпам роста остаточной первичной и появившихся вторичных опухолей и улучшению выживания мышей в экспериментальной группе по сравнению с контролем.

Некропсия и патоморфологический анализ. С целью предотвращения естественной гибели опухоленосителей всех животных с опухолями более 15 мм и потерей

веса более 10% подвергали эвтаназии методом цервикальной дислокации. Некropsия включала патанатомический анализ состояния молочной железы, регионарных лимфатических узлов, головного мозга, органов грудной и брюшной полости. Отмечали наличие и характер видимых метастатических узелков в легких.

Операционный и изъятый в ходе вскрытия материал фиксировали в 4% растворе нейтрального формалина (РН=7.2); гистологические срезы готовили по стандартной методике. Окраску гематоксилином-эозином по Майеру по стандартной методике применяли для классификации опухолей, а также для визуализации геморрагических участков опухоли и выявления эозинофильных гранулоцитов (Эо) в лейкоцитарном инфильтрате опухоли (ЛИО). Для визуализации секреторной активности клеток и выявления макрофагов (Мф), в том числе эпителиоидных (эпМф), в инфильтрате опухоли использовали PAS-окрашивание (Шифф-реакцию) по стандартной методике [9].

Полученные препараты анализировали по методике, предложенной Е.В. Моисеевой с соавторами [4]. Опухоли молочных желез классифицировали по схеме, разработанной Е.В. Моисеевой и А.В. Чаадаевой [4, 10].

Статистический анализ. Статистическую значимость различий в значениях параметров двух групп определяли с помощью U-критерия Вилкоксона-Манна-Уитни [11].

Результаты и их обсуждение

Разработка методики частичной мастэктомии ЧМЭ. Методика частичной мастэктомии (ЧМЭ) была разработана с целью, удалить около 80% опухолевой массы. Последовательность операций представлена на рис. 2 на примере самки BYRB (MC75, L4=11,3 мм; выживание после ЧМЭ 4 нед.). Эта группа самок мышей ($n=5$) была прооперирована без введения частиц туши.

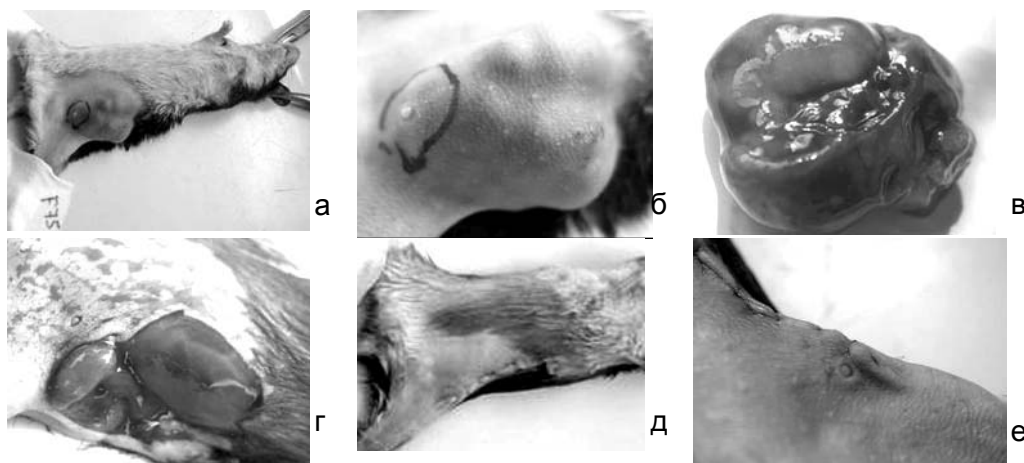


Рис. 2. Этапы частичной мастэктомии: а – план операции, общий вид; б – L4 сосок будет оставлен после ЧМЭ; в – удаленная кистозная часть составляет 80% опухолевой массы; г – оставшаяся часть опухоли с соском L4; д – конец операции, общий вид; е – остаток опухоли с соском

Выживание мышей в зависимости от полученной дозы ИЛ-2. По средней продолжительности жизни, леченные ИЛ-2 реципиенты получили незначительное преимущество (7.1 ± 0.8 нед. при 5.9 ± 0.5 нед. в контроле). Динамика выживания опытной и контрольной групп различалась только после достижения 50%-го выживания (рис. 3, а). Реципиенты были представлены коротко (менее 6 нед., 50% мышей) и долгоживущей (более 6 нед., 50% мышей) подгруппами как в контроле, так и в эксперименте (рис. 3, б, таблица).

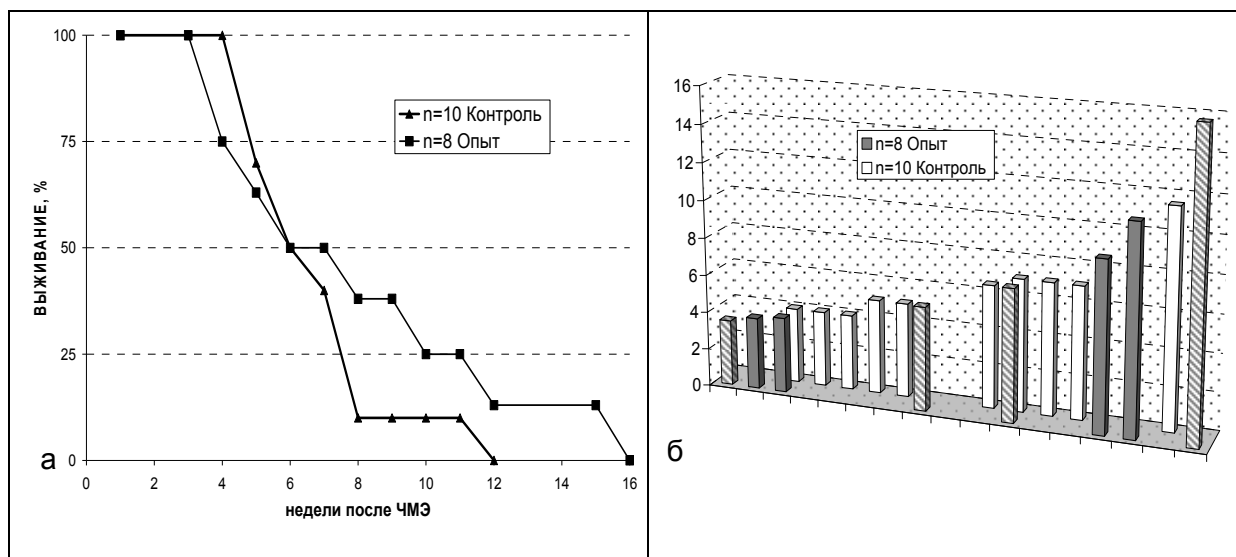


Рис. 3. Выживание мышей после частичной мастэктомии и лечения ИЛ-2: а – динамика выживания; б – индивидуальное выживание, 4 мыши (заштрихованные столбики) получили полную дозу ИЛ-2 в опухоль

При этом леченные ИЛ-2 коротко выжившие самки демонстрировали слабую тенденцию к ухудшению выживания по сравнению с выживанием нелеченных коротко выживших самок, тогда как динамика выживания леченных долго выживших реципиентов была лучше контрольной. Необходимо отметить, что в связи с особенностями структуры опухоли не всегда удавалось ввести полную дозу ИЛ-2 в остаток опухолевой массы (рис. 3, б, рис. 4). Введение полной и неполной доз ИЛ-2 внутрь опухоли зависело от морфологической структуры образования (показано на рис. 4).

Таким образом, в солидные опухоли была введена полная доза ИЛ-2, в кистозные – примерно половина дозы в опухоль, остальное содержимое инъекции выливалось в поле операции перитуморально. Однако, как следует из рис. 3, б, видимо, это не являлось причиной неэффективности ИЛ-2 у коротко выживших самок, так как среди мышей экспериментальной группы, как с полной, так и с неполной инъекцией ИЛ-2 в опухоль есть мыши, коротко и долго выжившие.

Влияние факторов реципиента и опухоли на выживание. Популяции леченных и контрольных самок до проведения ЧМЭ в среднем не различались ни по одному из учитываемых параметров: соотношению девственных и рожавших самок, возрасту на момент появления опухоли и операции, размеру опухоли на момент операции (таблица). Однако наблюдалась явная тенденция к преобладанию более старых самок в пролеченной группе (возникновение опухоли в возрасте более года, т.е. более 52 нед.). Не вызывает удивления тот факт, что 3 из 3 пролеченных самок с коротким выживанием оказались старыми (на 10 недель старше самок аналогичной подгруппы контрольной группы). Вероятно, отбор более молодых самок для проведения иммунотерапии мог бы оказать положительное влияние на выживание. Другие параметры реципиента также способствовали более продолжительному выживанию. Например, девственный статус самки явно являлся положительным прогностическим фактором в целом по полученным данным, девственные самки преобладали в долгоживущих подгруппах как леченной, так и контрольной групп.

Параметры роста и проявления опухоли тоже оказали заметное влияние на исход лечения. Так, самки с лаг+ опухолями, в основном, оказались в долго прожившей подгруппе, тогда как в контрольной они приблизительно поровну попали и в коротко, и в долго выжившие подгруппы. Заметно меньший размер опухолей в коротко выжившей

опытной подгруппе наводит на мысль о том, что они, вероятно, были прооперированы и пролечены слишком рано. По крайней мере, на уровне тенденции, прослеживается системное действие ИЛ-2, так как только у 1/3 пролеченных самок возникли вторичные опухоли (в контроле – у половины). Более того, одна из самок контрольной группы (выживание 5 нед.) и опытной группы (выживание 7 нед.) имели по 2 опухоли разных локализаций на момент операции, представляя, таким образом, не модельную, а реальную ситуацию, близкую к наблюдаемой в ветеринарной практике. У этих самок удаляли полностью одну опухоль, а ИЛ-2 вводили локально во вторую, не удаляемую. Пролеченная ИЛ-2 самка выжила лучше контрольной.

Параметры	Контроль n=10	Опыт n=8	Контроль		Опыт	
			Коротко 5 / 10	Долго 5 / 10	Коротко 4 / 8	Долго 4 / 8
Реципиента						
Статус: дев. / рож.	4 / 6	4 / 4	1 / 4	3 / 2	1 / 3	3 / 1
Возраст с ОМЖ, нед.	50.4	54.8	49.0	51.1	58.3	51.3
Возраст на момент ЧМЭ, нед.	53.1	60.1	52.6	53.4	62.8	59.9
Старые / молодые	6 / 4	6 / 2	3 / 2	3 / 2	3 / 0	3 / 2
Время с ОМЖ до ЧМЭ, нед.	2.7	5.8	2.5	3.9	3.3	8.6
ПЖ после ЧМЭ, нед.	5.9	7.1	4.4	7.8	4.2	10.8
Полная ПЖ, нед.	59.6	67.8	56.8	61.3	65.3	69.9
Опухоли						
Лаг-период: лаг+ / лаг-	4 / 6	4 / 4	2 / 3	2 / 3	1 / 3	3 / 1
Диаметр на момент ЧМЭ, мм	8.0	6.4	7.8	8.3	6.0	6.8
Больше одной ОМЖ / 1 ОМЖ	5 / 5	2 / 6	2 / 3	3 / 2	1 / 3	1 / 3
Прирост после ЧМЭ, %/нед	21	21	27	16	27	16
Прирост после ЧМЭ, %	106	127	112	101	111	143
Макс. диаметр, мм	15.5	14.3	15.0	15.9	12.4	16.4

Таблица. Факторы реципиента в зависимости от короткого и долгого выживания реципиентов

Темпы роста остаточной опухолевой массы не различались в опыте и контроле (прирост в неделю в процентах от размера на момент операции). У самок с коротким выживанием опухоли прирастали в среднем на 27% и в опыте, и контроле и на 16% – у самок с долгим выживанием. Как в опыте, так и в контроле опухолевая масса приросла на 100 %, т.е. увеличившись в среднем в 2 раза (по сравнению с изначальным размером на момент проведения ЧМЭ); опухоли достигли примерно одинаковых размеров перед гибелью животных.

Таким образом, проведенный анализ выявил ряд важных прогностических факторов и показал, что гормональный статус девственных самок мог благоприятно сказаться на выживании как пролеченных ИЛ-2, так и контрольных животных. Наличие у опухоли таких особенностей, как медленного проявления и роста, также было связано с более долгой продолжительностью жизни после операции. Ряд моментов обозначил перспективы применения данного вида иммунотерапии в дальнейшем: следует применять его при неполном удалении неоперабельных солидных медленно проявляющихся опухолей при размере более 5–6 мм более молодых самок.

Отрицательные результаты иммунотерапии у рожавших и старых самок в применяемой модельной системе имеют важные последствия. Полученные данные приводят к выводу о том, что, используя при тестировании новых противоопухолевых подходов только опухоли, перевиваемые девственным и молодым животным, легко получить положительные результаты, никоим образом не воспроизводящие реальный, естественно возникающий РМЖ не только человека, но и ветеринарных пациентов. Это подчеркивает необходимость обязательного тестирования противоопухолевых препаратов на адекватных модельных системах.

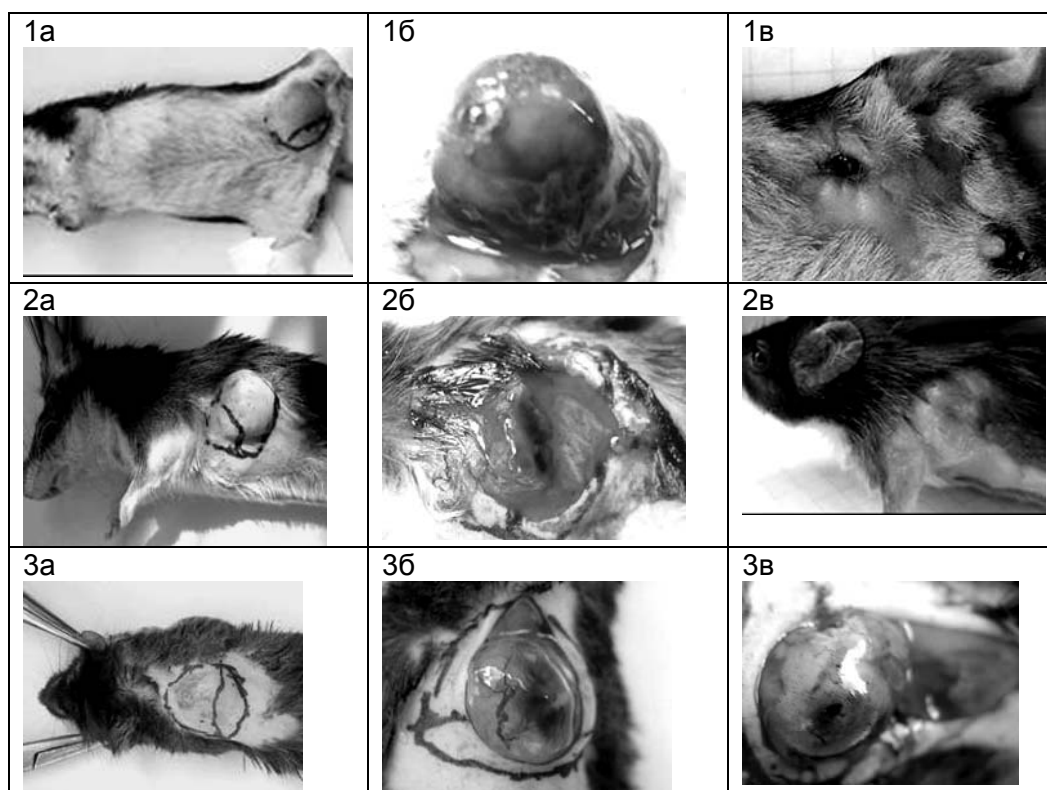


Рис. 4. Зависимость выживания леченых ИЛ-2 самок от морфологической структуры ОМЖ: а – план ЧМЭ, б – особенности строения ОМЖ на момент операции 1, 2в – общий вид ОМЖ две нед. после ЧМЭ; 3в – остаток опухоли МС91 после введения ИЛ-2 с тушью

Зависимость выживания леченых ИЛ-2 самок ВУРВ от морфологической структуры ОМЖ и способа введения ИЛ-2 (интра- или перитуморально в поле операции) продемонстрирована на рис. 4 на примере трех самок с коротким (4 нед., МС94, рис. 4, 1), долгим (9 нед., МС90, рис. 4, 2) и самым долгим выживанием (19 нед.).

В итоге способ введения ИЛ-2 различался для солидных опухолей, где полная доза ИЛ-2 была введена интратуморально, и кистозных – примерно половина дозы в опухоль (интратуморально), остальное содержимое инъекции выливалось в поле операции

и действовало, таким образом, перитуморально. Однако, как следует из рис. 3, б, видимо, это не являлось причиной неэффективности ИЛ-2 у коротко выживших самок, так как среди мышей экспериментальной группы, как с полной, так и с неполной инъекцией ИЛ-2 в опухоль, есть мыши коротко и долго выжившие.

Полученные данные приводят к выводу о том, что выживание вряд ли зависело от дозы ИЛ-2, введенной внутрь остаточной опухолевой массы. Однако можно предположить, что обработка ИЛ-2 во время проведения ЧМЭ только солидных опухолей, вероятно, может оказаться в дальнейшем более эффективной. Кроме того, вероятно, более целесообразно вводить ИЛ-2 в район статочной опухоли после закратия раны швом. Может быть, следует проводить повторную локальную инъекцию.

Зависимость выживания от прогрессии опухоли. Неоднозначность влияния количества ЛИО на выживание. Предпринимая попытку оценить, как количество/композиция ЛИО повлияет на прогноз после ЧМЭ, следует иметь в виду, что при сходных количествах и композиции расположение и происхождение (эту информацию о ЛИО мы должны почерпнуть из патоморфологического анализа), и, естественно, функция данного инфильтрата в опухоли может быть различной.

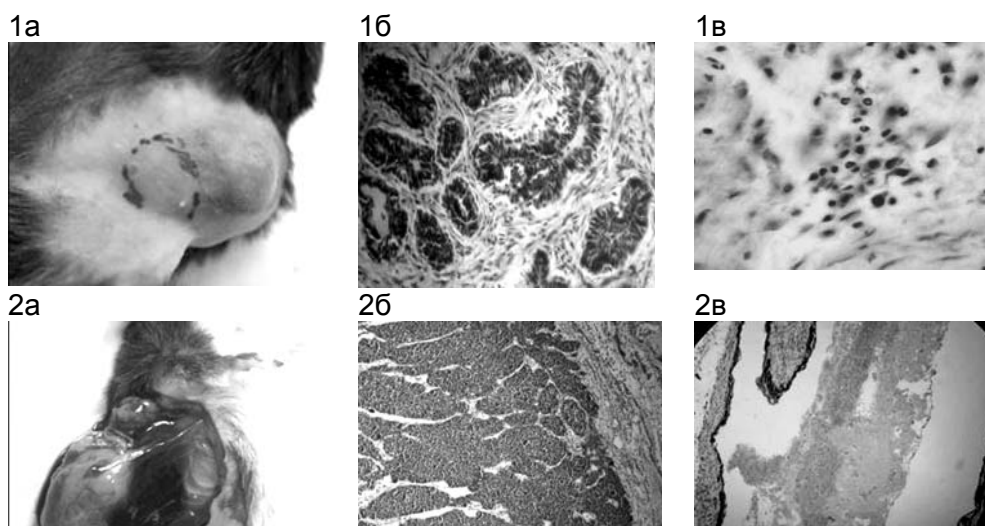


Рис. 5. Стадии прогрессии кистозно-папилломатозной первичной опухоли от солидной формы (MC76, 1, а–в) до крайней степени выраженности кистозного строения (MC77, 2, а–в): 1а – общий вид твердой на ощупь ОМЖ L4=11мм до операции; 1б – солидная карцинома с выраженной стромой и начальными признаками кистозности; 1в – выраженные ЛИО в строме: Эо, лимфоциты и Мф, в том числе эпМф; 2а – кистозное строение мягкой на ощупь ОМЖ R3 во время удаления; 2б – солидные и 2в – кистозные области этой карциномы со слабо выраженной стромой

И, далее, степень выраженности ЛИО может зависеть от степени прогрессии опухоли, наличия областей с кистозным и геморрагическим строением. Для иллюстрации высказанного тезиса предлагается рассмотреть две карциномы, прооперированные в один и тот же день, явно представляющие начальную (MC76, L4=11 мм, самка BLRB, выживание 7 нед., рис. 3, 1, а–в) и крайнюю степень выраженности кистозного строения (MC77, R3= 15 мм, самка BYRB, выживание 5 нед., рис. 3, 2, а–в) ОМЖ сходного типа. В интактной опухоли ЛИО инфильтрировали строму по всей толще опухоли (истинные ЛИО).

В более поздней опухоли MC77 подобного типа с кистозными структурами, наполненными кровью, было обнаружено на порядок больше лейкоцитов в ЛИО, что, однако, явно не свидетельствует о благоприятном прогнозе. Поэтому у самки с более кист-

тозной ОМЖ, было обнаружено в ЛИО на порядок больше лейкоцитов, что, однако, явно не свидетельствует о благоприятном прогнозе (самка прожила всего 5 нед. после ЧМЭ). Действительно, в интактной опухоли эти лейкоцитарные массы (сходные по композиции с ЛИО опухоли М76, не показаны на рис. 3) располагались по преимуществу в геморрагических областях, так как явно были принесены извне в толщу опухоли с кровью.

Такие и сходные инфильтраты принято считать ассоциированными с опухолью (ЛАО); они не являются благоприятным фактором прогноза. Случай МС77 дополнительно интересен тем, что самка имела на момент операции 2 ОМЖ разных локализаций, из которых только одна, подробно рассмотренная выше, была удалена.

Патологоморфологический анализ образцов РМЖ самок с самым долгим выживанием. Гистологический анализ ОМЖ двух долгоживущих (одна – в контроле и одна – в опыте с самым долгим выживанием, рис. 4, 3, а–в) выявил наличие признаков спонтанного отторжения опухоли в образцах удаленных опухолей. Следовательно, ИЛ-2 оказался наиболее эффективным только при наличии предсуществующего иммунного ответа организма на опухоль.

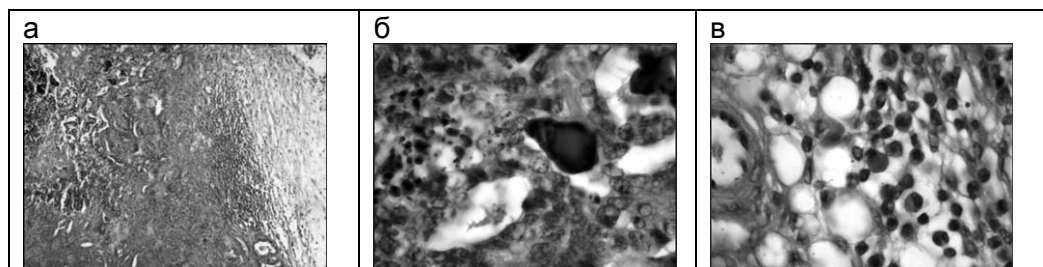


Рис. 6. Папиллярный РМЖ пролеченной ИЛ-2 самки МС91 с самым долгим выживанием со значительными инфильтрациями и признаками некроза, окраска по Шиффу: а – малое увеличение, общий вид; б – масляная иммерсия, некроз с признаками кариорексиса и кальцифицированными тельцами; в – истинный ЛИО, Шифф-реакция выявляет плазматические клетки и макрофаги

Заключение

Влияние иммунотерапии путем однократной инъекции интерлейкина-2 внутрь опухоли при неполном удалении спонтанного РМЖ было неоднозначным. Леченные ИЛ-2 коротко выжившие самки демонстрировали тенденцию к ухудшению выживания по сравнению с выживанием нелеченных коротко выживших самок, тогда как динамика выживания леченных долго выживших реципиентов была лучше контрольной. Кроме того, проведенный анализ выявил ряд важных прогностических факторов. Было показано, что дольше прожили более молодые девственные самки, несущие медленно растущие опухоли с выраженным латентным периодом, особенно с предсуществующими патоморфологическими признаками спонтанного отторжения опухоли. Эти характеристики животных в дальнейшем смогут послужить аргументами в пользу выбора данного вида иммунотерапии при проведении неполной мастэктомии (при удалении труднодоступных опухолей в клинике). Гормональный статус рожавшей самки и кистозная морфология ее опухоли могут расцениваться как отрицательные прогностификаторы.

Литература

1. Breast Cancer Facts & Figures. 2007 – 2008 Режим доступа: <http://www.cancer.org/downloads/STT/BCFF-Final.pdf>

2. Hadden J.W. The immunology and immunotherapy of breast cancer: an update // *Int J Immunopharmacol.* – 1999. – V.21. – P.79–101.
3. Kedar E., Klein E. Cancer immunotherapy: are the results discouraging? Can they be improved? // *Adv Cancer Res.* – 1992. – V.59. – P. 245–322.
4. Moiseeva E.V., Merkulova I.B., Bijleveld C., Koten J.W., Miroshnikov A.I., Den Otter W.: Therapeutic effect of a single peritumoural dose of IL-2 on transplanted murine breast cancer // *Cancer Immunol Immunother.* – 2003. – V.8. – P.487–496.
5. Moiseeva E. Original approaches to test anti-breast cancer drugs in a novel set of mouse models. Pathobiology, Utrecht University, The Netherlands 191 pp. Режим доступа: <http://igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/20051130-200033/index.htm>, 2005.
6. Misdorp W. Incomplete surgery, local immunostimulation, and recurrence of some tumour types in dogs and cats. *Vet Q.* –1987. – V.9. – P. 279–286.
7. Moiseeva E.V., Farber S.M., Lomova L.V., Nikonenko B.V., Klepikov N.N. Some biological characteristics of BLRB and CBRB mice. *Lab Animals (Balt Lab Anim Sci)* 1991 – V.1. – P.24 – 27.
8. Vodovozova E.L., Moiseeva E.V., Grechko G.K., Gayenko G.P., Nifant'ev N.E., Bovin N.V., Molotkovsky J.G. Antitumour activity of cytotoxic liposomes, equipped with selectin ligand SiaLeX, in mouse mammary adenocarcinoma // *Eur J Cancer.* – 2000. – V.36. – P.942–949.
9. Сапожников А.Г., Доросевич А.Е. Гистологическая и микроскопическая техника: Руководство. – 2000.
10. Moiseeva E.V., Rapoport E.M., Bovin N.V., Miroshnikov A.I., Chaadaeva A.V., Krasilshchikova M.S., Bojenko V.K., Bijleveld C., van Dijk J.E., Den Otter W. Galectins as markers of aggressiveness of mouse mammary carcinoma: towards a lectin target therapy of human breast cancer // *Breast Cancer Res Treat.* – 2005. – V.91. – P.227–241.
11. Гублер Е.В., Генкин А.А. Критерий U Вилкоксона-Манна-Уитни. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях – 1973. – С.72 –75.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НЕЛИНЕЙНОГО СОКРАЩЕНИЯ САРКОМЕРА

С.А. Охотников (Уральский государственный университет им. А.М. Горького)
Научный руководитель – к.ф.-м.н., профессор Г.П. Быстрый
(Уральский государственный университет им. А.М. Горького)

В последнее время одной из основных задач физики саркомеров является выяснение общих принципов сокращения саркомеров и описание химических реакций с участием АТФ. Была выдвинута гипотеза, что в саркомере при фиксации актиновых нитей существуют нелинейные колебания миозинактиновой системы с диссипацией, которые забирают часть энергии, выделяющейся при химической реакции. Предполагалось, что при колебаниях вся энергия поступает в раствор, что ведет к повышению температуры. В рамках модели приводятся результаты оценки ее адекватности с экспериментом, а также производится сравнение с классическими теориями (А.Хилл, Б.С. Эббот и Д.Р. Уилки) и со вторым законом термодинамики. В заключительной части приводится анализ предложенного нами цикла реакций, происходящего при сокращении саркомера в присутствии АТФ, нелинейных кинетических уравнений, их решений и полученных следствий, важных для понимания неравновесных процессов.

Динамика нелинейного сокращения саркомера

В статье [1] была рассмотрена динамика нелинейного сокращения саркомера, находящегося в растворе. Авторами было выдвинуто предположение, что для нелинейных процессов одномерной деформации по оси растяжения коэффициент упругости, следуя [2], представляется в виде полинома:

$$\mu(\varepsilon) = \mu_0(1 - k\varepsilon + \chi\varepsilon^2), \quad (1)$$

где ε – модуль относительной одномерной деформации вдоль оси растяжения, μ_0 – коэффициент упругости для линейных систем, а k и χ – некоторые коэффициенты, характеризующие зависимость модуля упругости в направлении оси растяжения от величины деформации.

Подставляя (1) в динамическое уравнение продольного сокращения относительно оси растяжения

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varepsilon}{dt} = -\mu\varepsilon + \sigma_e,$$

получаем термодинамическое нелинейное уравнение, описывающее сокращения саркомера, в виде

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\varphi(\mu_0\chi\varepsilon^3 - \mu_0k\varepsilon^2 + \mu_0\varepsilon - \sigma_e), \quad (2)$$

где φ – некоторая размерная константа, σ_e – внешние напряжения. Также была введена в модель потенциальная функция G – свободная энергия, связанная с упругой нелинейной деформацией выражением вида

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\varphi \frac{\partial G}{\partial \varepsilon}, \quad G = \frac{\mu_0\chi\varepsilon^4}{4} - \frac{\mu_0k\varepsilon^3}{3} + \frac{1}{2}\mu_0\varepsilon^2 - \sigma_e\varepsilon. \quad (3)$$

Стационарная скорость укорочения. Вводя для напряженного саркомера скорость укорочения и внутренние напряжения в виде

$$v \equiv \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad \sigma \equiv \sigma_i = \mu_0\varepsilon,$$

представим, после деления правой и левой частей на v_{\max} , уравнение (2) в виде

$$\frac{v}{v_{\max}} = -A \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^3 + B \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 - C \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + D, \quad (4)$$

где соответствующие константы равны

$$A = \frac{\varphi\chi\sigma_0^3}{\mu_0 v_{\max}}; \quad B = \frac{\varphi k\sigma_0^2}{\mu_0 v_{\max}}; \quad C = \frac{\varphi\sigma_0}{v_{\max}}; \quad D = \frac{\varphi\sigma_e}{v_{\max}}.$$

При $\sigma/\sigma_0 = 0$ $v/v_{\max} = 1$, тогда $D=1$. В результате получаем теоретическую зависимость скорости укорочения от σ/σ_0 (рис. 1, кривая 2: $A=7.3$; $B=8.15$; $C=3.95$), которая соответствует экспериментальным результатам [3].

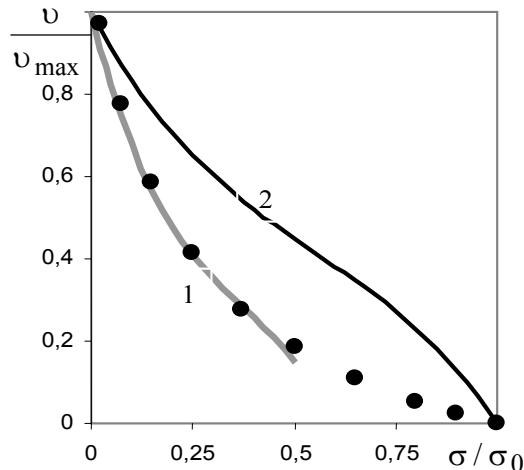


Рис. 1. Зависимость относительной скорости v/v_{\max} от относительной силы (напряжения) σ/σ_0 . Кривые 1 и 2 отличаются различными значениями констант и показывают рабочие диапазоны действия нелинейной модели. Точки соответствуют экспериментальным результатам [3]

Редукция к классическим моделям

Модель А.Хилла. Полагая в уравнении (4) $A=0$ и $B=0$, получаем

$$\frac{v}{v_{\max}} = -C \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + D.$$

Делая замену в последнем выражении следующим образом

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{P}{a\alpha}, \quad C = \alpha \frac{b}{v_{\max}} \left(1 + \frac{P_0}{a} \right), \quad D = \frac{b}{v_{\max}} \frac{P_0}{a},$$

где α – малый параметр, получаем уравнение А. Хилла [4]

$$\frac{v}{v_{\max}} = -\frac{b}{v_{\max}} + \frac{b}{v_{\max}} \frac{P_0 + a}{P + a}.$$

Коэффициент D был выбран из следующих соображений: $\sigma/\sigma_0 = 0$ $v/v_{\max} = 1$, тогда $D=1$. Это условие удовлетворяет выражению для максимальной скорости стационарного укорочения

$$v_{\max} = b \frac{P_0}{a}.$$

Модель Б.С. Эббота и Д.Р. Уилки. Принимая в выражении (4) коэффициент $A=0$, получаем

$$\frac{v}{v_{\max}} = B \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 - C \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + D.$$

Для перехода к модели Б.С. Эббота и Д.Р. Уилки необходимо сделать замену

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{F}{a\alpha}, B = \alpha^2 \frac{b}{v_{\max}}, C = \alpha \frac{b}{v_{\max}} \left(1 + \frac{F_l}{a}\right), D = \frac{b}{v_{\max}} \frac{F_l}{a}.$$

С помощью этой замены получаем уравнение Б.С. Эббота и Д.Р. Уилки [5]

$$\frac{v}{v_{\max}} = \frac{b}{v_{\max}} \frac{F_l - F}{a + F}.$$

Таким образом, данная модель может считаться обобщением модели А.Хилла, так как содержит еще и квадратичный член по напряжению.

Соответствие II началу термодинамики. Уравнение (2) должно быть совместимо с условием положительности производства энтропии

$$\frac{d_i S}{dt} = J(\varepsilon)\varepsilon = \mu'_0 \varepsilon^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}k\varepsilon + \frac{1}{4}\chi\varepsilon^2 \right) \geq 0,$$

где константа $\mu'_0 = \mu_0/T_0$ имеет размерность Дж/К, а параметр T_0 – температура, при которой происходит сокращение саркомера. Выражение для производства энтропии $d_i S/dt$ может быть представлено выражением:

$$G^{*i} = \frac{1}{4}\varepsilon^{*2}(\varepsilon^{*2} - 4\varepsilon_0^* \varepsilon^* + 6) \geq 0, \quad (5)$$

где $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_c$, $\varepsilon_c^2 = 1/3\chi$, $\varepsilon_0^* = \varepsilon_0/\varepsilon_c = k/3\chi\varepsilon_c$. Далее необходимо рассматривать решения неравенства вида $\varepsilon^{*2} - 4\varepsilon_0^* \varepsilon^* + 6 \geq 0$, входящего в (5), в зависимости от дискриминанта $D = b^2 - 4ac$; $a = 1$, $b = -4\varepsilon_0^*$, $c = 6$. Для его выполнения необходимо, чтобы параметры, входящие в него, удовлетворяли следующим неравенствам:

$$\varepsilon_0^{*2} \leq \frac{3}{2}, \text{ или } k^2 \leq \frac{9}{2}\chi.$$

Делая замену переменной в (5) $\varepsilon^* = \eta + \varepsilon_0^*$, получаем

$$G^{*i} = \frac{1}{4}\eta^4 + \frac{1}{2}a^*\eta^2 + \sigma_s \eta + G_0^* \geq 0, \quad (6)$$

здесь $a^* = -3(\varepsilon_0^{*2} - 1)$, $\sigma_s = 3\varepsilon_0^* - 2\varepsilon_0^{*3}$, $G_0^* = 3\varepsilon_0^{*2}(2 - \varepsilon_0^{*2})/4$, а η – параметр порядка. Выражение (6) не содержит внешнее поле $\sigma_e \equiv \sigma = 0$. Положительности производства энтропии отвечает условие $a^* \geq -3/2$ (см. рис. 2). Отсюда следует, что функции $G^{*i} \geq 0$, $\dot{G}^{*i} \leq 0$ являются функциями Ляпунова. Приведем аналог теоремы Пригожина для нелинейных систем, которая впервые сформулирована в [6].

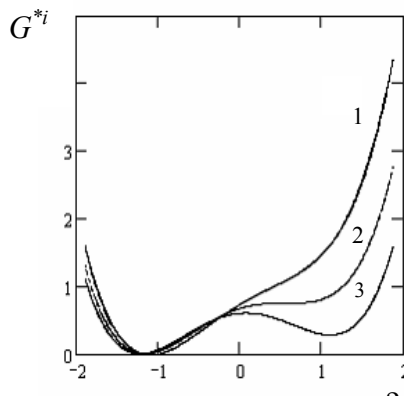


Рис. 2. Производство энтропии в канонической форме. 1 – $\varepsilon_0^* = 1.08$, 2 – $\varepsilon_0^* = 1.155$, 3 – $\varepsilon_0^* = 1.204$. Нулевые значения производства энтропии соответствуют $\varepsilon^* = 0$ в выражении $\eta = \varepsilon^* - \varepsilon_0^*$. Второму экстремуму G^{*i} соответствует стационарному состоянию

Теорема. Временная эволюция в нелинейной термодинамической системе при заданных постоянных граничных условиях происходит так, что производство энтропии G^{*i} стремится убывать

$$\frac{dG^{*i}}{dt} \leq 0,$$

и достигает минимального (положительного) значения в ближайшем стационарном состоянии, локальная или глобальная устойчивость которого определяется теоремой Тома. Движение к локальному/глобальному минимуму осуществляется посредством дрейфа/диффузии.

Приведенная знакопеременная потенциальная функция, равная относительной (безразмерной) скорости изменения энтропии системы также примет вид:

$$G^* = \frac{dS^*}{dt^*} = G^{*e} + G^{*i} = \frac{1}{4}\eta^4 + \frac{1}{2}a^*\eta^2 + b^*\eta \Big|_{\leq 0}^{\geq 0}, \quad G^{*e} = -(G_0^* + \sigma^*\eta) \Big|_{\leq 0}^{\geq 0}.$$

Здесь обратимые потоки энтропии G^{*e} также могут принимать разные знаки, поэтому потенциальная функция G^* может иметь любой знак.

Хаотическая динамика параметра порядка. Используя переход от релаксационных уравнений к уравнениям второго порядка и учитывая эффект последействия [6], получаем однородное каноническое уравнение второго порядка для величины деформации η в первом приближении:

$$\tau_r \ddot{\eta} + \Gamma(t)\dot{\eta} + \eta^3 + a^*\eta = \sigma_0^* \cos \omega t, \quad (7)$$

здесь коэффициент затухания и амплитуда внешней силы равны соответственно

$$\Gamma(t) = 1 - \tau(3\eta^2 + a^*) > 0, \quad \sigma_0^* = \sigma_0^*(1 + \tau \omega t g(\omega t)).$$

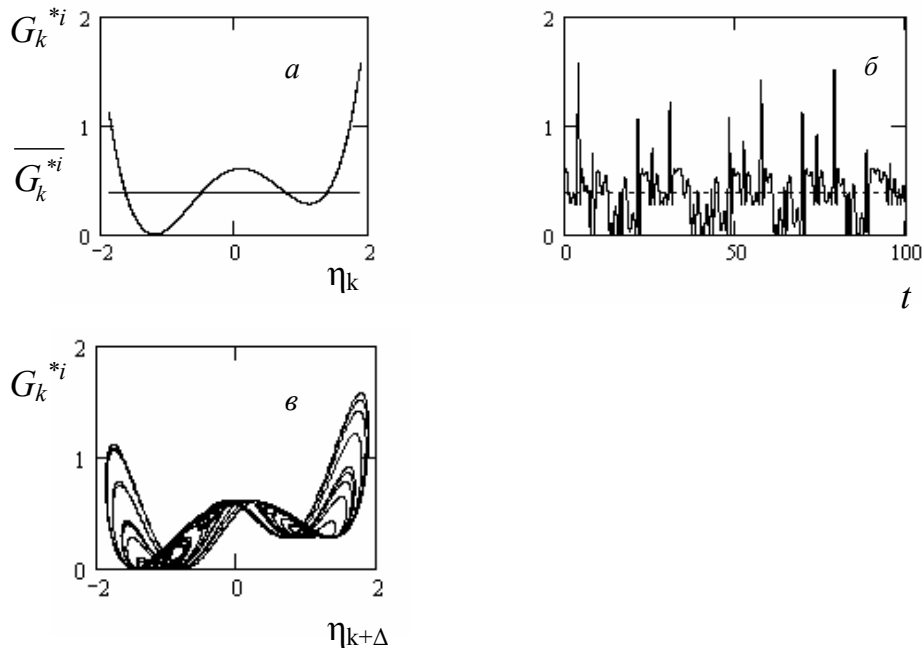


Рис. 3. Поведение приведенного функционала производства энтропии G_k^{*i} (а, б) в условиях воздействия периодической внешней силы $b^* = 1.9$, $\omega = 2.35$, $\tau_r = 1.1$, $\tau = 0.216$, $\varepsilon_0^* = 1.204$, $t \equiv t/t_0$, $t_0 = 0.34$ с. Начальные условия для трех переменных: 0.1, 0.02, 0.01. Линией указано среднее значение функционала во времени $\overline{G_k^{*i}} = 0.381$; продолжительность всей истории движения $h = t(n) = 100$, шаг разбиения $\Delta t = 0.01$; в) вид функционала от параметра порядка, определенного в предшествующий момент времени с задержкой $\Delta = 20$ расчетных точек

Рассмотрим поведение производства энтропии при наличии хаоса (рис. 3). Расчет производился по функционалу

$$G_k^{*i} = \frac{1}{4}\eta_k^4 + \frac{1}{2}a^* \eta_k^2 + \sigma_s^* \eta_k + G_0^*,$$

в который подставлялись значения решений уравнения (7) (k – индекс шага расчета); здесь

$$a^* = -3(\varepsilon_0^{*2} - 1), \sigma_s^* = 3\varepsilon_0^* - 2\varepsilon_0^{*3}, G_0^* = \frac{3}{4}\varepsilon_0^{*2}(2 - \varepsilon_0^{*2}).$$

На рис. 3, *в* представлено возмущенное состояние саркомера с временной задержкой $\Delta = 20$. В отличие от невозмущенного состояния (рис. 3, *а*) данный график характеризуется замкнутыми областями, отвечающими за определенные невозмущенные стационарные состояния. Центры этих областей являются глобальными или локальными минимумами.

Согласно второй теореме об устойчивости функционала [7], производство энтропии и его производную можно оценить некоторыми числами сверху. Таким образом, перебирая различные значения параметра ε_0^* можно получить различные средние значения функционала G_k^{*i} , которые будут ограничены числами снизу (0 – равновесное состояние) и сверху $\overline{G_k^{*i}}$.

Пульсации температуры

В данной работе считалось, что существенное изменение средней температуры происходит на расстояниях ε_0 (основной масштаб сокращения), на которых меняется средняя скорость сокращения саркомера в растворе за цикл. Вследствие того, что в саркомере происходят пульсации сдвига на характерных пространственных масштабах, истинная температура T вследствие диссипации турбулентных пульсаций также повышается и испытывает отклонение от некоторого среднего значения T_0 : $T' = T - T_0$. При расщеплении АТФ происходит конформационное превращение белка, производящее работу. Часть оставшейся энергии превращается в тепло (не вся энергия расходуется на производство работы) что вызывает пульсации температуры. После того как температура выравнивается, до среднего значения, белок переходит в другую конформационную форму. Этот процесс приводит к торможению саркомера и появлению ступенек (в решении уравнения (7)).

Пульсации температуры по Обухову. В теории турбулентности вводят энергетический, инерционный и диссипативный интервалы пульсаций [8, 9]. Инерционный интервал берет энергию из больших вихрей и снабжает энергией малые пульсации. Инерционный интервал является в то же время конвективным – выравнивание температур в нем происходит путем механического перемешивания различно нагретых «частиц» без участия истинной теплопроводности; свойства температурных пульсаций в этом интервале не зависят и от крупномасштабного движения. В случае саркомера, находящегося в растворе, считается, что число Прандтля $Pr = \chi / \nu = 1$ и поле температур подобно полю скоростей деформации. Последнее означает, что коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости для инерционного интервала равны $\chi = \nu = \varepsilon^\gamma \cdot \eta^\gamma$, $\varepsilon^\gamma \equiv \varepsilon^* / \ell$; ε^γ и η^γ – приведенные пульсации пространственного масштаба и скорости пульсаций, отнесенной к средней скорости сокращения. Определим относительное повышение температуры $\Delta T^* \equiv \Delta T / T_0$ в инерционном интервале по Обухову [8], где $T_0 = 309.6 \text{ K}$ – температура внутренней среды организма. Тогда скорость

диссипации энергии за счет теплопроводности со значением $\chi = \nu = \varepsilon^\gamma \cdot \eta^\gamma$ дается выражением [9]

$$\phi^* = \chi \left(\frac{dT^*}{dx^*} \right)^2 \cong (\varepsilon^\gamma \eta^\gamma) \frac{\Delta T^{*2}}{\varepsilon^{\gamma 2}},$$

из которого следует полезная формула для расчета повышения относительной температуры при турбулентных пульсациях длины саркомера и скорости:

$$\Delta T^* = \sqrt{\phi^* \frac{\varepsilon^\gamma}{\eta^\gamma}}, \quad (8)$$

здесь ϕ^* – скорость диссипации энергии за счет теплопроводности: $\phi^* = \overline{E_T} / c_p T_0 = \overline{E_T}^\gamma$, $\overline{E_T}$ – приведенная средняя энергия диссипации, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении. Представим E_T^γ в виде полинома четвертой степени от пространственного масштаба ε^γ :

$$E_T^\gamma = \frac{1}{4}(\varepsilon^\gamma)^4 + \frac{1}{2}a(\varepsilon^\gamma)^2 + b\varepsilon^\gamma,$$

где a и b – некоторые приведенные параметры. В формуле (8) неизвестно значение $\phi^* = \overline{E_T}^\gamma$. Для его нахождения воспользуемся выражением

$$\overline{E_T}^\gamma = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E_T^\gamma(\varepsilon_n^\gamma),$$

где N – общее число точек, на которое делится функция E_T^γ по оси ε^γ , ε_n^γ – значение ε^γ в точке n . Для нахождения приведенной скорости пульсаций η^γ используем $\eta^\gamma = \frac{d\varepsilon^\gamma}{dt}$. Формула (8) дает достаточно реальные значения повышения температуры 4–16°C для саркомера в растворе. На рис. 4 приведена зависимость приведенных пульсаций температура от приведенного значения пространственного масштаба ε^γ .

Расчет средней диссипации энергии. Расчет производился для раствора хлорида кальция $CaCl_2$ [10] ($c_p = 40.88$ Дж/(моль·К) [11]) по формуле $\overline{E_T} = \overline{E_T}^\gamma c_p T_0$. В [3] для портняжной мышцы лягушки при сокращении на 2 мкм энергия рассеивания равна 0.13 Дж/г. Данное значение соответствует расчетной пульсации температуры при сокращении саркомера в 4.7 К.

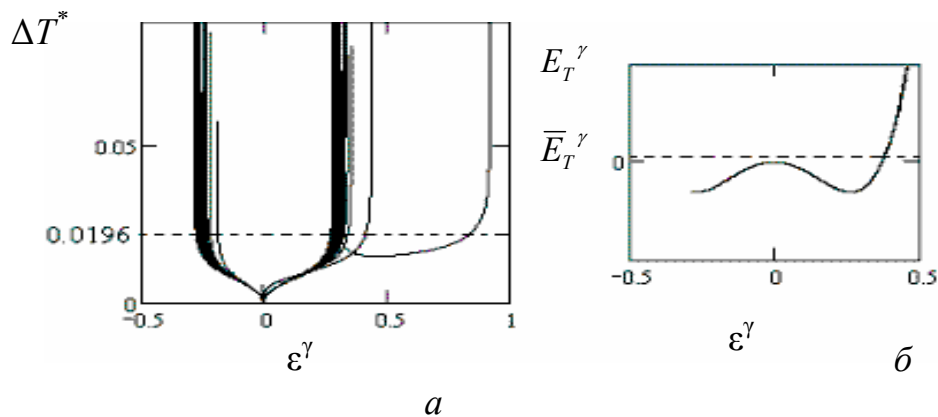


Рис. 4. Зависимость приведенной температуры ΔT^* (а) и приведенной диссипации энергии E_T^γ (б) от пространственного масштаба пульсаций ε^γ при $a = -0.07$, $b = 0$, $\overline{E_T}^\gamma = 3.309 \cdot 10^{-4}$, $\Delta T = 4.7$ К

Спектр мощности пульсаций параметра порядка η . Для модели построены нормированные спектры мощности пульсаций параметра порядка η методом Фурье-преобразования (рис. 5). Из рис. 5 видно, что теоретически полученный спектр является сплошным, что свидетельствует о существовании многомасштабной структуры поля скорости деформации саркомера [12]. Именно многомасштабность и является важнейшим признаком развитой турбулентности, приводя к возбуждению гигантского числа степеней свободы [13]. Полученный спектр соответствует экспериментальным данным, описанным в книге [14]. В области больших частот ($\omega > 4 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$) спектральная плотность изменяется по закону $\sim \omega^{-2}$. С уменьшением частоты ($10^4 - 4 \cdot 10^4 \text{ сек}^{-1}$) последняя резко возрастает, что соответствует закону $\sim \omega^{-7}$ турбулентных пульсаций Гейзенберга в диссипативном (вязком) интервале [15]. В достаточно узкой области частот ($10^3 - 10^4 \text{ сек}^{-1}$) спектр можно сравнить с колмогоровским $S\eta \sim \omega^{-5/3}$, который всегда наблюдался в развитой турбулентности [16, 17]. В области еще меньших частот ($\omega < 1 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$) в узком интервале имеет место фликкер – шум $S\eta \sim \omega^{-1}$ [13]. В области инерционного интервала происходит переход от спектра $S\eta \sim \omega^{-7}$ к колмогоровскому спектру $S\eta \sim \omega^{-5/3}$.

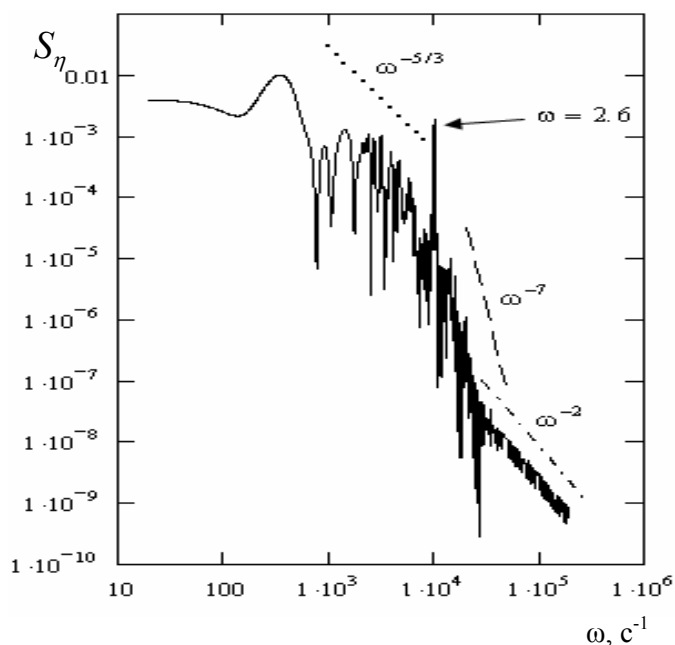
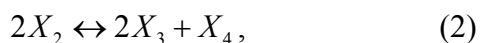
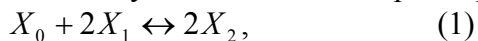
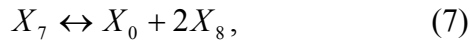
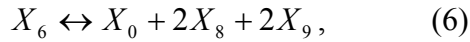
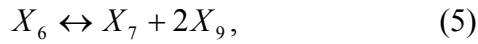


Рис. 5. Зависимость спектра пульсаций параметра порядка η (S_η) от частоты ω при следующих значениях параметров $a^* = -1.5$, $\omega = 2.6$ (частота внешних гармонических колебаний), $\tau = 0.216$, $\eta(0) = 0.1$, $\sigma_0^* = 1.8$. На спектре проявляется пик при $\omega = 2.6$

Цикл реакций, проходящих при сокращении саркомера

Миозин обладает ферментативной активностью. Он катализирует гидролиз АТФ. Активные центры у миозина расположены в его «головках» [18]. Рассматривается следующая модель: саркомер находится в растворе, к которому добавляют АТФ. В этой системе идут химические реакции, однако внешних периодических воздействий нет. Цикл реакций с участием АТФ и саркомера представляет следующую схему:





где $X_0 = AM$ – актинмиозиновый комплекс, $X_1 = ATP$, $X_2 = M.ATP$ – комплекс миозина и молекулы ATP , $X_3 = M.ADP.P_i$ – комплекс миозина, молекулы ATP и фосфора, $X_4 = H^+$ – ион водорода, $X_5 = AM.ADP.P_i$, $X_6 = AM^*.ADP.P_i$, $X_7 = AM^*.ADP$, $X_8 = ADP$, $X_9 = P_i$ – фосфор. Данная схема построена на основании старых моделей [19–21] с добавлением реакции (6), которая может идти параллельно с (5). В данном цикле учтено также участие 2 «головок» миозина в реакциях (1)–(3) и (5)–(7), поэтому в кинетических уравнениях возникнут квадратичные члены. Реакции (1), (2) и (6), описанные в работах [19, 20], протекают не мгновенно. Процесс (3) усовершенствован для 2 «головок» миозина. Представляемая модель содержит 7 реакций, в которых участвуют 10 веществ. Этими реакциями описываются следующие процессы:

- (1) – присоединение ATP к «головкам» миозина с образованием ATP -миозинового комплекса;
- (2) – гидролиз $M.ATP$ с образованием $M.ADP.P_i$ комплекса и ионов H^+ . Ионы водорода в дальнейшем уходят в водную среду;
- (3) – образование из комплекса $M.ADP.P_i$ вещества $AM.ADP.P_i$. В ходе данной реакции происходит продвижению головок миозина к актину;
- (4) – образование энергетически активной конформации миозина $AM^*.ADP.P_i$;
- (5) – изменение конформации легкой части миозина, которое происходит при распаде $AM^*.ADP.P_i$ на $AM^*.ADP$ и P_i («головка» миозина производит тянущее усилие);
- (6) – описывает распад $AM^*.ADP.P_i$ на соответствующие продукты (наряду с (5)). При распаде происходит мгновенное выделение энергии, а на механическом уровне «головки» миозина производят тянущее усилия;
- (7) – распад $AM^*.ADP$ с выделением ADP (выделяется энергия).

Эти реакции служат основой для написания кинетических уравнений.

Кинетические уравнения. Используя закон действующих масс и принцип макроскопической обратимости [22–24], можно записать кинетические уравнения для реакций (1)–(7), приведенные к безразмерному виду и определяющие изменения концентраций веществ x_i ($i = 0, \dots, 9$) со временем.

$$\frac{dx_0}{dt} = k'_1(x_2)^2 - k_1x_0(x_1)^2 + k_7x_6 - k'_7x_0(x_8)^2(x_9)^2 + k_6x_7(x_8)^2 - k'_6x_0(x_8)^2,$$

$$\frac{dx_1}{dt} = k'_1(x_2)^2 - k_1x_0(x_1)^2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -k'_1(x_2)^2 + k_1x_0(x_1)^2 - k_2(x_2)^2 + k'_2x_4(x_3)^2,$$

$$\frac{dx_3}{dt} = k_2(x_2)^2 - k'_2x_4(x_3)^2 + k'_3x_5 - k_3x_4(x_3)^2,$$

$$\frac{dx_4}{dt} = k_2(x_2)^2 - k'_2x_4(x_3)^2 + k'_3x_5 - k_3x_4(x_3)^2,$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_5}{dt} &= -k_4x_5 + k'_4x_6 - k'_3x_5 + k_3x_4(x_3)^2, \\ \frac{dx_6}{dt} &= k_4x_5 - k'_4x_6 - k_5x_6 + k'_5x_7(x_9)^2 - k_7x_6 + k'_7x_0(x_8)^2(x_9)^2, \\ \frac{dx_7}{dt} &= k_5x_6 - k'_5x_7(x_9)^2 - k_6x_7(x_8)^2 + k'_6x_0(x_8)^2, \\ \frac{dx_8}{dt} &= k_6x_7(x_8)^2 - k'_6x_0(x_8)^2, \\ \frac{dx_9}{dt} &= k_5x_6 - k'_5x_7(x_9)^2 - k_6x_7(x_8)^2 + k'_6x_0(x_8)^2 + k_7x_6 - k'_7x_0(x_8)^2(x_9)^2, \end{aligned}$$

где k_i и k'_i – константы ($i = 0, \dots, 9$), $t \equiv t/t_0$, а x_i приведены в безразмерном виде. Таким образом, получена система однородных нелинейных уравнений, которую требуется решать при заданных начальных условиях. Для реакции (1) задаются начальные условия, остальные вещества не участвуют в ней, поэтому их концентрация в начальный момент времени равна 0.

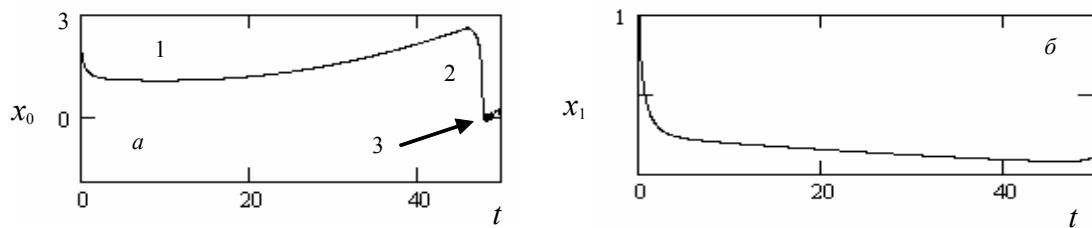


Рис. 6. Зависимость концентраций веществ $X_0 = AM$ (а), $X_1 = ATP$ (б) от времени $t \equiv t/t_0$, $t_0 = 1.6$ мс

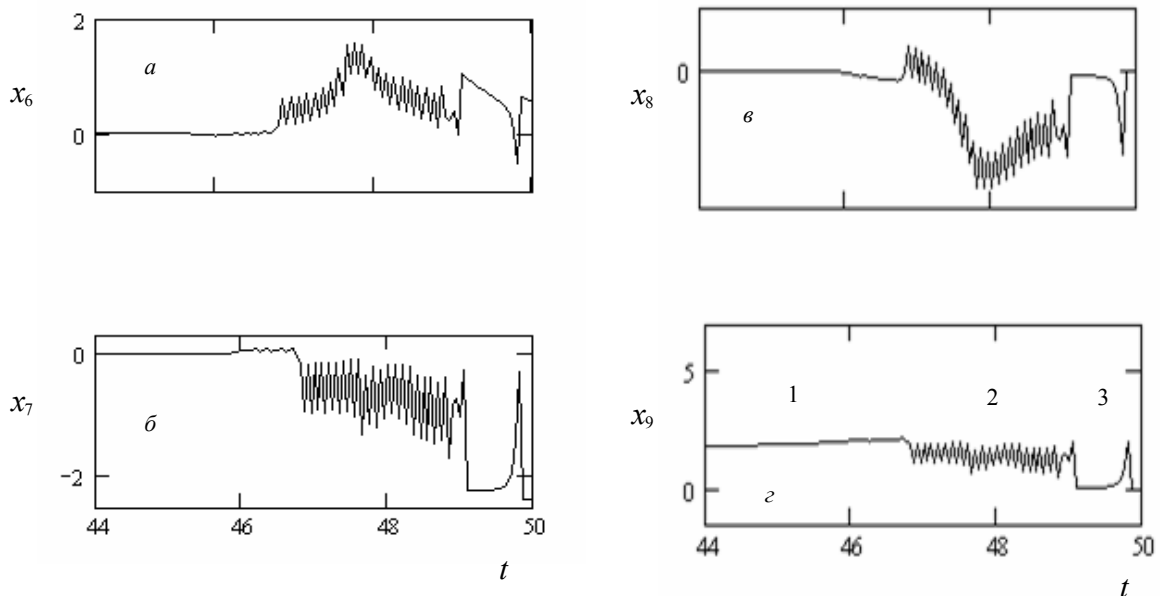


Рис. 7. Зависимость концентраций веществ $X_6 = AM^* \cdot ADP \cdot P_i$ (а), $X_7 = AM^* \cdot ADP$ (б), $X_8 = ADP$ (в), $X_9 = P_i$ (г) от времени $t \equiv t/t_0$, $t_0 = 1.6$ мс. 1 – временной ход реакции без самовозбуждения, 2 – самовозбуждение, 3 – выход на стационарное значение

Численные решения. Решая полученную систему численными методами, были полу-

чены следующие результаты. Принимая во внимание, что весь процесс составляет 80 мс [3, 4], получаем время $t_0=1.6$ мс. Конформация легкой части миозина происходит при распаде $AM^*.ADP.P_i$ на $AM^*.ADP$ и P_i или на составляющие это вещество части. Полный цикл завершается после выделения ADP . На рис. 6, а, можно выделить 3 участка, отвечающих механике сокращения саркомера: 1 – процесс сокращения саркомера; 2 – релаксация саркомера к стационарному состоянию; 3 – процесс так называемого “дрожания” саркомера. Не весь АТФ расходуется на конформацию головок миозина и на полимеризацию актина (см. рис. 6, б). Концентрация ионов водорода возрастает до определенного момента времени. Часть ионов связывается с АТФ [3, 18], а часть – с ионами магния, что ведет к релаксации саркомера к невозбужденному состоянию (рис. 6, а, участок 2). В модели В.И. Дещеревского [25] отсутствует участок 3, представленный на рис. 6, а участки 1 и 2 соответствуют тянущим и тормозящим усилиям при сокращении саркомера. На рис. 7 представлены графики самовозбуждения веществ $X_6 = AM^*.ADP.P_i$, $X_7 = AM^*.ADP$, $X_8 = ADP$, $X_9 = P_i$. История процессов на рис. 7 состоит из 3 стадий: 1 стадия – предварительное нелинейное изменение соответствующих концентраций (73.6 мс); 2 стадия – начало самовозбуждения, содержащие высокочастотные пульсации и периодические движения (4.8 мс); 3 стадия – развитие неустойчивых низкочастотных пульсаций, которые приводят к неустойчивости процесса (1.6 мс). Как видно из рисунков, самовозбуждение в системе происходит после выделения ADP . В свою очередь, это ведет к началу процесса релаксации саркомера в растворе.

Литература

1. Быстрой Г.П., Богинич А.В. Термодинамика многоядерных клеток: системное моделирование самоорганизующегося саркомера с хаотической динамикой параметра порядка // Вестник кибернетики. – 2007. – № 6. – ИПС СО РАН – С. 77–91.
2. Быстрой Г.П., Макаров Л.В., Шилин Г.Ф. Неравновесная термодинамика процессов горного производства. – М. Недра, 1991. – 119 с.
3. Рубин А.Б. Биофизика. Т. 2. – М.: Наука, 2000. – 467 с.
4. Хилл А. Механика мышечного сокращения. – М.: Мир, 1972. – 182 с.
5. Wilkie D.R. The mechanical properties of muscle // British medical bulletin. – 1956. – V.12.
6. Быстрой Г.П. Термодинамика открытых систем. Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. университета (гриф УМО). 2007. – 120 с.
7. Ким А.В. Ко второму методу Ляпунова для систем с последствием // Диф. уравнения. – 1985. – Т.21. – №3. – С. 385–391.
8. Обухов А.М. Структура поля температуры в турбулентном потоке // Изв. АН СССР. – Геогр. и геофизика. – 1949. – Т.13. – С. 58–69.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 733 с.
10. Волькенштейн М.В. Физика мышечного сокращения // УФН. – 1970. – Т.100. – Вып.4. – С. 681–717.
11. Кикоин И.К. Таблица физических величин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
12. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
13. Мирабель А.П. О роли нелокальных взаимодействий в формировании спектра пассивной примеси в двумерной турбулентности // Этюды о турбулентности. – М.: Наука, 1994.
14. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность многокомпонентных сред. – М.: МАИК Наука, 1998. – 336с.
15. Хинце И.О. Турбулентность. – М.: Физматгиз, 1963.
16. Meksyn D. New methods in laminar boundary layer theory. – Pergamon Press, London, 1961.

17. Белоцерковский О.М., Андрищенко В.А. Динамика пространственных вихревых течений в неоднородной атмосфере. – М.: Янус-К, 2000.
18. Румянцев Е.В., Антипа Е.В. Химические основы жизни. – М.: Химия, КолоС. 2007.– 560с.
19. Siththanandan V.B., Donnelly J.L., Ferenczi M.A. Effect of strain on actomyosin kinetics in isometric muscle fibers // *Biophysical Journal*. 2006. – V.90. – P. 3653 – 3665.
20. Ranatunga K.W., Coupland M.E., Pinniger G.J., Roots H., Offer G.W. Force generation examined by laser temperature – jumps in shortening and lengthening mammalian (rabbit psoas) muscle fibres // *J. Physiol.* – 2007. – V.585. – №1. – P. 263–277.
21. Bendall J. *Muscles, molecules and movement*. Heinemann, Lnd., 1969.
22. Murray J.D. *Mathematical biology*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg. 1989. – p. 767.
23. Николис Г. Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М., 1979. – 512 с.
24. Жуховский А.А., Белашенко Д.К., Бокштейн Б.С., Григорян В.А., Григорьев Г.А., Гугля В.Г. Физико–химические основы металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1973. – 392с.
25. Дещеревский В.И. Математические модели мышечного сокращения. – М. Наука, 1977. – 150 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВ В БИОАКТИВНЫХ РАНЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Д.Н. Макин (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики),

Н.Г. Венгерович, М.А. Тюнин (Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова)

Научные руководители – к.т.н., доцент М.В. Успенская (Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики),

д. мед. н., профессор В.А. Попов

(Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова)

Исследовано влияние фуллеренов C_{60} на течение раневого процесса и длительность заживления ран различной этиологии. Разработано и исследовано новое фуллерен-содержащее биоактивное раневое покрытие на основе акрилатного гидрогеля.

Введение

Раневые повреждения можно условно разделить на два вида: первичные и вторичные. Первичные повреждения возникают при механических, термических и других воздействиях. Наиболее тяжелые первичные повреждения наблюдаются при огнестрельных ранениях [1]. Вслед за первичным повреждением в тканях, окружающих рану, возникают реакции воспаления, что проявляется выбросом из клеток ферментов, в том числе протеолитических, накоплением в тканях активных форм кислорода, свободных кислородных радикалов, активацией процессов перекисного окисления липидов и ослаблением антиоксидантной защиты, появлением в зоне повреждения недоокисленных продуктов и возникновением вначале местного, а затем и общего ацидоза. Избыточное образование агрессивных продуктов является одной из причин распространения зоны вторичного повреждения тканей, увеличения очага воспаления и осложненного течения раневого процесса. При этом необходимо заметить, что выбор средств, противодействующих вторичному повреждению тканей, таких как сорбенты, антиферментные и антиоксидантные препараты, предельно ограничен.

Использование современных нанотехнологий может существенно изменить подход к лечению ран различной природы. Известно, что производные фуллерена C_{60} являются нетоксичными соединениями и проявляют антиоксидантную, мембранотропную, иммуностропную, противовирусную, фотодинамическую активность [2], способны индуцировать дифференцировку фибробластов [3], инактивировать протеолитические ферменты [4]. Парентеральное введение комплекса C_{60} /поли-N-винилпирролидон (C_{60} /ПВП) не оказывает на организм экспериментальных животных острой токсичности, причем фуллерен C_{60} в составе комплекса значительно снижает негативные проявления ПВП [5]. Целью данных исследований было определение эффективности местного применения фуллеренов при раневом процессе, а также разработка биоактивного фуллерен-содержащего раневого покрытия.

Материалы и методы исследования

Антиоксидантные свойства водного раствора комплекса фуллерена C_{60} /ПВП исследовали путем определения антирадикальной активности с использованием 1,1-дифенил-2-пикрилгидразида (ДФНГ) [2] и супероксидпродуцирующей активности макрофагов (Мф) методом биохемилюминесценции (БХЛ) [4].

Используя методику с ДФНГ, исследованы водные растворы комплекса C_{60} /ПВП с 0,01%, 0,02% и 0,03% содержанием фуллерена. С помощью метода БХЛ оценивали влияние водных растворов комплекса C_{60} /ПВП и ПВП, каждый в концентрации 1,5%, 3%, 6,5%, 12,5% и 25%, на супероксидпродуцирующую активность альвеолярных и пе-

ритонеальных макрофагов. Для растворов, содержащих комплекс C_{60} /ПВП, это соответствовало 0,0075%, 0,015%, 0,03%, 0,06 и 0,125% содержанию фуллерена. Биохемилюминесценцию регистрировали на приборе «Хемилюм-1» (Россия) с кюветой, термостатируемой при $37 \pm 0,5^\circ\text{C}$. После предварительного прогрева хемилюминометра при 37°C в течение 1 часа в измерительную пластиковую одноразовую кювету вносили 0,2 мл суспензии макрофагов, содержащей 1×10^7 клеток, 0,1 мл раствора люцигенина (100 мкМ/л) и 0,1 мл физиологического раствора с соответствующими дозами тестируемых препаратов (в контроле – 0,1 мл физиологического раствора). Время инкубации составляло 10 мин. Уровень спонтанной БХЛ измеряли в течение 5 мин при постоянном перемешивании. После графической регистрации результатов на компьютере с помощью оригинальной программы вычисляли интенсивность БХЛ (интегральный показатель) и по высоте пика полученных кривых БХЛ отмечали величину максимума интенсивности свечения. Показатели спонтанной БХЛ в контрольной группе (Мф + физиологический раствор) принимали за 100%, а показатели БХЛ, полученные в опытных группах (Мф + препарат), рассчитывали в процентах от контроля.

Для лечения ран различной этиологии нами было разработано трехслойное гидрогелевое биоактивное фуллерен-содержащее раневое покрытие. В качестве верхнего слоя использовали абсорбент – акрилатный гидрогель с нейтральным рН и абсорбционной емкостью по физиологическому раствору $40 \text{ г/г} \pm 10\%$, полученный на основе акриловой кислоты и акриламида [7], нанесенный на пористую хлопчатобумажную основу (средний слой), выполняющую каркасную функцию, и нижний, прилегающий к ране желатиновый слой, включающий биоактивные ингредиенты разнонаправленного действия (диоксидин, ϵ -аминокапроновая кислота, мочевины), и иммобилизованный в его составе комплекс C_{60} /ПВП с 0,1% содержанием фуллерена (рис. 1).

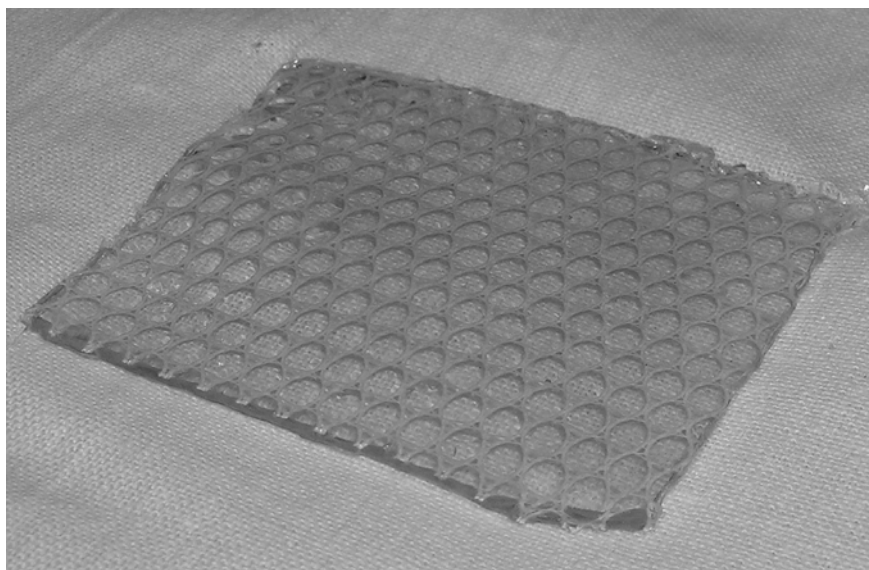


Рис. 1. Гидрогелевое биоактивное раневое покрытие

Исследование эффективности местного применения гидрогелевого биоактивного раневого покрытия проведено на модели глубоких ожогов (20 крыс линии Вистар весом 180–200 г.). На спине крыс под эфирным наркозом с помощью специального устройства моделировали два ожога площадью 1 см^2 каждый. В качестве обжигающей поверхности использовали медную пластину размером $1,0 \times 1,0 \text{ см}$ с температурой нагрева 180°C . Ожог наносили контактным способом в течение 10 секунд. Через сутки под эфирным наркозом выполняли некрэктомию ожогового струпа, обработку ран проводили 3% раствором перекиси водорода. Одну рану накрывали гидрогелевым покрытием

ем (опыт) с 0,1% содержанием в нем фуллерена и биологически активных компонентов (антимикробный, антиферментный, гемостатический и протеолитический препараты), другую – желатиновой губкой без включения фуллерена C₆₀, но имеющей в своем составе отмеченные выше биологически активные препараты в аналогичных концентрациях (контроль). Критериями эффективности местного применения C₆₀ служили скорость (сроки) заживления и гистоморфологическая картина ран на 7, 10, 14, и 20 сутки.

Скорость заживления ран оценивали планиметрическим методом. При контрольных измерениях на рану накладывали стерильную пластинку целлофана и на нее наносили контуры раны. Рисунок переносили на миллиметровую бумагу и подсчитывали площадь раны. Уменьшение площади раневой поверхности в процентном отношении к начальным размерам раны определяли по формуле $(S = (S - S_n) \times 100 / S)$, где S_n – величина площади раны при данном измерении, S – начальная площадь раны.

Для гистоморфологического исследования материал фиксировали в 10% нейтральном формалине, обезжовивали в спиртах, заключали в парафин, серийные срезы окрашивали по Ван-Гизону азур II-эозином (для определения степени дифференцировки соединительной ткани) и оссеином. Препараты изучали методом световой микроскопии. Описание гистоморфологической картины области раневого дефекта проводили в различных топографических зонах, как по горизонтали, так и по вертикали.

Все количественные показатели, полученные в результате исследований, обработаны по методу Фишера и Стьюдента и были статистически достоверными.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов исследования антиоксидантных свойств комплекса C₆₀/ПВП с использованием 1,1-дифенил-2-пикрилгидразида (ДФНГ), представленных в табл. 1, показал, что комплекс C₆₀/ПВП обладает антирадикальной активностью, которая возрастает пропорционально увеличению его концентрации в растворе.

Концентрация растворов, %	Комплекс фуллерен C ₆₀ /ПВП			Контроль (ПВП)
	0,01%	0,02%	0,03%	
Антиоксидантная активность, ммоль/л	1,35 ± 0.04	1,46 ± 0.07	1,84 ± 0.03	0,91 ± 0.05

Таблица 1. Антиоксидантная активность комплекса фуллерена C₆₀/ПВП

Концентрация растворов	Перитонеальные макрофаги		Альвеолярные макрофаги	
	ПВП	C ₆₀ /ПВП	ПВП	C ₆₀ /ПВП
1,5%	185,61 ± 0.70	173,72 ± 1,20	117,34 ± 0.90	112,15 ± 2,10
3%	247,79 ± 0.50	76,38 ± 0.80	256,85 ± 1,10	166,48 ± 0.80
6,5%	510,2 ± 1,10	213,87 ± 1,70	238,74 ± 0.70	187,37 ± 1,20
12,5%	306,27 ± 0.70	120,15 ± 0.60	173,88 ± 0.90	188,93 ± 0.60
25%	6,41 ± 0.50	9,89 ± 0.20	0,07 ± 0.10	1,85 ± 0.20

Таблица 2. Влияние комплекса C₆₀/ПВП на супероксидпродуцирующую активность тканевых макрофагов (% от контроля)

При изучении влияния комплекса C_{60} /ПВП на супероксидпродуцирующую активность тканевых макрофагов установлено, что фуллерен в составе комплекса проявляет выраженные антиоксидантные свойства в растворах с концентрацией от 0,03% до 0,06%. Показатели активности при использовании комплекса C_{60} /ПВП в других опытных группах были сравнимы с данными активности растворов с соответствующим содержанием ПВП и приведены в табл. 2.

Под влиянием местного применения на гранулирующих ранах после глубоких ожогов гидрогелевого биоактивного раневого покрытия с 0,1% содержанием фуллерена C_{60} процент уменьшения площади раневого дефекта к исходной в опытной группе на 7 сутки был равен 65,4% (рис. 2), на 10 сутки – 96,5% (рис. 3), а срок полного заживления ран составил 12 суток. В контрольной серии эти показатели были следующими: на 7 сутки – 36,3%, на 10 сутки – 65,1%, на 14 сутки – 73,8% (рис. 4), срок полного заживления ран составил 20 суток.



Рис. 2. Раневой дефект при применении покрытия с комплексом C_{60} /ПВП: 7-е сутки



Рис. 3. Раневой дефект при применении покрытия с комплексом C_{60} /ПВП: 10-е сутки

По данным гистоморфологических исследований, в ранах опытной серии на 7 сутки после некрэктомии наблюдали очищение ран от нежизнеспособных тканей, осуше-

ствляемое, главным образом, макрофагами, формирование хорошо васкуляризированной грануляционной ткани и эпителизацию в приграничной зоне, где начиналось подрастание эпителиального клина под струп между фибриноидом и вновь образованной грануляционной тканью. В контрольной группе гистоморфологическая картина на 7 сутки свидетельствовала о более выраженной воспалительной реакции, при этом, как и в опытной группе, происходило очищение раны от нежизнеспособных тканей, однако процессы формирования грануляционной ткани и эпителизации протекали значительно медленнее.

На 10 сутки в опытной группе эпителизация была еще не завершена, эпителий не покрывал дефект полностью, а только напозлзал с краев в виде эпителиального клина, в грануляционной ткани наблюдалось формирование крупнопетливой капиллярной сети с преобладанием вертикальных петель, дифференцировка фибробластов, фиброгенез коллагена с превращением, в отличие от контроля, аргирофильных волокон в фуксинофильные, что свидетельствует о более зрелом характере грануляционной ткани.



Рис. 4. Раневой дефект контрольной группы: 14-е сутки

На 14 сутки в контрольной группе гистоморфологическая картина соответствовала стадии пролиферации и созревания грануляционной ткани, а эпителий покрывал только края раны.

Анализ течения раневого процесса при местном лечении глубоких ожогов фуллерен-содержащим раневым покрытием с 0,1% содержанием фуллерена показал, что при его использовании наблюдается интенсификация репаративных процессов, более раннее завершение воспалительного процесса, увеличение скорости эпителизации и уменьшение сроков заживления ран по сравнению с контролем.

Установлено, что под действием гидрогелевого биоактивного раневого покрытия заживление гранулирующих ран после глубоких ожогов происходит не менее чем в 1,5 раза быстрее (срок полного заживления составил 12–14 суток, а в контроле – 20 суток, т.е. на 8 суток дольше). Под действием раневого покрытия, содержащего C_{60} вместе с другими биологически активными ингредиентами, а в качестве абсорбента – гидрогель на основе акриламида и акриловой кислоты (с рН 7,0–7,5), наблюдали более раннее завершение воспалительного процесса, отчетливую стимуляцию роста грануляционной ткани и усиление процессов краевой эпителизации.

Усиление репаративных процессов под действием комплекса фуллерена C_{60} /ПВП, с нашей точки зрения, связано с антиоксидантной активностью препарата, которая пре-

дотвращает повреждение клеток и тканей продуктами вторичной альтерации. При этом происходит интенсификация общего хода раневого процесса, что подтверждается данными морфологического исследования и проявляется усилением пролиферации фибробластов, активацией синтеза коллагена и фибриллогенеза, образования и созревания грануляционной ткани, более быстрым рубцеванием и эпителизацией раны.

Заключение

В ходе исследований выявлена антирадикальная и антиоксидантная активность фуллеренов и отсутствие их общей и местной токсичности.

Установлено, что местное применение биологически активного фуллерен-содержащего раневого покрытия предупреждает осложненное течение раневого процесса, на 20–25% сокращает длительность заживления ран и может быть рекомендовано для лечения ран, возникающих при механической травме и, в том числе, при огнестрельных ранениях, для лечения гнойно-некротических процессов, гранулирующих ран при глубоких ожогах, трофических язв и пролежней.

Существенное сокращение длительности лечения наиболее распространенных патологических процессов и применение патогенетически обоснованных комбинированных средств местного лечения, изготовленных на основе отечественного сырья и малых доз фуллеренов, должно сопровождаться значительным экономическим эффектом.

Литература

1. Попов В.А. Физиологические основы военно-полевой и неотложной хирургии. – СПб: ЭЛБИ-СПб, 2003. – С. 304.
2. Jensen A.W., Wilson S.R., Schuster D.I. Biological applications of fullerenes // *Bioorg. Med. Chem.* – 1996. – Vol. 4. – P.767–779.
3. Piotrovsky L.B., Dumpis M.A., Poznyakova L.N., Kiselev O.I., Kozeletskaya K.N., Erokin M.Yu., Monaenkov A.O. Study of the biological activity of the adducts of fullerenes with poly(N-vinylpyrrolidine) // *Mol.Mat.* – 2000. – Vol.13. – P. 41–50.
4. Попов В.А., Тюнин М.А., Зайцева О.Б. и др. Морфологические изменения в тканях внутренних органов при внутрибрюшинном введении комплекса C_{60} с поливинилпирролидон// Сб. науч. тр. Рос. школы-конференции молодых ученых и преподавателей «Биосовместимые наноструктурные материалы и покрытия медицинского назначения».– Белгород, 2006. – С.376–380.
5. Попов В.А., Тюнин М.А., Зайцева О.Б. и др. Активность мембранных ферментов в пищеварительных и непищеварительных органах при внутрибрюшинном введении комплекса C_{60} с поливинилпирролидоном // Сб. науч. тр. Рос. школы-конференции молодых ученых и преподавателей «Биосовместимые наноструктурные материалы и покрытия медицинского назначения».– Белгород, 2006. – С.381–385.
6. Glavind J. Antioxidants in animal tissue // *Acta Chem. Scand.* – 1963. – Vol. 17. – № 13. – P. 1635–1640.
7. Andreopoulos A.G. Preparation and Swelling of Polymeric Hydrogels // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1989. – Vol. 37. – №.8. – P. 2121–2129.

АНАЛИЗ АРТЕФАКТОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

П.А. Кокорев

Научный руководитель – к.т.н. А.О. Казначеева

Качество изображений в компьютерной томографии (КТ) может быть серьезно снижено присутствием на них различных помех (артефактов). В работе проведена классификация артефактов КТ-изображений, проанализировано 69 исследований, полученных на спиральном КТ-сканере, выявлены артефакты, наиболее часто встречающиеся в медицинской диагностике, предложены методы их устранения.

Введение

Компьютерная томография является одним из информативных методов неинвазивной диагностики, позволяющим проводить исследования широкого спектра объектов (как биологических, так и промышленных) с различным химическим составом и возможностью построения трехмерных моделей по полученным данным. Компьютерные томографы (КТ) наиболее часто используются в медицинской диагностике и характеризуются относительно низкими эксплуатационными затратами при высокой пропускной способности, а основным недостатком этого метода является наличие рентгеновского излучения.

На информативность метода влияет целый ряд факторов, зависящих, в первую очередь, от физико-технических принципов реализации метода. Ограничения в использовании компьютерной томографии связаны как с конструкцией самого сканера, так и с чувствительностью к внешним условиям, например, к колебаниям температуры окружающей среды. В целом качество КТ-изображения характеризуется пятью факторами: пространственным разрешением, контрастностью, шумом или пространственной однородностью, линейностью и наличием артефактов. Появление артефактов может не просто снизить визуальное качество изображений, но в ряде случаев сделать их абсолютно непригодными для медицинской диагностики. Работа посвящена выявлению наиболее распространенного артефакта КТ-изображений и поиску методов его устранения.

Классификация артефактов в компьютерной томографии

Артефактами изображений в компьютерной томографии является любое несоответствие между КТ-числами реконструированного изображения и истинными коэффициентами ослабления материалом объекта. Изображения в компьютерной томографии, несомненно, более склонны к появлению артефактов по сравнению с обычными рентгенограммами, ведь технология реконструкции изображения такова, что измерения на всех детекторах суммируются, поэтому на изображениях проявляются любые ошибки измерений. Ошибки реконструкции могут быть вызваны как недостатком данных, так и наличием различных шумов. Артефакты могут проявляться в виде полос (погрешность в отдельном измерении), колец (ошибки калибровки отдельного детектора), затемнений (постепенное отклонение целой группы каналов), зашумлений (спиральная реконструкция).

В связи с этим все артефакты можно поделить на четыре группы в соответствии с причинами, вызвавшими их появление:

- физические процессы, определяющие механизм сбора данных;
- факторы, связанные с пациентом;
- неисправность аппаратуры;
- технология сканирования.

Конструктивные особенности современных КТ-сканеров позволяют минимизировать некоторые виды артефактов, которые иногда могут быть практически полностью скорректированы программным обеспечением. Но все же основными факторами, влияющими на качество изображения, остаются тщательный выбор позиции пациента и правильность параметров исследования.

Анализ диагностических КТ-исследований

Проанализировав более 60 исследований, выполненных на спиральном рентгеновском компьютерном томографе GE LightSpeed Plus, были выявлены артефакты в виде впадин и темных полос между плотными объектами, сильных полос, распространяющихся в продольном направлении, веерообразных лучей, исходящих из некоторой области (артефакт Хаунсфилда), смазанного изображения (удвоения контура структур и появление полос периодического характера). Анализ осуществлялся при помощи программы просмотрщика DICOM файлов eFilm Lite 1.8. Общие данные исследований приведены в таблице.

Область сканирования	Количество исследований		Число изображений	
	общее	с артефактами	общее	с артефактами
Брюшная полость	34	5	1800	50
Грудная клетка	22	16	1200	310
Голова	10	2	600	20
Малый таз	3	1	300	20

Таблица. Статистический анализ артефактов КТ-исследований

Как видно из таблицы, существует зависимость появления артефактов от области сканирования. Так, например, при большом числе исследований брюшной полости было выявлено сравнительно небольшое количество артефактов. В основном это были продольные полосы в области таза и веерообразные лучи, исходящие от непрозрачных для рентгеновских лучей предметов, которые попали в область сканирования. При исследовании головы встречались артефакты увеличения жесткости излучения (в виде впадин и темных полос между плотными объектами) и все тот же артефакт Хаунсфилда (веерообразные лучи), вызванные наличием зубных протезов. В области малого таза были обнаружены только артефакты, вызванные движением пациента (смазанное изображение). И, наконец, в области грудной клетки было зафиксировано наибольшее количество артефактов, причем исключительно в виде продольных полос в плечевой области. Исходя из классификации, основными причинами появления артефактов на изображениях стали физические процессы, определяющие механизм сбора данных и факторы, связанные с пациентом. Процентное соотношение обнаруженных артефактов приведено на рис. 1.

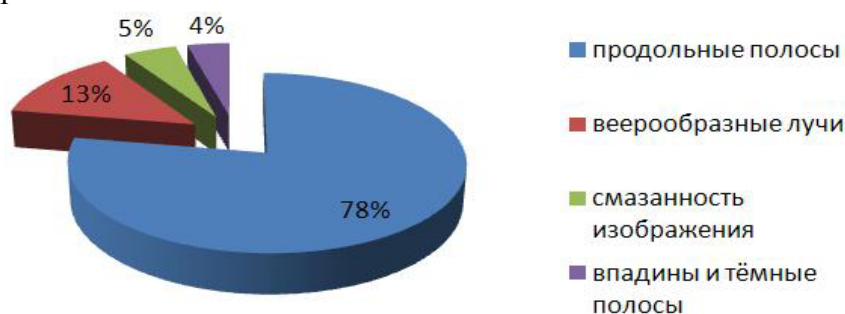


Рис. 1. Диаграмма артефактов

Из приведенной диаграммы становится очевидным, что наиболее часто встречаемый артефакт выражается в виде продольных полос в плечевой области пациента. Причиной такого явления может послужить неравномерность затухания луча фотонов в различных направлениях. Как можно наблюдать на рис.2, а, полосы расположены горизонтально, так как при таком распространении луча затухание сильнее, и детекторов достигает недостаточное количество фотонов. В результате под этим углом получают зашумленные проекции, а реконструкция усиливает шум, что приводит к горизонтальным полосам на изображении [1].

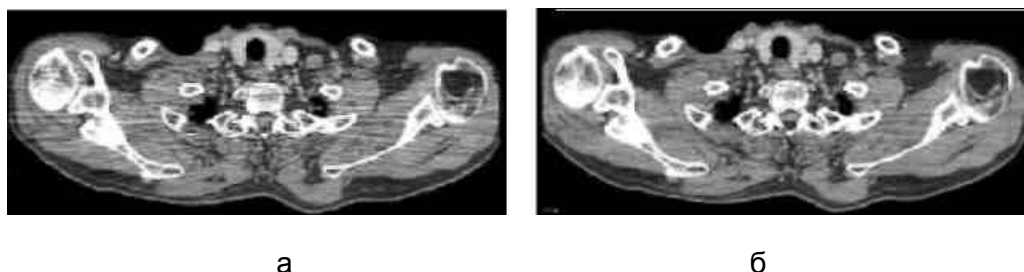


Рис. 2. Изображение при наличии (а) и отсутствии (б) артефакта затухания

Методы устранения артефакта затухания фотона

Артефакт можно устранить путем увеличения тока в трубке, но пациент получит лишнюю дозу облучения при сканировании в областях с менее плотными объектами. Некоторые современные модели КТ-сканеров позволяют автоматически варьировать силу тока рентгеновской трубки в зависимости от угла поворота. Это позволяет достаточному числу фотонов пройти через направления с более плотными объектами, без получения лишнего облучения в областях, где в этом нет необходимости (рис. 3).



Рис. 3. Изменение силы тока рентгеновской трубки как функции от угла поворота $I(\theta)$

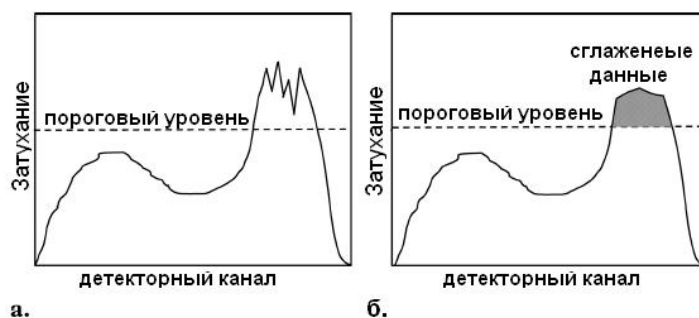


Рис. 4. Проекционные данные рентгеновского луча, проходящего в горизонтальном направлении в области плеч. Диаграмма отображает данные в первоначальном виде (а) и после использования метода многомерной адаптивной фильтрации (б)

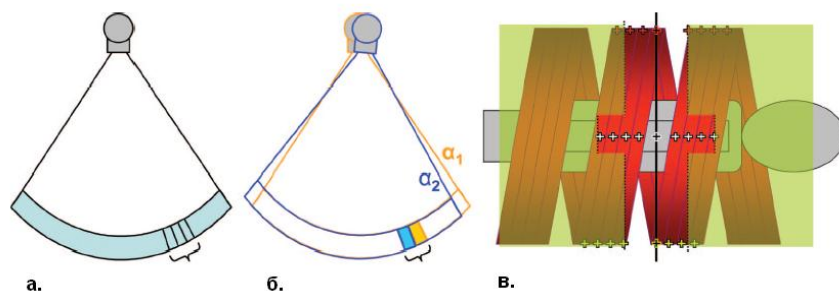


Рис. 5. Три компоненты многомерной адаптивной фильтрации: усреднение данных на смежных детекторах (а), усреднение каждого из значений на детекторе, полученных под последовательными углами (б), использование Z-фильтра для проекций с большим ослаблением (в). Черная линия на рисунке в – плоскость реконструкции

На спиральных КТ для устранения артефакта используется метод многомерной адаптивной фильтрации. Для небольшого количества данных, превышающих порог ослабления, сглаживание выполняется между проекциями, расположенными под последовательными углами. Применяемый в спиральном сканировании Z-фильтр используется для проекций с большим ослаблением, чтобы в реконструкции участвовало большее количество фотонов (рис. 4, 5) [2]. Результат многомерной адаптивной фильтрации можно наблюдать на рис. 2, б.

Заключение

Данная работа демонстрирует, что артефакты в компьютерной томографии могут появиться из-за множества факторов и могут в большей или меньшей степени ухудшить качество изображения. В работе приведена классификация артефактов и произведен анализ более 60-и исследований. Было выявлено, что наиболее часто встречаемым в медицинской практике артефактом является артефакт затухания фотона в виде поперечных полос на изображении. Для его устранения можно использовать один из приведенных способов – аппаратный метод варьирования силы тока рентгеновской трубки или программный метод адаптивной фильтрации.

Литература

1. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 152 с.
2. Barrett J.F., Keat N. Artifacts in CT: Recognition and Avoidance // Radio Graphics. – 2004. – Vol. 24. – P. 1679–1691.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УЧЕБНЫМ ЯМР-ТОМОГРАФОМ

А.Н. Серегин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Ю.И. Неронов

Приводится краткое описание разработанной системы управления учебным ЯМР-томографом. Описаны ее основные части, их назначение и принципы их взаимодействия между собой.

Введение

Использование явления ядерного магнитного резонанса как средства для магнитного «внутривидения» было предложено в заявке на изобретение в 1960 г. [1]. На этом принципе разработаны ЯМР-томографы, которые являются наиболее дорогими приборами медицинской диагностики. Лучшие из них укомплектованы сверхпроводящими магнитами и изготавливаются рядом зарубежных фирм. Из-за высокой стоимости их число в России значительно уступает требованиям современного здравоохранения, и стоит задача о заполнении этого рынка отечественными приборами. ЯМР-томограммы медицинского назначения могут содержать артефакты, которые не имеют анатомического объяснения. Они связаны с физическими особенностями данного метода, такими как, например, проявление на изображениях химического сдвига в экранировании протонов. Для научной проработки таких явлений достаточно использовать малогабаритные ЯМР-томографы [2]. Как раз такой томограф находится на кафедре измерительных технологий и компьютерной томографии СПбГУ ИТМО, однако из-за морально устаревшего программного обеспечения и устройства управления не представляется возможным проводить достаточно сложные эксперименты. Поэтому нами была поставлена задача создать новую современную систему управления, с помощью которой можно было бы повысить функциональность кафедрального ЯМР-томографа. Разработка этой системы ведется нами с 2005 г., к этому времени процесс создания СУ вошел в завершающую стадию [3]. В данной работе были полностью решены все проблемы, которые не удалось решить в предыдущие годы.

Содержание работы

- Работа любого ЯМР-томографа основана на выполнении следующих действий [4].
1. Подача импульсов возбуждения на резонансную индуктивность. Это необходимо для поворота векторов намагниченности протонов, что и вызывает ядерный магнитный резонанс. Ширина импульсов должна быть порядка сотни микросекунд, временной промежуток между импульсами необходимо выдерживать постоянным с высокой точностью.
 2. Подача линейных градиентов магнитного поля. Это необходимо для выполнения частотно-фазового кодирования радиочастотного сигнала. Линейные градиенты формируются специальными катушками. Однако для управления ими необходимы высокочастотные импульсы шириной порядка нескольких миллисекунд. Эти импульсы должны подаваться синхронно с запускающими импульсами. Для получения двумерного изображения объекта, без выделения отдельных слоев, достаточно двух градиентов – фазового и частотного. Следовательно, имеется необходимость подачи высокочастотных импульсов одновременно по трем каналам (рис. 1).
 3. Считывание частотных и фазовых характеристик ЯМР сигнала. Кодированный радиочастотный сигнал необходимо получить, оцифровать и декодировать, получив изображение исследуемого объекта. При этом оцифровка должна идти с частотой дискретизации 44100 Гц.

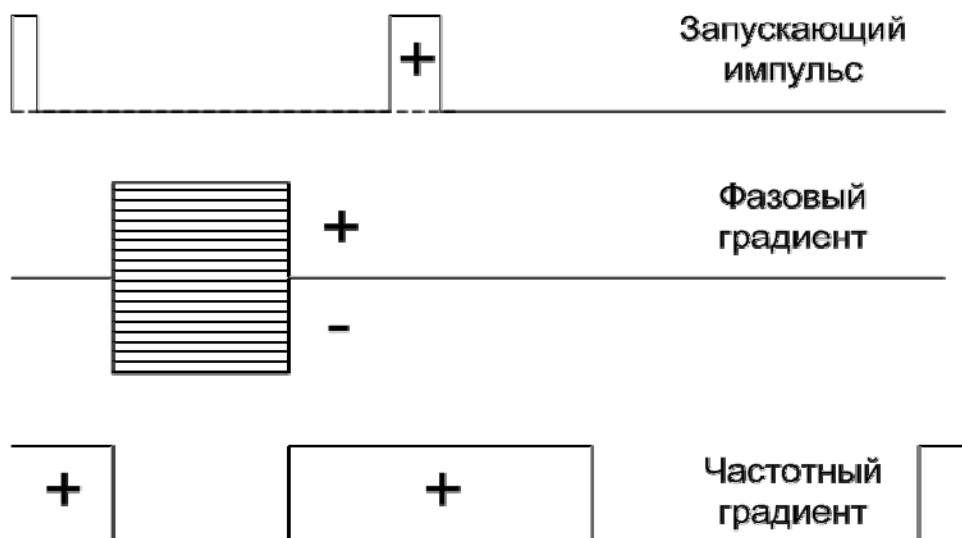


Рис. 1. Схема импульсов

В результате проведенной работы была спроектирована и макетирована система управления учебным томографом, соответствующая техническому заданию. Система разделена на две части: внешний блок, присоединяющийся к персональному компьютеру при помощи USB-кабеля, и программное обеспечение, установленное на этот персональный компьютер.

Внешний блок

Внешний блок имеет один двухканальный вход для сигнала с томографа, 3 входа для программирования микроконтроллеров, 3 выхода на катушки для запускающего импульса и градиентных полей, а также USB выход для передачи параметров импульсов вводимых пользователем, а также для передачи оцифрованных данных на персональный компьютер.

Внешний блок содержит три микроконтроллера, которые общаются между собой посредством протокола SPI (Serial Peripheral Interface). Один из контроллеров управляет четырехканальным цифро-аналоговым преобразователем, при помощи двух встроенных таймеров отсчитывает интервалы между импульсами и выставляет их. Второй контроллер управляет аналого-цифровым преобразователем, подавая на него сигналы границ выборки, выбора канала, а также побитно считывая оцифрованный сигнал. Третий контроллер является основным – он управляет остальными двумя контроллерами, получает команды с персонального компьютера и передает обратно оцифрованный сигнал. Связь с компьютером через USB осуществляется при помощи специальной микросхемы-переходника USB-UART от компании FTDI [5]. Вместе с этой микросхемой фирмой-разработчиком поставляется драйвер и специальная библиотека функций, которые позволяют работать с USB-портом на скоростях, позволяющих передавать оцифрованный сигнал в реальном времени.

Плата питается от сети переменного тока 220 вольт. С помощью трансформатора это напряжение преобразуется в три отдельных источника питания: +5 вольт для питания цифровой части устройства, ± 12 вольт для питания выходных операционных усилителей, и гальванически развязанное от других источников +5 вольт для питания аналоговой части АЦП. На печатной плате предусмотрены зазоры общей шины питания для гальванической развязки питания цифровой и аналоговой частей АЦП, а также гальванической развязки преобразователя USB-UART. Этим обеспечивается защита слабых аналоговых сигналов от работающих цифровых устройств.

Программное обеспечение

При помощи программного обеспечения пользователь управляет градиентами, запускающим импульсом, а также получает результаты измерений посредством графического интерфейса (UI). На рис. 2 представлен его внешний вид с пояснениями.

Программное обеспечение было разработано на языке C++ при помощи библиотек пакета Borland C++ Builder версии 6.0 [6]. Этот пакет был выбран из-за того, что он приспособлен для наиболее легкого и быстрого создания приложений, использующих windows-окна. Программу условно можно разделить на 3 части: графический интерфейс, блок связи с внешним устройством, блок обработки данных.

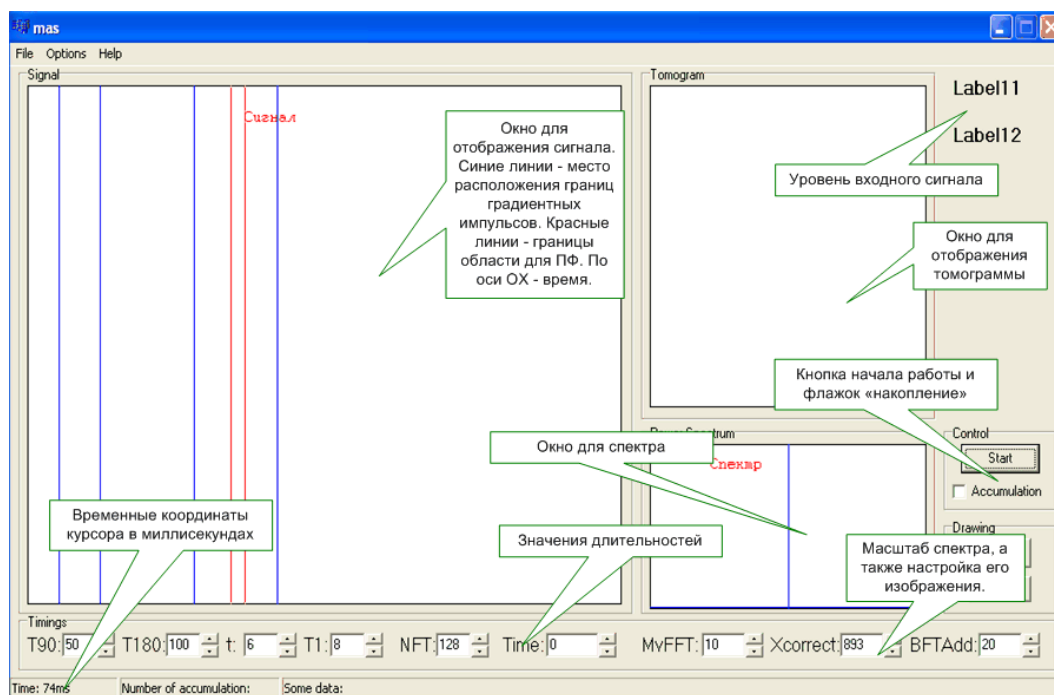


Рис. 2. Графический интерфейс

Блок связи с внешним устройством представляет собой отдельный программный поток, опрашивающий USB-порт на наличие переданных данных. Когда считанный за заданное пользователем время сигнал получен, поток генерирует Win-сообщение, которое перехватывает обработчик сообщений, находящийся в основном потоке программы. По этому сообщению происходит прорисовка сигнала, расчет спектра и изображения, после чего на внешний блок подается команда старта следующей последовательности импульсов.

Всего внешнее устройство понимает только 2 команды: код «2», означающий, что надо запускать импульсы с текущими значениями, и код «8», после которого следуют 8 значений длительностей, которые программа берет из полей ввода, расположенных в нижней части окна приложения (Timings). Если пользователь изменил хотя бы одно из значений, в контроллер будет передан массив из всех переменных.

В блок обработки данных входят три функции: отрисовки сигнала, расчета и отображения спектра мощности, а также расчета и отрисовки изображения.

Функция отрисовки изображения преобразует однобайтовые данные в 16-разрядные двухбайтовые из расчета, что нечетные байты – старшие, а четные – младшие, при этом единица в старшем разряде обозначает знак «минус», а затем рисует по точкам сигнал, учитывая выбранный масштаб.

Спектр мощности рассчитывается при помощи одномерного Фурье-преобразования, используя сигнал из правого и левого канала как мнимую и действительную часть функции. При этом расчет ведется по области сигнала, где располагается полезный сигнал с томографа. В окне его границы указаны красными линиями.

Расчет изображения ведется посредством серии математических преобразований: двойного Фурье-преобразования, вычисления среднего арифметического и интерполяции. Картинка рисуется в специальном окне попиксельно.

Заключение

В описываемой работе была поставлена задача создания системы управления учебным ЯМР-томографом для последующего использования ее в учебно-образовательных, а также в исследовательских целях. В дальнейшем планируется добавить возможность получения трехмерных изображений. Предполагается, что данная разработка поможет в исследовании различных особенностей ядерного магнитного резонанса, а также их влияния на получаемое изображение объекта.

Литература

1. Иванов В.А. Способ определения внутреннего строения материальных объектов. Авторское свидетельство 1112266, приоритет от 1960 г. // Бюллетень изобретений. 1984. № 33.
2. Неронов Ю.И., Иванов В.К. Разработка мини-ЯМР-томографа для учебных и научно-исследовательских целей // Научное приборостроение.— 2006. — Т. 16. — №2. — 97 с.
3. Серегин А.Н. Система управления учебным ЯМР-томографом // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. — 2006. — Выпуск 26. — С. 49–51.
4. Неронов Ю.И., Гарайбех Зияд. Ядерный магнитный резонанс в томографии и в спектральных исследованиях тканей головного мозга. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. — 105 с.
5. D2XX drivers currently available for FTDI devices. — Режим доступа: <http://www.ftdichip.com/Drivers/D2XX.htm>
6. Kent Reisdorph, Ken Henderson. Borland C++ Builder in 21 days. — «Sams Publishing», 1997. — 703 с.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РАСПРОСТРАНЕННЫХ В БЕЛАРУСИ БАКТЕРИОФАГОВ ЛАКТОКОККОВ

А.П. Райский (Белорусский государственный технологический университет)
Научный руководитель – к.б.н., доцент Н.А. Белясова
(Белорусский государственный технологический университет)

В работе представлены результаты идентификации с помощью мультиплекс-ПЦР-анализа и трансмиссионной электронной микроскопии коллекционных бактериофагов, выделенных из молочнокислых продуктов, произведенных на молочных комбинатах, расположенных в различных регионах Республики Беларусь.

Введение

Вирусы бактерий рода *Lactococcus* представляют собой весьма обширную и достаточно хорошо изученную группу вирулентных и умеренных фагов. Эти микроорганизмы вызывают постоянный интерес исследователей, прежде всего, из-за экономических издержек, которые несут предприятия молочной промышленности в результате развития фаговой инфекции. Поскольку в производстве ферментированных молочных продуктов чаще других используют молочнокислые бактерии *Lactococcus lactis*, то и фаги, вирулентные по отношению к данным бактериям, распространены на молочных комбинатах наиболее широко. По оценкам зарубежных авторов, до двух третей всех процессов ферментации осуществляется молочнокислыми бактериями *Lactococcus lactis* [1], и именно лактофаги являются причиной большинства неудачных технологических процессов в производстве кисломолочных продуктов как в Республике Беларусь, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья [2].

В настоящее время выделены и охарактеризованы сотни фагов лактококков. Они классифицированы в десять видов по результатам ДНК-ДНК гибридизации, согласно особенностям морфологии вирионов, выявленных с помощью электронной микроскопии, а также по данным сравнительного анализа геномов. Однако на молочных комбинатах чаще всего встречаются только лактофаги трех видов: с2, 936 и P335. Представители этих трех видов принадлежат к семейству *Siphoviridae* (имеют двухцепочечную ДНК и длинный несокращающийся хвост) отряда *Caudovirales*.

Во Франции, Германии, Новой Зеландии и Канаде, согласно литературным данным, доминирующими являются лактофаги вида 936 [1]. Представителей вида с2 наиболее часто обнаруживали на территории России, а представителей вида P335 выявляли в течение последних 20 лет в США, Дании и Новой Зеландии [3].

В данной работе представлены результаты идентификации лактофагов, широко распространенных на молочных комбинатах Республики Беларусь.

Объекты и методы исследования.

В работе использовали вирулентные лактофаги, выделенные из кисломолочных продуктов производства различных предприятий Республики Беларусь. Фаги титровали на чувствительных тест-культурах *Lactococcus lactis* из коллекции кафедры биотехнологии и биоэкологии БГТУ.

Получение фаголизатов с высоким титром осуществляли в жидкой среде M17 в присутствии 0,5% глюкозы и 5 мМ CaCl₂.

Микроскопические исследования проводили с помощью трансмиссионного электронного микроскопа марки JSM-300. Пробы готовили следующим образом. Фаги концентрировали центрифугированием при 36600 g в течение 40 мин при 4°C. Отмывали в 1 мл 0,1M растворе ацетата аммония. Повторно центрифугировали и ресуспендировали в 15 мкл ацетата аммония. На пленки-подложки наносили 10 мкл суспензии фагов. Через

1 мин удаляли с пленки фаговую суспензию и наносили 10 мкл 2%-го раствора фосфорно-вольфрамовой кислоты. Выдерживали 1 мин, удаляли раствор и высушивали.

ПЦР-анализ фаговых лизатов осуществляли в объеме 50 мкл, содержащем 1 моль/л каждого из трех пар праймеров, специфичных по отношению к фагам групп с2, 936 и P335; 1,25 U *Taq*-полимеразы ДНК («Fermentas», Литва), *Taq*-буфер 1x и 1 мкл лизата ($T=10^8$ БОЕ/мл). В качестве контроля вместо лизата в рабочую смесь вносили 1 мкл стерильной среды М17. Амплификацию осуществляли в термоциклере «Терцик» при следующих режимах: 3 мин при 94°C, 35 циклов по 30 с при 94°C, 1 мин при 50°C и 1 мин при 72°C, последний шаг – 7 мин при 72°C. ПЦР-продукты разделяли с использованием 1,5% агарозного геля в ТАЕ буфере, окрашивали бромистым этидием и визуализировали в УФ ($\lambda=280$ нм).

Результаты и обсуждение

Одним из основных критериев идентификации бактериофагов лактококков является морфология их вирионов. С помощью трансмиссионной электронной микроскопии (ТЕМ) исследованы вирионы 23 бактериофагов, вирулентных по отношению к бактериям *Lactococcus lactis*. В результате среди исследуемой выборки выделены три группы фагов, представители которых различаются по морфологии вирионов. На рис. 1 приведены фотографии трех типичных по морфологии фагов, а в табл. 1 – распределение всей коллекции по видам.

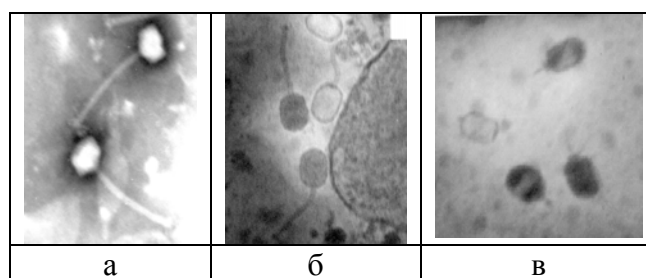


Рис. 1. Электронные микрофотографии лактофагов: а – БИМ БV-27 (вид 936), б – БИМ БV-36 (вид с2), в – БИМ БV-37 (вид P034)

В некоторых случаях на основании одних только морфологических признаков не удается идентифицировать лактофаги [4]. Labrie и Moineau [5] предложили для этих целей использовать еще один критерий – различия в размерах продуктов амплификации уникальных нуклеотидных последовательностей при ПЦР-анализе со специфическими олигонуклеотидами.

В данной работе для детекции уникальных последовательностей ДНК коллекционных фагов использовали метод мультиплексной ПЦР. Праймерами служили следующие последовательности:

- для фагов вида с2 5' CAATCGAAGCAGGTGTA AAAAGTTTCGAGAAC 3', 5' GCTTTATCCATTTGTAGGTATGCTTCTGC 3';
- для фагов вида 936 5' ATCAGTTGGCTCAATGGAAGACCAAGCGG 3', 5' GTTGCTTCTGCTGTTGGTGTCAAATGAGGA 3';
- для фагов группы P335: 5' GAAGCTAGGCGAATCAGTAAACTTGCTAG 3', 5' CGGCTATCTCGTCAATTGTTCCGGTTGC 3'.

Отжиг олигонуклеотидных праймеров с ДНК фагов вида с2 должен приводить к появлению ампликона размером 444 п.н., вида 936 – 318 п.н., вида P335 – 196 п.н.

ДНК всех коллекционных фагов исследовали в ходе ПЦР-анализа с указанными праймерами. Результаты одного из подобных экспериментов приведены на рис. 2.

Фаги	Принадлежность к виду согласно данным:	
	ТЕМ	ПЦР
БИМ ВУ-25	c2	c2
БИМ ВУ-26	c2	c2
БИМ ВУ-27	936	936
Е04	c2	c2
БИМ ВУ-28	c2	c2
БИМ ВУ-29	c2	c2
БИМ ВУ-30	936	936
БИМ ВУ-31	936	c2
БИМ ВУ-32	Р034	c2
БИМ ВУ-33	c2	c2
Е11	936	936
Е12	c2	c2
БИМ ВУ-34	c2	c2
Е14	c2	c2
Е15	Р034	-
БИМ ВУ-35	c2	c2
БИМ ВУ-36	c2	c2
Е18	c2	c2
БИМ ВУ-37	Р034	-
БИМ ВУ-38	c2	c2
БИМ ВУ-39	c2	c2
БИМ ВУ-40	c2	c2
БИМ ВУ-41	Р034	-

Таблица 1. Результаты видовой идентификации лактофагов

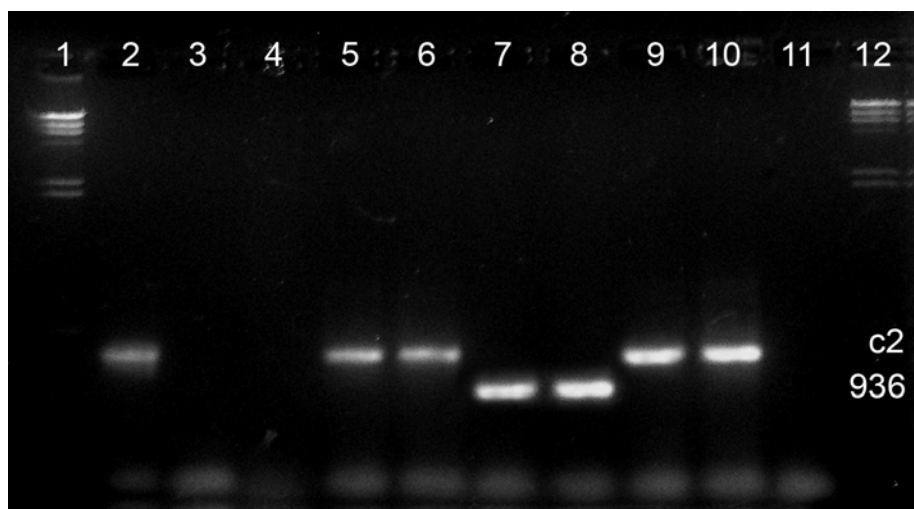


Рис. 2. Продукты ПЦР-анализа ДНК коллекционных лактофагов. 1, 12 – маркер, 2 – БИМ ВУ-29, 3 – БИМ ВУ-37, 4 – БИМ ВУ-41, 5 – Е14, 6 – Е18, 7 – БИМ ВУ-27, 8 – БИМ ВУ-31, 9 – БИМ ВУ-33, 10 – БИМ ВУ-38, 11 – контроль (не содержит фаголизата)

Оказалось, что среди 23 изолятов 17 относятся к виду *s2* и 3 изолята – к виду 936. Для трех фагов ампликоны не были выявлены. Также не было обнаружено ампликонов размером 196 п.н., типичных для фагов вида P335.

Однако ПЦР-анализ ДНК бактерий *L. lactis* позволил обнаружить характерные ампликоны размером 196 п.н. для трех из 30 исследованных штаммов. Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 3. Это может свидетельствовать о присутствии профагов вида P335 в ДНК исследованных заквасочных бактерий.

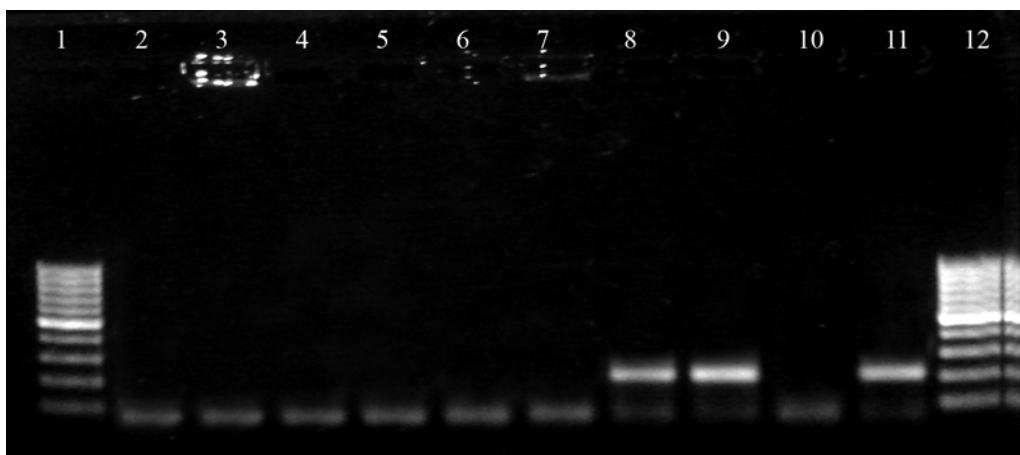


Рис. 3. Продукты ПЦР-анализа ДНК коллекционных штаммов бактерий *L. lactis*. 1, 12 – 100 b маркер, 2 – контроль (не содержит образца ДНК), 3 – 180, 4 – 400/6, 5 – 110/1, 6 – 313/1, 7 – 402/1, 8 – 415, 9 – 411, 10 – 111/2, 11 – 404/2

Для индукции профагов из лизогенных бактерий *L. lactis* использовали полупроводниковые фотокатализаторы на основе TiO_2 , на поверхности частиц которых при воздействии УФ ($\lambda=365$ нм) образуются радикальные формы кислорода ($\cdot OH$, $O_2^{\cdot -}$, $\cdot O_2H$) и пероксид водорода. Эти активные формы кислорода, которые генерируются под действием фотоэлектронов и фотодырок, взаимодействуют с различными клеточными структурами. В частности, они могут нарушать целостность мембран, инактивировать молекулы белков и нуклеиновых кислот и, таким образом, обеспечить индукцию профагов к литическому циклу.

В табл. 2 отражены результаты эксперимента по выявлению среди коллекционных лактококков лизогенных бактерий при воздействии УФ-облучения ($\lambda=365$ нм) в присутствии фотокатализатора (TiO_2). Длительность облучения составляла 2 мин. Контролем служили аналогичным образом обработанные суспензии, где вместо двуокиси титана присутствовало балластное вещество (SiO_2).

Культура	Исходная концентрация клеток, КОЕ/мл	Концентрация клеток (КОЕ/мл) после УФ-облучения ($\lambda=365$ нм)	Концентрация фаговых частиц в облученных суспензиях (БОЕ/мл) в присутствии	
			TiO_2	SiO_2
<i>L. lactis</i> 411	$1,2 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^8$	$2,3 \cdot 10^2$	0
<i>L. lactis</i> 415	$1,4 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^2$	0

Таблица 2. Концентрация клеток и индукция профагов после действия УФ-облучения ($\lambda=365$ нм) в присутствии фотокатализатора TiO_2

Полученные данные свидетельствуют о наличии полноценных фагов в составе геномов молочнокислых бактерий.

Для 18-ти коллекционных лактофагов результаты идентификации по данным морфологических исследований совпали с данными идентификации с помощью ПЦР-анализа. Для двух фагов (БИМ BV-31 и БИМ BV-32) результаты идентификации по двум использованным критериям носят противоречивый характер (табл. 1). Данное обстоятельство может являться следствием высокой вариабельности признаков лактофагов. Подобные фаги, сочетающие свойства представителей двух видов, описаны в литературе [4].

Сопоставление данных по морфологии вирионов и размерам ампликонов уникальных последовательностей ДНК позволяет констатировать, что состав группы лактофагов, наиболее широко представленных в кисломолочных продуктах производства Республики Беларусь, имеет свои особенности: в нем очевидно преобладание фагов с удлиненной головкой (с2) и достаточно высоко относительное содержание фагов с короткими отростками (P034). Согласно литературным данным [1, 6], фаголизис на производстве в большинстве случаев вызывают фаги с изометрической головкой, принадлежащие к виду 936 – они составляют обычно до половины всех изолятов; четверть изолятов относится к виду с2, а оставшаяся четверть – к гетерогенному виду P335, чьи представители характеризуются маленькой изометрической головкой и могут быть как вирулентными, так и умеренными; фаги семейства *Podoviridae* обуславливают фаголизис редко.

Заключение

С привлечением мультиплексного ПЦР-анализа и трансмиссионной электронной микроскопии осуществлена идентификация бактериофагов лактококков, выделенных на территории Республики Беларусь. На основании полученных данных 74% изученных фаговых изолятов отнесены к группе с2, 13% – к группе 936. В ходе амплификации ДНК трех фагов не выявлено специфических фрагментов. Исследование морфологии вирионов позволило отнести их к группе фагов р034. Умеренные бактериофаги группы P335 выявлены в ДНК 10% проанализированных заквасочных штаммов.

Литература

1. Brussow H. Phages of dairy bacteria // *Annu. Rev. Microbiol.* – 2001. – Vol. 55 – P. 283–303.
2. Szczepanska A.K., Hejnowicz M.S., Kolakowski P., Bardowski J. Biodiversity of *Lactococcus lactis* bacteriophages in Polish dairy environment // *Acta Biochimica Polonica.* – 2007. – Vol. 54. – P. 151–158.
3. Jarvis A.W., Fitzgerald G.F., Mata M., Mercenier A., Neve H., Powell I.B., Ronda C., Saxelin M., Teuber M. Species and type phages of lactococcal bacteriophages // *Intervirology.* – 1991. – Vol.32. – P. 2–9.
4. Fortier L., Bransi A., Moineau S. Genome sequence and global gene expression of Q54, a new phage species linking the 936 and c2 phage species of *Lactococcus lactis* // *Journal of Bacteriology.* – 2000. – Vol. 188. № 17. – P. 6101–6114.
5. Labrie S., Moineau S. Multiplex PCR for detection and identification of lactococcal bacteriophages // *Applied and Environmental Microbiology.* – 2000. – Vol. 66. № 3. – P. 987–994.
6. Deveau H., Labrie S.J., Chopin M.C., Moineau S. Biodiversity and classification of lactococcal phages // *Applied and Environmental Microbiology.* – 2006. – Vol. 72. – P. 4338–4346.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧАСТОТЫ СМЕЩЕННОГО
СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА****С.В. Арановский****Научный руководитель – д.т.н., профессор А.А. Бобцов**

Статья посвящена проблеме идентификации неизвестной частоты смещенного синусоидального сигнала $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$. Предлагается подход оценки частоты смещенного синусоидального сигнала, который является робастным относительно неучтенных возмущений, присутствующих в измерении полезного сигнала. В отличие от существующих аналогов, подход позволяет контролировать время оценки неизвестной частоты ω , причем его размерность существенно меньше. Возможности алгоритма могут быть легко распространены на случай сигнала, состоящего из нескольких гармоник.

1. Введение

В статье рассматривается проблема идентификации частоты ω синусоидального сигнала $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$ для любых неизвестных постоянных значений σ_0 , σ , ϕ . Проблема идентификации частоты синусоидального сигнала является важной проблемой, находящей различные применения в теоретических и инженерных дисциплинах (см., например, [1]). В частности, такая проблема возникает в задачах компенсации возмущающих воздействий, имеющих периодическую составляющую. Например, данная задача широко распространена для объектов управления, описываемых дифференциальным уравнением вида

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dy,$$

где $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$ – неизвестное возмущение. Если частота возмущающего воздействия известна, то проблема является тривиальной, и для ее решения можно использовать широко распространенный метод внутренней модели (см., например, [2]). Также следует отметить, что решение данной проблемы имеет большое значение для практики. Данные задачи встречаются в системах активной виброзащиты [3], в системах самообучения траекторного движения мобильных роботов [4, 5] и т.д. Если частота возмущающего воздействия неизвестна, то решение задачи его компенсации представляет собой достаточно сложную задачу, и одним из способов является идентификационный подход, рассматриваемый в данной статье.

На сегодняшний день можно выделить множество различных подходов, посвященных идентификации неизвестной частоты синусоидальной функции $\sigma \sin(\omega t + \phi)$ (см., например, [6–15]). Отметим, что широко известные алгоритмы идентификации параметра $\omega > 0$ не ограничены изучением случая одной синусоиды [6–8]. В частности, в статьях [13, 14] рассматривается проблема идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала, а в работах [9–12] опубликован общий случай гармонического сигнала, представляющего собой сумму n синусоидальных компонентов с различными частотами. Однако в большинстве работ, посвященных синтезу алгоритмов идентификации частоты в непрерывном времени, не обсуждается или отсутствует теоретическое обоснование увеличения быстродействия параметрической сходимости, что, в свою

очередь, также можно отнести к нерешенным задачам идентификации частот периодических сигналов.

Предлагаемый в данной статье алгоритм идентификации имеет динамический порядок, равный трем, что улучшает наиболее известные результаты, опубликованные в работах [9–14]. В работах [10–14] минимальная размерность динамического порядка алгоритма идентификации равна четырем, а в [9] размерность алгоритма достигает девятого порядка. Также предлагаемый в данной статье алгоритм идентификации, в отличие от [6–14], позволяет контролировать скорость сходимости настраиваемого параметра (оценки частоты сигнала $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$) и обладает робастными свойствами относительно неучтенных возмущений, присутствующих в измерении полезного сигнала. Кроме того, данный подход может быть легко расширен на случай сигнала, состоящего из нескольких гармоник.

2. Постановка задачи

Рассмотрим измеряемый сигнал вида

$$y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi), \quad (1)$$

представляющий собой смещенную синусоиду с неизвестными смещением σ_0 и амплитудой σ , неизвестной частотой ω и неизвестной фазой ϕ . Сформулируем цель управления как решение задачи синтеза алгоритма идентификации, обеспечивающего для любых σ_0 , σ , ϕ и $\omega > 0$ выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega - \hat{\omega}(t)| = 0, \quad (2)$$

где $\hat{\omega}(t)$ – текущая оценка параметра ω .

3. Основной результат

Известно, что для генерирования сигнала (1) можно использовать дифференциальное уравнение вида

$$\ddot{y}(t) = -\omega^2 \dot{y}(t) = \theta \dot{y}(t), \quad (3)$$

где $\theta = -\omega^2$ – постоянный параметр.

Лемма. Введем в рассмотрение вспомогательный фильтр второго порядка

$$\begin{cases} \dot{\zeta}_1(t) = \zeta_2(t), \\ \dot{\zeta}_2(t) = -2\alpha\zeta_2(t) - \alpha^2\zeta_1(t) + y(t), \\ \zeta(t) = \zeta_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

или

$$\zeta(t) = \frac{1}{(p + \alpha)^2} y(t), \quad (5)$$

где p – оператор дифференцирования и число $\alpha > 0$. Тогда дифференциальное уравнение (3) может быть представлено в виде

$$\dot{y}(t) = 2\alpha\dot{\zeta}(t) + \alpha^2\zeta(t) + \theta\zeta(t) + \varepsilon_y(t), \quad (6)$$

где $\varepsilon_y(t)$ – экспоненциально затухающая функция времени, определяемая ненулевыми начальными условиями.

Доказательство леммы приведено в приложении 1.

Замечание 1. Результат данной леммы может быть расширен для того случая, когда сигнал состоит из нескольких гармоник:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \sin(\omega_i t + \varphi_i).$$

В этом случае выражение (3) может быть заменено на следующее:

$$y^{(2n)} = \theta_n y^{(2n-2)} + \theta_{n-1} y^{(2n-4)} + \dots + \theta_2 \ddot{y} + \theta_1 y,$$

причем

$$\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2) = s^{2n} - \theta_n s^{2n-2} - \dots - \theta_2 s^2 - \theta_1 = s^{2n} - \theta(s).$$

В качестве вспомогательного фильтра в этом случае используется фильтр порядка $2n - 1$:

$$\bar{\zeta}(t) = \frac{1}{(p + \alpha)^{2n-1}} y(t),$$

а выражение (6) имеет вид

$$\dot{y}(t) = a(p)\bar{\zeta}(t) + \theta(p)\bar{\zeta}(t) = \bar{z}(t) + \psi^T(t)\theta_e,$$

где $a(p) = p(p + \alpha)^{2n-1} - p^{2n}$, $\psi(t) = \text{col}\{\bar{\zeta}^{(2n-2)}, \bar{\zeta}^{(2n-4)}, \bar{\zeta}^{(2n-6)}, \dots, \ddot{\bar{\zeta}}, \bar{\zeta}\}$, $\bar{z}(t) = a(p)\bar{\zeta}(t)$ и $\theta_e = \text{col}\{\theta_n, \theta_{n-1}, \dots, \theta_2, \theta_1\}$.

Замечание 2. Поскольку экспоненциально затухающая функция времени $\varepsilon_y(t) = L^{-1}\{D(s)/(s + \alpha)^2\}$ зависит от параметра α , то с увеличением значения α можно ускорить процесс сходимости $\varepsilon_y(t)$ к нулю.

Теперь на базе результатов леммы построим схему идентификации неизвестного параметра θ . Сначала предположим, что функция $\dot{y}(t)$ измеряется. Тогда, пренебрегая экспоненциально затухающим слагаемым $\varepsilon_y(t)$, запишем идеальный алгоритм идентификации следующим образом

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = k\dot{\zeta}^2(t)(\theta - \hat{\theta}(t)) = k\dot{\zeta}(t)z(t) - k\dot{\zeta}^2(t)\hat{\theta}(t), \quad \hat{\theta}(t) = \sqrt{|\hat{\theta}(t)|}, \quad (7)$$

где функция $z(t) = \dot{y}(t) - 2\alpha\dot{\zeta}(t) - \alpha^2\zeta(t)$ и число $k > 0$.

В следующем утверждении показывается работоспособность идеального алгоритма идентификации (7) для достижения цели (2).

Утверждение. Пусть алгоритм идентификации неизвестного параметра θ имеет вид

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = k\dot{\zeta}^2(t)(\theta - \hat{\theta}(t)),$$

где число $k > 0$, а функция $\zeta(t)$ является решением дифференциального уравнения (4). Тогда цель вида (2) будет выполнена. Доказательство утверждения приведено в приложении 2.

Замечание 3. При расширении алгоритма на случай сигнала, состоящего из нескольких гармоник, выражение идеального алгоритма идентификации (7) заменяется на

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = k\psi(t)\psi^T(t)(\theta - \hat{\theta}) = k\psi(t)(\dot{y}(t) - \bar{z}(t)) - k\psi(t)\psi^T(t)\hat{\theta},$$

где $k > 0$, а остальные обозначения имеют тот же смысл, что и в замечании 1.

Замечание 4. Из уравнения (П2.7) следует (см. доказательство утверждения), что при увеличении коэффициента k функция $\hat{\theta}(t)$ будет быстрее сходиться к параметру θ . Последнее означает, что, изменяя коэффициент k в алгоритме идентификации (7), можно уменьшать или увеличивать скорость сходимости настраиваемого параметра к истинному значению.

Замечание 5. Из уравнения (П2.7) следует, что система (П2.2) экспоненциально устойчива. Последнее гарантирует робастные свойства алгоритму идентификации по отношению к внешним возмущениям.

Однако по условиям задачи измеряется только сигнал $y(t)$, но не его производные. Для вывода реализуемой схемы идентификации рассмотрим переменную

$$\chi(t) = \hat{\Theta}(t) - k\dot{\zeta}(t)y(t). \quad (8)$$

Дифференцируя уравнение (8), получаем:

$$\begin{aligned} \dot{\chi}(t) &= \dot{\hat{\Theta}}(t) - k\ddot{\zeta}(t)y(t) - k\dot{\zeta}(t)\dot{y}(t) = \\ &= k\dot{\zeta}(t)(\dot{y}(t) - 2\alpha\ddot{\zeta}(t) - \alpha^2\dot{\zeta}(t)) - k\dot{\zeta}^2(t)\hat{\Theta}(t) - k\ddot{\zeta}(t)y(t) - k\dot{\zeta}(t)\dot{y}(t) = \\ &= k\dot{\zeta}(t)(-2\alpha\ddot{\zeta}(t) - \alpha^2\dot{\zeta}(t)) - k\dot{\zeta}^2(t)\hat{\Theta}(t) - k\ddot{\zeta}(t)y(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Из уравнений (8), (9) получаем реализуемый алгоритм идентификации вида

$$\dot{\chi}(t) = k\dot{\zeta}(t)(-2\alpha\ddot{\zeta}(t) - \alpha^2\dot{\zeta}(t)) - k\dot{\zeta}^2(t)\hat{\Theta}(t) - k\ddot{\zeta}(t)y(t), \quad (10)$$

$$\hat{\Theta}(t) = \chi(t) + k\dot{\zeta}(t)y(t), \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{\varsigma}_1(t) = \varsigma_2(t), \\ \dot{\varsigma}_2(t) = -2\alpha\varsigma_2(t) - \alpha^2\varsigma_1(t) + y(t), \\ \zeta(t) = \varsigma_1(t). \end{cases} \quad (12)$$

4. Пример

Для иллюстрации работоспособности алгоритма (10)–(12) рассмотрим задачу идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала без возмущений и с возмущением. На рис. 1 и 2 представлены графики настройки параметра $\hat{\Theta}(t)$ для смещенного синусоидального сигнала $y(t) = 2 + \sin 2t$. Графики компьютерного моделирования иллюстрируют, что с увеличением коэффициента k настраиваемый параметр $\hat{\Theta}(t)$ сходится быстрее к истинному значению θ (см. замечание 2).

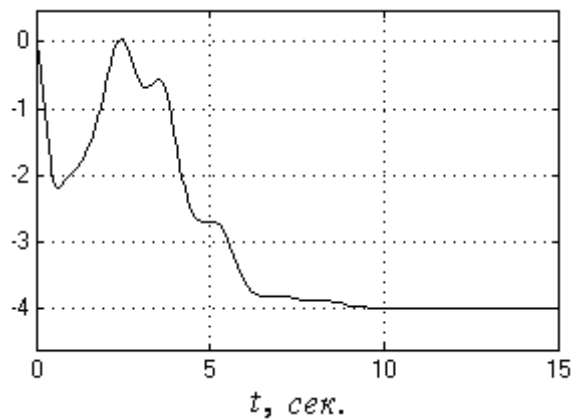


Рис. 1. График функции $\hat{\Theta}(t)$ для $\alpha = 1$ и $k = 10$

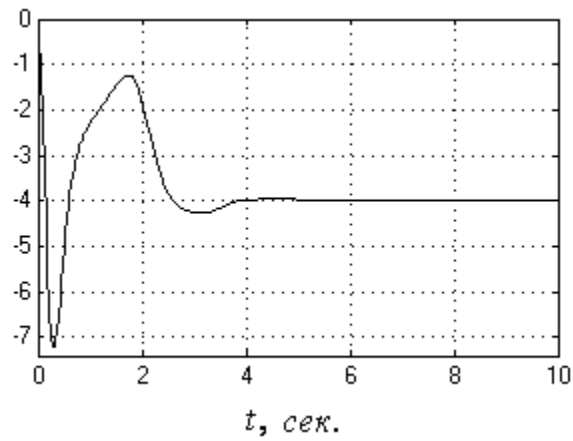


Рис. 2. График функции $\hat{\theta}(t)$ для $\alpha = 2$ и $\kappa = 50$

Проведем моделирование для алгоритма, расширенного на случай двух гармоник в сигнале (идентифицируемый сигнал $y(t) = 2\sin 3t + 3\cos t$, истинные значения параметров $\theta_1 = -9$ и $\theta_2 = -10$). На рис. 3 и 4 представлены графики настройки параметров $\hat{\theta}_1(t)$ и $\hat{\theta}_2(t)$.

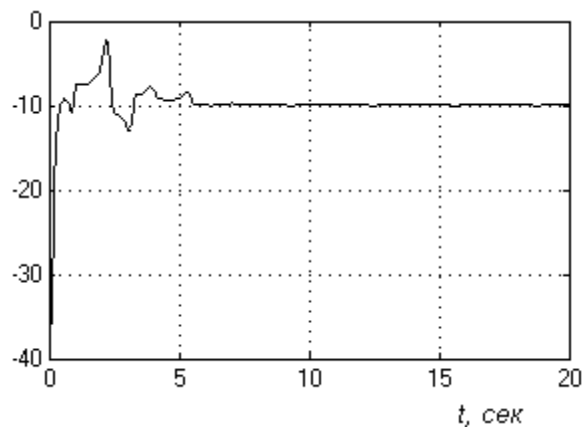


Рис. 3. График настройки параметра $\hat{\theta}_2(t)$

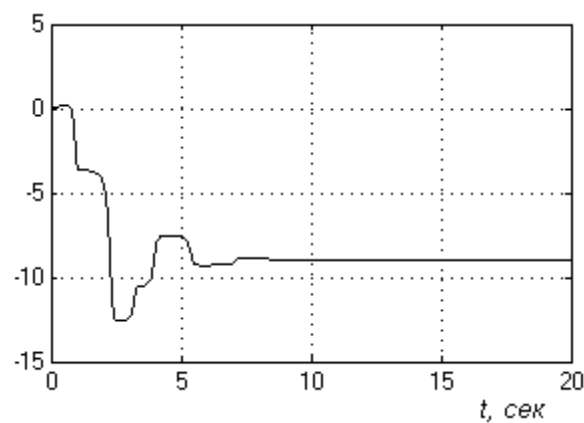


Рис. 4. График настройки параметра $\hat{\theta}_1(t)$

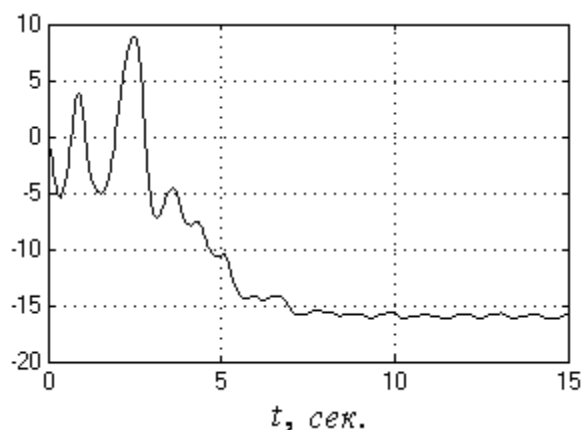


Рис. 5. График функции $\Theta(t)$ для $\alpha = 1$ и $\kappa = 10$

На рис. 5 представлен график настройки параметра $\Theta(t)$ для подверженного возмущению $0.2 \sin 10t$ смещенного синусоидального сигнала $y(t) = -3 + 2 \sin 4t + 0.2 \sin 10t$. График компьютерного моделирования иллюстрирует сохранение свойств робастности относительно неучтенных возмущений (см. замечание 3).

Замечание 6. Следует отметить, что функциональность алгоритма оценки при наличии внешнего возмущения сохраняется лишь при выполнении условия малости амплитуды возмущающего воздействия относительно амплитуды оцениваемого сигнала. Действительно, если амплитуда действующего возмущения сравнима с амплитудой оцениваемого сигнала, то алгоритм не сможет «выбрать», какой именно сигнал должно оценивать. Таким образом, ошибка оценивания зависит от отношения амплитуд возмущения и оцениваемого сигнала – чем оно меньше, тем точнее оценка.

5. Заключение

В статье была рассмотрена задача идентификации частоты синусоидального сигнала $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$ для любых неизвестных постоянных значений σ_0 , σ , ϕ , $\omega > 0$. Был синтезирован алгоритм идентификации (10)–(12). Данный алгоритм, в отличие от известных аналогов [6–15]:

- обладает устойчивой работой при наличии неучтенных возмущений, присутствующих в измерении полезного смещенного синусоидального сигнала;
- позволяет за счет увеличения коэффициента k ускорять процесс сходимости оценки $\Theta(t)$ к θ (см. замечания 1 и 2, а также пример);
- имеет наименьший динамический порядок по сравнению с [9–14];
- может быть распространен на сигнал, состоящий из нескольких гармоник.

Приложение 1

Доказательство леммы. Переходя к изображениям Лапласа для уравнения (3), получаем

$$sY(s) = \frac{s}{(s+\alpha)^2} \theta Y(s) + \frac{2\alpha s^2 + \alpha^2 s}{(s+\alpha)^2} Y(s) + \frac{D(s)}{(s+\alpha)^2}, \quad (\text{П1.1})$$

где s – комплексная переменная, $Y(s) = L\{y(t)\}$ – образ Лапласа сигнала $y(t)$, а полином $D(s)$ обозначает сумму всех членов, содержащих ненулевые начальные условия.

Из уравнения (П1.1) находим

$$\dot{y}(t) = \frac{P}{(p+\alpha)^2} \theta y(t) + \frac{2\alpha p^2 + \alpha^2 p}{(p+\alpha)^2} y(t) + \varepsilon_y(t), \quad (\text{П1.2})$$

где экспоненциально затухающая функция времени $\varepsilon_y(t) = L^{-1}\{D(s)/(s+\alpha)^2\}$ определяется ненулевыми начальными условиями. Подставляя (5) в уравнение (П1.2), получаем

$$\dot{y}(t) = 2\alpha\ddot{\zeta}(t) + \alpha^2\dot{\zeta}(t) + \theta\zeta(t) + \varepsilon_y(t),$$

что и требовалось доказать.

Приложение 2

Доказательство утверждения. Рассмотрим ошибку оценивания параметра θ следующего вида

$$\tilde{\theta}(t) = \theta - \hat{\theta}(t). \quad (\text{П2.1})$$

Дифференцируя уравнение (П2.1), имеем

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}(t) = 0 - k\dot{\zeta}^2(t)\tilde{\theta}(t) = -k\dot{\zeta}^2(t)\tilde{\theta}(t). \quad (\text{П2.2})$$

Решая дифференциальное уравнение (П2.2), получаем

$$\tilde{\theta}(t) = \tilde{\theta}(t_0)e^{-k\gamma(t,t_0)}, \quad (\text{П2.3})$$

где функция

$$\gamma(t,t_0) = \int_{t_0}^t \dot{\zeta}^2(\tau) d\tau. \quad (\text{П2.4})$$

Очевидно, что в силу гурвицевости полинома $(p+\alpha)^2$, функция $\zeta(t)$ будет иметь вид

$$\zeta(t) = \bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma} \sin(\omega t + \bar{\phi}) + \Delta, \quad (\text{П2.5})$$

где $\bar{\sigma}_0$, $\bar{\sigma}$ и $\bar{\phi}$ некоторые постоянные коэффициенты, зависящие от параметров сигнала $y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi)$ и числа α , а Δ – экспоненциально затухающая составляющая, обусловленная переходным процессом. Пренебрегая слагаемым Δ и дифференцируя (П2.5), получаем

$$\dot{\zeta}(t) = \bar{\sigma}\omega \cos(\omega t + \bar{\phi}).$$

Подставляя $\dot{\zeta}(t) = \bar{\sigma}\omega \cos(\omega t + \bar{\phi})$ в (П2.4), имеем

$$\begin{aligned} \gamma(t,t_0) &= \int_{t_0}^t \dot{\zeta}^2(\tau) d\tau = \bar{\sigma}^2 \omega^2 \int_{t_0}^t (\cos(\omega\tau + \bar{\phi}))^2 d\tau = \\ &= \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 t}{2} - \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 t_0}{2} + \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 \sin(2\omega t + 2\bar{\phi})}{4\omega} - \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 \sin(2\omega t_0 + 2\bar{\phi})}{4\omega} = \gamma_0 t + \gamma_1(t,t_0), \end{aligned} \quad (\text{П2.6})$$

где функция

$$\gamma_1(t,t_0) = -\frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 t_0}{2} + \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 \sin(2\omega t + 2\bar{\phi})}{4\omega} - \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2 \sin(2\omega t_0 + 2\bar{\phi})}{4\omega}$$

ограничена для любого t , а число $\gamma_0 = \frac{\bar{\sigma}^2 \omega^2}{2}$.

Подставим (П2.6) в (П2.3):

$$\tilde{\theta}(t) = \tilde{\theta}(t_0)e^{-k\gamma_0 t} e^{-k\gamma_1(t,t_0)}. \quad (\text{П2.7})$$

Из уравнения (П2.7) следует, что $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0$, а, следовательно, $\hat{\theta}(t) = \sqrt{|\hat{\theta}(t)|} \rightarrow \theta(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Утверждение доказано.

Литература

1. Clarke D.W. On the design of adaptive notch filters // *Int. J. Adapt. Control.* – 2001. – V. 15. – P. 715–744.
2. Уонем М. Линейные многомерные системы: Геометрический подход. – М.: Наука, 1980.
3. Никифоров В.О., Гутнер И.Е., Сергачев И.В. Система активной виброзащиты: разработка, результаты испытаний и перспективы развития // *Мехатроника, автоматизация и управление.* – 2004. – №2.
4. Lyamin A.V., Shiegin V.V., Bobtsov A.A. Path-following and Adaptation of Wheeled Mobile Robots for Motion Along Unknown Paths // *29th International Symposium on Robotics.* Birmingham, 1998. – P. 211–214.
5. Бобцов А.А., Дударенко Н.А., Лямин А.В. Траекторное управление двухприводным роботом с использованием методов адаптации и самообучения. / *Мобильные роботы и системы: Материалы научной школы-конференции.* – М.: Изд-во Московского университета, 2000. – С. 114–126.
6. Bodson M., Douglas S.C. Adaptive algorithms for the rejection of periodic disturbances with unknown frequencies // *Automatica.* – 1997. – V. 33. – P. 2213–2221.
7. Hsu L., Ortega R., Damm G.A globally convergent frequency estimator // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 1999. – V. 46. – P. 967–972.
8. Mojiri M. and Bakhshai A.R. An Adaptive Notch Filter for Frequency Estimation of a Periodic Signal // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2004. – V. 49. – P. 314–318.
9. Marino R. and Tomei R. Global Estimation of Unknown Frequencies // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2002. – V. 47. – P. 1324–1328.
10. Xia X. Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2002. – V. 47. – P. 1188–1193.
11. Obregón-Pulido G., Castillo-Toledo B. and Loukianov A. A. Globally Convergent Estimator for n -Frequencies // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2002. – V. 47. – P. 857–863.
12. Bobtsov A., Lyamin A., Romasheva D. Algorithm of parameter's identification of polyharmonic function // *15 th IFAC World Congress on Automatic Control.* Barcelona, Spain, 2002.
13. Бобцов А.А., Кремлев А.С. Адаптивная идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала // *Известия вузов. Приборостроение.* – 2005. – №4. – С. 22–26.
14. Hou M. Amplitude and frequency estimator of a sinusoid // *IEEE Transactions on Automatic Control.* – 2005. – V. 50. – P. 855–858.
15. Дьяконов В. MATLAB 6.0, учебный курс. – СПб: Питер, 2001.

УРАВНЕНИЕ ПЕЛЛЯ И СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ВТОРОЙ СТЕПЕНИ С ПАРАМЕТРАМИ

О.Г. Балканова, К.В. Правдин

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент А.В. Норин

В статье предлагается алгоритм определения параметров систем квадратных уравнений при работе в поле рациональных чисел. Алгоритм основывается на известной процедуре решения уравнений Пелля.

Введение

В связи с решением прикладных задач информационных технологий в последние годы возник интерес к классическим разделам теории чисел, в частности к решению диофантовых уравнений. В данной работе необходимо найти алгоритм определения целых параметров b и c системы квадратных уравнений

$$\begin{cases} a_1x^2 + bx + c = 0 \\ a_2y^2 + by + c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

так, чтобы каждое из уравнений (1) имело рациональные корни. Натуральные числа a_1 , a_2 ($a_1 \neq a_2$) предполагаются заданными.

Задача носит прикладной характер. Полученные результаты могут быть использованы при компьютерном составлении учебных заданий по элементарной математике.

Часть 1. Частный случай

Рассмотрим частный случай $a_1 = 2$, $a_2 = 1$. Система (1) имеет вид

$$\begin{cases} 2x^2 + bx + c = 0 \\ y^2 + by + c = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Заметим, что при решении системы в поле рациональных чисел второе уравнение (2) должно иметь целые корни, а первое – рациональные со знаменателем $q = 2$. Чтобы каждое уравнение имело рациональные корни, необходимо, чтобы оба дискриминанта $D1$ и $D2$ были полными квадратами целых чисел t_1 и t_2 :

$$\begin{cases} D1 = b^2 - 8c = t_1^2 \\ D2 = b^2 - 4c = t_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

Выразим c и b^2 через t_1^2 и t_2^2 :

$$\begin{cases} c = \frac{t_2^2 - t_1^2}{4} \\ b^2 = 2t_2^2 - t_1^2 \end{cases} \quad (4)$$

Разделим второе уравнение полученной системы на b^2 и введем новые переменные

$$\begin{cases} u = \frac{t_1}{b} \\ v = \frac{t_2}{b} \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, получим уравнение Пелля, являющееся диофантовым уравнением второй степени:

$$u^2 - 2v^2 = -1. \quad (6)$$

Его решения в натуральных числах можно получить, следуя классической рекуррентной схеме [1]. Нетрудно указать начальные значения $u_0 = 1$, $v_0 = 1$. Все остальные решения получаются из рекуррентных соотношений:

$$\begin{cases} u_{n+1} = 3u_n + 4v_n \\ v_{n+1} = 2u_n + 3v_n, \text{ где } n \in \mathbb{N}_0. \\ u_0 = v_0 = 1 \end{cases} \quad (7)$$

Приведем несколько первых значений (u_n, v_n) : $(1, 1), (7, 5), (41, 29), (239, 169), (1393, 985), (8119, 5741), \dots$. Применяя метод бесконечного спуска Ферма [2], нетрудно показать, что других решений в натуральных числах уравнение (6) не имеет.

Выбирая пары (u_n, v_n) и задавая целые значения b , по формулам (5) можно получить t_1 и t_2 . Тогда из первого уравнения системы (4) находим c :

$$c = \frac{v_n^2 - u_n^2}{4} b^2.$$

Докажем, что c при этом является целым числом.

Утверждение 1. Числа u_n, v_n являются нечетными.

Воспользуемся методом математической индукции. $x_0 = 1$, $y_0 = 1$ – нечетные. Тогда по формуле (7) $x_1 = 7$, $y_1 = 5$ – тоже нечетные.

Пусть x_k, y_k – нечетные, тогда их можно записать в виде $x_k = 2l + 1$, $y_k = 2m + 1$, где l и m – целые числа. Тогда

$$x_{k+1} = 3(2l + 1) + 4(2m + 1) = 2(3k + 4m + 3) + 1 = 2n_1 + 1,$$

$$y_{k+1} = 2(2l + 1) + 3(2m + 1) = 2(2l + 3m + 2) + 1 = 2n_2 + 1,$$

где n_1, n_2 – целые. Следовательно, x_{k+1}, y_{k+1} – нечетные. По методу математической индукции все x_n и y_n , полученные по формулам (7), являются нечетными числами. Утверждение доказано. ■

Утверждение 2. $(v_n^2 - u_n^2)$ делится на 4.

Так как (u_n, v_n) – решения уравнения (6), то $u_n^2 - 2v_n^2 = -1$ или $v_n^2 - u_n^2 = 1 - v_n^2$. Следовательно, достаточно показать, что $1 - v_n^2$ делится на 4. По утверждению 1 число v_n – нечетное, поэтому v_n может быть записано в виде $v_n = 2l + 1$, где $l \in \mathbb{Z}$. Тогда

$$1 - v_n^2 = 1 - (2l + 1)^2 = 1 - 4l^2 - 4l - 1 = 4(-l^2 - l) \div 4,$$

значит, $(v_n^2 - u_n^2) \div 4$, что и требовалось доказать. ■

Заметим, что если в системе (3) взять b с противоположным знаком, то t_1 и t_2 останутся целыми. Поэтому, кроме положительных b , для решения поставленной задачи рассмотрим также им противоположные. Таким образом, заменив для удобства вычислений $v_n^2 - u_n^2$ на $-(v_n^2 - 1)$, получим формулы для нахождения значений b и c :

$$\begin{cases} c = -\frac{v_n^2 - 1}{4} k^2, \\ b = k \end{cases} \quad (8)$$

где $k \in \mathbb{Z}$, v_n – число из пары (u_n, v_n) , полученной по формулам (7). Опуская тривиальный случай $n = 0$, приведем несколько первых систем квадратных уравнений (2), имеющих рациональные корни.

- $n = 1$: $(u_1, v_1) = (7, 5)$,

$$b = k, \quad c = -6k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -6), (-1, -6), (2, -24), (-2, -24), (3, -54), (-3, -54), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 6 = 0 \\ y^2 + y - 6 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - x - 6 = 0 \\ y^2 - y - 6 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 + 2x - 24 = 0 \\ y^2 + 2y - 24 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - 2x - 24 = 0 \\ y^2 - 2y - 24 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 3x - 54 = 0 \\ y^2 + 3y - 54 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - 3x - 54 = 0 \\ y^2 - 3y - 54 = 0 \end{cases}, \quad \dots$$

- $n = 2$: $(u_2, v_2) = (41, 29)$,

$$b = k, \quad c = -210k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -210), (-1, -210), (2, -840), (-2, -840), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 210 = 0 \\ y^2 + y - 210 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - x - 210 = 0 \\ y^2 - y - 210 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 + 2x - 840 = 0 \\ y^2 + 2y - 840 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - 2x - 840 = 0 \\ y^2 - 2y - 840 = 0 \end{cases}, \quad \dots$$

- $n = 3$: $(u_3, v_3) = (239, 169)$,

$$b = k, \quad c = -7140k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -7140), (-1, -7140), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 7140 = 0 \\ y^2 + y - 7140 = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} 2x^2 - x - 7140 = 0 \\ y^2 - y - 7140 = 0 \end{cases}, \quad \dots$$

Аналогично можно получить другую серию значений b и c , при которых система квадратных уравнений (2) имеет рациональные корни. Для этого разделим второе уравнение системы (4) на t_1^2 и введем новые переменные

$$\begin{cases} \tilde{u} = \frac{b}{t_1} \\ \tilde{v} = \frac{t_2}{t_1} \end{cases}.$$

В результате имеем уравнение, аналогичное уравнению (6):

$$\tilde{u}^2 - 2\tilde{v}^2 = -1.$$

Определив его решения, получим еще одну формулу для нахождения значений b и c :

$$\begin{cases} c = \frac{v_n^2 - 1}{4} k^2 \\ b = u_n k \end{cases}, \quad (9)$$

где $k \in \mathbb{Z}$, u_n и v_n определяются по формулам (7).

Опуская тривиальный случай $n = 0$, приведем несколько первых систем квадратных уравнений (2), имеющих рациональные корни.

- $n = 1$: $(u_1, v_1) = (7, 5)$,

$$b = 7k, \quad c = 6k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (7, -6), (-7, -6), (14, -24), (-14, -24), (21, -54), (-21, -54), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 7x + 6 = 0 \\ y^2 + 7y + 6 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 7x + 6 = 0 \\ y^2 - 7y + 6 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 14x + 24 = 0 \\ y^2 + 14y + 24 = 0 \end{cases}, \\ \begin{cases} 2x^2 - 14x + 24 = 0 \\ y^2 - 14y + 24 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 14x + 54 = 0 \\ y^2 + 14y + 54 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 14x + 54 = 0 \\ y^2 - 14y + 54 = 0 \end{cases}, \dots$$

• $n = 2: (u_2, v_2) = (41, 29),$

$$b = 41k, \quad c = 210k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (41, -210), (-41, -210), (82, -840), (-82, -840), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 41x + 210 = 0 \\ y^2 + 41y + 210 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 41x + 210 = 0 \\ y^2 - 41y + 210 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 82x + 840 = 0 \\ y^2 + 82y + 840 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 82x + 840 = 0 \\ y^2 + 82y + 840 = 0 \end{cases}, \dots$$

• $n = 3: (u_3, v_3) = (239, 169),$

$$b = 239k, \quad c = 7140k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (239, -7140), (-239, -7140), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 239x + 7140 = 0 \\ y^2 + 239y + 7140 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 239x + 7140 = 0 \\ y^2 - 239y + 7140 = 0 \end{cases}, \dots$$

Часть 2. Общий случай: a_1, a_2 – произвольные натуральные числа ($a_2 \neq a_1$)

Рассмотрим задачу в общем виде. Не умаляя общности, положим $a_2 > a_1$. Чтобы каждое уравнение системы (1) имело рациональные корни, необходимо, чтобы оба дискриминанта $D1$ и $D2$ были полными квадратами целых чисел t_1 и t_2 .

$$\begin{cases} D1 = b^2 - 4a_1c = t_1^2 \\ D2 = b^2 - 4a_2c = t_2^2 \end{cases}$$

Выразим c и b^2 через t_1^2 и t_2^2 :

$$\begin{cases} c = \frac{t_1^2 - t_2^2}{4(a_2 - a_1)} \\ b^2 = \frac{a_2 t_1^2 - a_1 t_2^2}{a_2 - a_1} \end{cases} \quad (10)$$

После умножения второго уравнения полученной системы на $\frac{a_2(a_2 - a_1)}{b^2}$ имеем:

$$\left(\frac{a_2 t_1}{b}\right)^2 - a_1 a_2 \left(\frac{t_2}{b}\right)^2 = a_2(a_2 - a_1).$$

Введя новые переменные

$$\begin{cases} u = \frac{a_2 t_1}{b} \\ v = \frac{t_2}{b} \\ d = a_1 a_2 \\ m = a_2(a_2 - a_1) \end{cases}, \quad (11)$$

получим

$$u^2 - dv^2 = m. \quad (12)$$

Уравнение (12) часто называют уравнением, подобным уравнению Пелля. При этом d – натуральное, не являющееся точным квадратом, m – целое и $\{(u_n, v_n)\}$ – множество решений уравнения. Заметим, что $t_1 = \frac{bu_n}{a_2}$ и $t_2 = bv_n$ должны быть целыми.

Данное условие выполняется посредством выбора значений b ; t_2 принимает целые значения для любого $b \in Z$, поэтому достаточно чтобы $bu_n : a_2$. Рассмотрим $\delta = \text{НОД}(u_n, a_2)$, тогда

$$\begin{cases} a_2 = \alpha \delta \\ u_n = \bar{u}_n \delta \end{cases},$$

где $\alpha, \bar{u}_n \in Z$ и взаимно просты. Верно, что $bu_n : a_2 \Leftrightarrow b\bar{u}_n : \alpha \Leftrightarrow b : \alpha$. Поэтому положим $b = \alpha k$, $k \in Z$. Тогда из системы (10) следует:

$$\begin{cases} b = \alpha k \\ c = -\frac{\alpha^2(v_n^2 - 1)}{4a_2} k^2, \text{ где } \alpha = \frac{a_2}{\text{НОД}(u_n, a_2)}, k \in Z. \end{cases} \quad (13)$$

Аналогичный результат можно получить при умножении второго уравнения системы (10) на $\frac{a_2(a_2 - a_1)}{t_2^2}$ и введении новых переменных

$$\begin{cases} u = \frac{a_2 t_1}{t_2} \\ v = \frac{b}{t_2} \\ d = a_2(a_2 - a_1) \\ m = a_1 a_2 \end{cases}. \quad (14)$$

С учетом условия делимости $t_2 u_2$ на a_2 имеем:

$$\begin{cases} b = \alpha v_n k \\ c = \frac{\alpha^2(v_n^2 - 1)}{4a_2} k^2, \text{ где } \alpha = \frac{a_2}{\text{НОД}(u_n, a_2)}, k \in Z. \end{cases} \quad (15)$$

Далее рассмотрим метод нахождения решений уравнения (12), описанный в [3]. Введем обозначения: d – натуральное число, не являющееся точным квадратом; s – наименьшее натуральное число, для которого существует такое натуральное число t , что $s^2 - dt^2 = 1$; $q = s + \sqrt{dt}$; m – некоторое целое число, $m \neq 0$.

Пусть $q < q^2 < q^3 < \dots$ – возрастающая последовательность. Если $q > 1$, она стремится к бесконечности, а убывающая последовательность $\frac{1}{q} > \frac{1}{q^2} > \frac{1}{q^3} > \dots$ – к нулю.

Поэтому существует целое n : $q^{n-1} < u + v\sqrt{d} \leq q^n$. Введем число $W = \frac{u + v\sqrt{d}}{q^{n-1}}$. W

представимо в виде: $W = z + l\sqrt{d}$, где $z, l \in \mathbb{Z}$. При этом

$$z^2 - dl^2 = m, \quad (*)$$

$$1 < z + l\sqrt{d} \leq q. \quad (**)$$

Теорема. Рассмотрим множество M пар (z, l) , удовлетворяющих условиям $(*)$ и $(**)$. Верны следующие утверждения.

- 1) Если $M = \emptyset$, то уравнение (12) не имеет решений в целых числах u и v .
- 2) M конечно.
- 3) Все целочисленные решения уравнения (12) можно получить из формул

$$u + v\sqrt{d} = \pm(z + l\sqrt{d})q^n, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad \blacksquare$$

При нахождении пар (z, l) множества M часто оказываются полезными оценки

$$\begin{cases} |z| < \frac{q + |m|}{2} \\ |l| < \frac{q + |m|}{2\sqrt{d}} \end{cases}. \quad (16)$$

Таким образом, алгоритм нахождения параметров уравнения состоит из следующих пунктов:

1. выбрать a_1, a_2 – произвольные натуральные числа, $a_2 > a_1$;
2. используя теорему и оценки (16), решить уравнение Пелля (12) при условиях (11), (14);
3. получить значения параметров b и c по формулам (13), (15).

Пример

1. Выберем $a_1 = 2$, $a_2 = 7$ и получим систему (1) в виде

$$\begin{cases} 2x^2 + bx + c = 0 \\ 7y^2 + by + c = 0 \end{cases}. \quad (17)$$

А). $d = 14$, $m = 35$ – значения b и c получаются из системы (13).

2. Запишем уравнение Пелля (12): $u^2 - 14v^2 = 35$. Минимальным решением уравнения $s^2 - 14t^2 = 1$ является $(s, t) = (15, 4)$, поэтому $q = 15 + 4\sqrt{14}$. Элементы множества $M = \{(7, 1), (7, -1)\}$ удовлетворяют условиям $(*)$, $(**)$. Тогда по теореме решением уравнения будет любая пара чисел (u, v) такая, что

$$a). \quad u + v\sqrt{14} = \pm(7 + \sqrt{14})(15 + 4\sqrt{14})^n, \quad \text{где } n \in \mathbb{Z},$$

$$б). \quad u + v\sqrt{14} = \pm(7 - \sqrt{14})(15 + 4\sqrt{14})^n, \quad \text{где } n \in \mathbb{Z}.$$

3. Опуская тривиальный случай $n = 0$, приведем несколько первых систем квадратных уравнений (17), имеющих рациональные корни.

$$a). \quad (z, l) = (7, 1):$$

- $n = 1$: $(u_1, v_1) = (161, 43)$, $\text{НОД}(161, 7) = 7$, $\alpha = 1$.
 $b = k$, $c = -66k^2$, $k \in \mathbb{Z}$,
 $(b, c) = (1, -66), (-1, -66), (2, -264), (-2, -264), (3, -594), (-3, -594), \dots$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 66 = 0 \\ 7y^2 + y - 66 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - x - 66 = 0 \\ 7y^2 - y - 66 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 2x - 264 = 0 \\ 7y^2 + 2y - 264 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 - 2x - 264 = 0 \\ 7y^2 - 2y - 264 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 3x - 594 = 0 \\ 7y^2 + 3y - 594 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 3x - 594 = 0 \\ 7y^2 - 3y - 594 = 0 \end{cases}, \dots$$

- $n = 2$: $(u_2, v_2) = (4823, 1289)$, $\text{НОД}(4823, 7) = 7$, $\alpha = 1$.

$$b = k, \quad c = -59340k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -59340), (-1, -59340), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 59340 = 0 \\ 7y^2 + y - 59340 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - x - 59340 = 0 \\ 7y^2 - y - 59340 = 0 \end{cases}, \dots$$

б). $(z, l) = (7, -1)$:

- $n = 1$: $(u_1, v_1) = (49, 13)$, $\text{НОД}(49, 7) = 7$, $\alpha = 1$.

$$b = k, \quad c = -7k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -7), (-1, -7), (2, -28), (-2, 28), (3, -63), (-3, -63), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 7 = 0 \\ 7y^2 + y - 7 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - x - 7 = 0 \\ 7y^2 - y - 7 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 2x - 28 = 0 \\ 7y^2 + 2y - 28 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 - 2x - 28 = 0 \\ 7y^2 - 2y - 28 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 3x - 63 = 0 \\ 7y^2 + 3y - 63 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 3x - 63 = 0 \\ 7y^2 - 3y - 63 = 0 \end{cases}, \dots$$

- $n = 2$: $(u_2, v_2) = (1463, 391)$, $\text{НОД}(1463, 391) = 7$, $\alpha = 1$.

$$b = k, \quad c = -5460k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (1, -5460), (-1, -5460), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + x - 5460 = 0 \\ 7y^2 + y - 5460 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - x - 5460 = 0 \\ 7y^2 - y - 5460 = 0 \end{cases}, \dots$$

В). $d = 35$, $m = 14$ – значения b и c получаются из системы (15).

- Запишем уравнение Пелля (12): $u^2 - 35v^2 = 14$. Минимальным решением уравнения $s^2 - 35t^2 = 1$ является $(s, t) = (6, 1)$, поэтому $q = 6 + \sqrt{35}$. Множество M содержит единственную пару чисел $(z, l) = (7, -1)$, удовлетворяющую условиям (*), (**). Тогда по теореме решением уравнения будет любая пара чисел (u, v) такая, что $u + v\sqrt{35} = \pm(7 - \sqrt{35})(6 + \sqrt{35})^n$, где $n \in \mathbb{Z}$.

- Опуская тривиальные случаи при $n = 0$ и $n = 1$, приведем несколько первых систем квадратных уравнений (17), имеющих рациональные корни.

- $n = 2$: $(u_2, v_2) = (77, 13)$, $\text{НОД}(77, 7) = 7$, $\alpha = 1$,

$$b = 13k, \quad c = 6k^2, \quad k \in \mathbb{Z},$$

$$(b, c) = (13, 6), (-13, 6), (26, 24), (-26, 24), (39, 54), (-39, 54), \dots$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 13x + 6 = 0 \\ 7y^2 + 13y + 6 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 13x + 6 = 0 \\ 7y^2 - 13y + 6 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 26x + 24 = 0 \\ 7y^2 + 26y + 24 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 - 26x + 24 = 0 \\ 7y^2 - 26y + 24 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 + 39x + 54 = 0 \\ 7y^2 + 39y + 54 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 39x + 54 = 0 \\ 7y^2 - 39y + 54 = 0 \end{cases}, \dots$$

- $n = 3$: $(u_3, v_3) = (917, 155)$, $\text{НОД}(917, 7) = 7$, $\alpha = 1$,
 $b = 155k$, $c = 858k^2$, $k \in \mathbb{Z}$,
 $(b, c) = (155, 858), (-155, 858), (310, 3432), (-310, 3432), \dots$

$$\begin{cases} 2x^2 + 155x + 858 = 0 \\ 7y^2 + 155y + 858 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 155x + 858 = 0 \\ 7y^2 - 155y + 858 = 0 \end{cases},$$

$$\begin{cases} 2x^2 + 310x + 3432 = 0 \\ 7y^2 + 310y + 3432 = 0 \end{cases}, \begin{cases} 2x^2 - 310x + 3432 = 0 \\ 7y^2 - 310y + 3432 = 0 \end{cases}, \dots$$

Заключение

В работе найден и сформулирован алгоритм определения целых параметров b и c системы квадратных уравнений (1) так, чтобы каждое из уравнений (1) имело рациональные корни. При этом a_1, a_2 ($a_1 \neq a_2$) предполагались заданными.

Литература

1. Гельфонд А.О. Решение уравнений в целых числах. – 4-е изд. – М.: Наука, 1983. – 64 с. – (Популярные лекции по математике).
2. Эдвардс Г. Последняя теорема Ферма: Генетическое введение в алгебраическую теорию чисел. – М.: Мир, 1980. – 243 с.
3. Спивак А. Уравнения Пелля // Квант. – 2004. – №4. – С. 5–11.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ СИГНАЛА ТИПА «МОДУЛЯЦИЯ–ДЕМОДУЛЯЦИЯ–ФИЛЬТРАЦИЯ»

М.Н. Дударев

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

Рассматривается метод исследования систем с модуляцией, опирающийся на принципы полуфизического моделирования с использованием аппарата передаточных функций в системе с преобразованием сигнала типа «модуляция–демодуляция–фильтрация». Работа призвана восполнить ряд пробелов в теории.

Введение

Современная теория систем с модуляцией находится в неоднозначном положении. На фоне явных успехов метода пространства состояний в исследовании процессов рассматриваемые системы и методы их изучения по сей день остаются без должного внимания. Между тем область применения систем с модуляцией чрезвычайно широка: это и разнообразные датчики (индукционные, индуктивные, сельсины, поворотные трансформаторы), и повсеместно применяемые машины переменного тока (синхронные и асинхронные). В качестве отправной точки рассматривается метод полуфизического моделирования с использованием представлений процессов модуляции и демодуляции в виде процедуры перемножения сигналов.

Рассмотрим непрерывную линейную динамическую систему (объект управления) (рис. 1), которая состоит из следующих динамических блоков: устройство перемножения внешнего воздействия $g(t)$ (информационного сигнала) и сигнала модуляции $h_m(t)$, непрерывное линейное динамическое звено (колебательное звено второго порядка), устройство перемножения выходного сигнала $g_k(t)$ колебательного звена и сигнала демодуляции $h_d(t)$, а также фильтр четных гармоник, реализуемый в виде апериодического звена первого порядка.

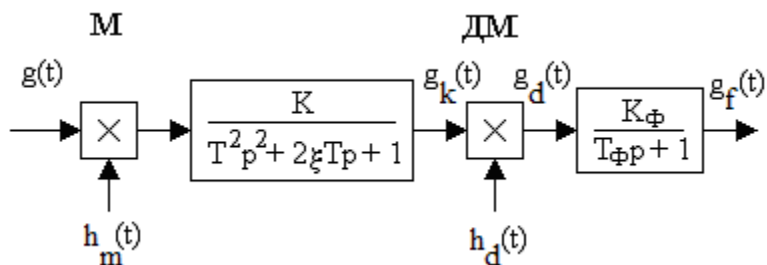


Рис. 1. Объект управления

Модулирующей и демодулирующей функциями являются синусоидальные сигналы

$$h_m(t) = h_{m0} \sin \omega_m t, \quad (1)$$

$$h_d(t) = h_{d0} \sin(\omega_d t + \varphi(\omega_d)), \quad (2)$$

где $\varphi(\omega_d)$ – функция фазирования.

Процессы при некотором сочетании параметров

В качестве задающего воздействия рассматривается единичный ступенчатый сигнал $g(t) = 1(t)$. (3)

Исследования проводились для следующих параметров системы.

- *Параметры модуляции.* Частота модуляции $f = 5 \text{ с}^{-1}$, откуда $\omega_m = 2\pi f = 31,42 \text{ с}^{-1}$. Частота демодуляции $\omega_d = \omega_m = 31,42 \text{ с}^{-1}$. Амплитуда модуляции $h_{m0} = 1$. Амплитуда демодуляции $h_{d0} = 1$.
- *Параметры колебательного звена.* Резонансная частота $\omega_p = 0,1\omega_m = 3,142 \text{ с}^{-1}$, постоянная времени $T = (\omega_p)^{-1} = 0,3183 \text{ с}$, показатель колебательности $\xi = 0,25$, коэффициент передачи $K = 1$.
- *Параметры фильтра.* Коэффициент ослабления $K_o = 0,1$, откуда $\omega_\phi = 0,1\omega_m = 3,142 \text{ с}^{-1}$. $T_\phi = (\omega_\phi)^{-1} = 0,3183 \text{ с}$, коэффициент передачи $K_\phi = 1$.
- *Параметры передаточной функции.* Частотная передаточная функция колебательного звена

$$W(j\omega_m) = \frac{K(1 - T^2\omega_m^2) - jK(2\xi T\omega_m)}{(1 - T^2\omega_m^2)^2 + (2\xi T\omega_m)^2}. \quad (4)$$

Ее модуль и аргумент

$$\text{mod}(W(j\omega_m)) = \frac{K}{\sqrt{(1 - T^2\omega_m^2)^2 + (2\xi T\omega_m)^2}}, \quad (5)$$

$$\text{arg}(W(j\omega_m)) = \text{arctg}\left(\frac{2\xi T\omega_m}{T^2\omega_m^2 - 1}\right) - \pi. \quad (6)$$

Таким образом, $\text{mod}(W(j\omega_m)) = 0,010088$, $\text{arg}(W(j\omega_m)) = -3,0911$.

- *Сигнал на выходе колебательного звена*
 $g_m(t) = \text{mod}(W(j\omega_m))\sin(\omega_m t + \text{arg}(W(j\omega_m))). \quad (7)$
- *Сигнал после демодуляции*
 $g_d(t) = \text{mod}(W(j\omega_m))\sin(\omega_m t + \text{arg}(W(j\omega_m)))\sin(\omega_d t + \phi(\omega_d)). \quad (8)$

Зависимость от фазирования

Рассмотрим следующие случаи демодуляции.

Для $\phi(\omega_d) = 0$, т.е. с нулевым фазированием модулированного и демодулированного сигналов, последний будет иметь вид

$$g_d(t) = 0,5 \text{mod}(W(j\omega_m))\sin(\omega_m t + \text{arg}(W(j\omega_m)))\sin \omega_m t = \\ = 0,5 \text{mod}(W(j\omega_m))(\cos(\text{arg}(W(j\omega_m)))(1 - \cos 2\omega_m t) + \sin(\text{arg}(W(j\omega_m)))\sin 2\omega_m t). \quad (9)$$

Очевидно, что при нулевом фазировании выходной сигнал системы не удовлетворяет требованиям – сигнал меняет знак и значительно ослаблен по амплитуде (рис. 2).

Для $\phi(\omega_d) = \text{arg}(W(j\omega_m))$, т.е. случая, когда функция фазирования имеет значение найденного сдвига фазы модулированного и демодулированного сигналов, последний имеет вид

$$g_d(t) = 0,5 \text{mod}(W(j\omega_m))(1 - \cos 2(\omega_m t + \text{arg}(W(j\omega_m)))). \quad (10)$$

Таким образом, осуществление фазирования решает проблему перемены знака выходного сигнала (рис. 3).

Для $\phi(\omega_d) = \text{arg}(W(j\omega_m)) \pm \frac{\pi}{2}$, т.е. случая, когда к сфазированным сигналам дополнительно добавлен сдвиг на четверть оборота относительно друг друга, демодулированный сигнал имеет вид

$$g_d(t) = 0,5 \text{mod}(W(j\omega_m))\sin 2(\omega_m t + \text{arg}(W(j\omega_m))). \quad (11)$$

В этом случае дополнительный сдвиг оказывает решающее значение, фактически превращая выходной сигнал в нулевой. Данный опыт иллюстрирует важность фазирования сигналов (рис. 4).

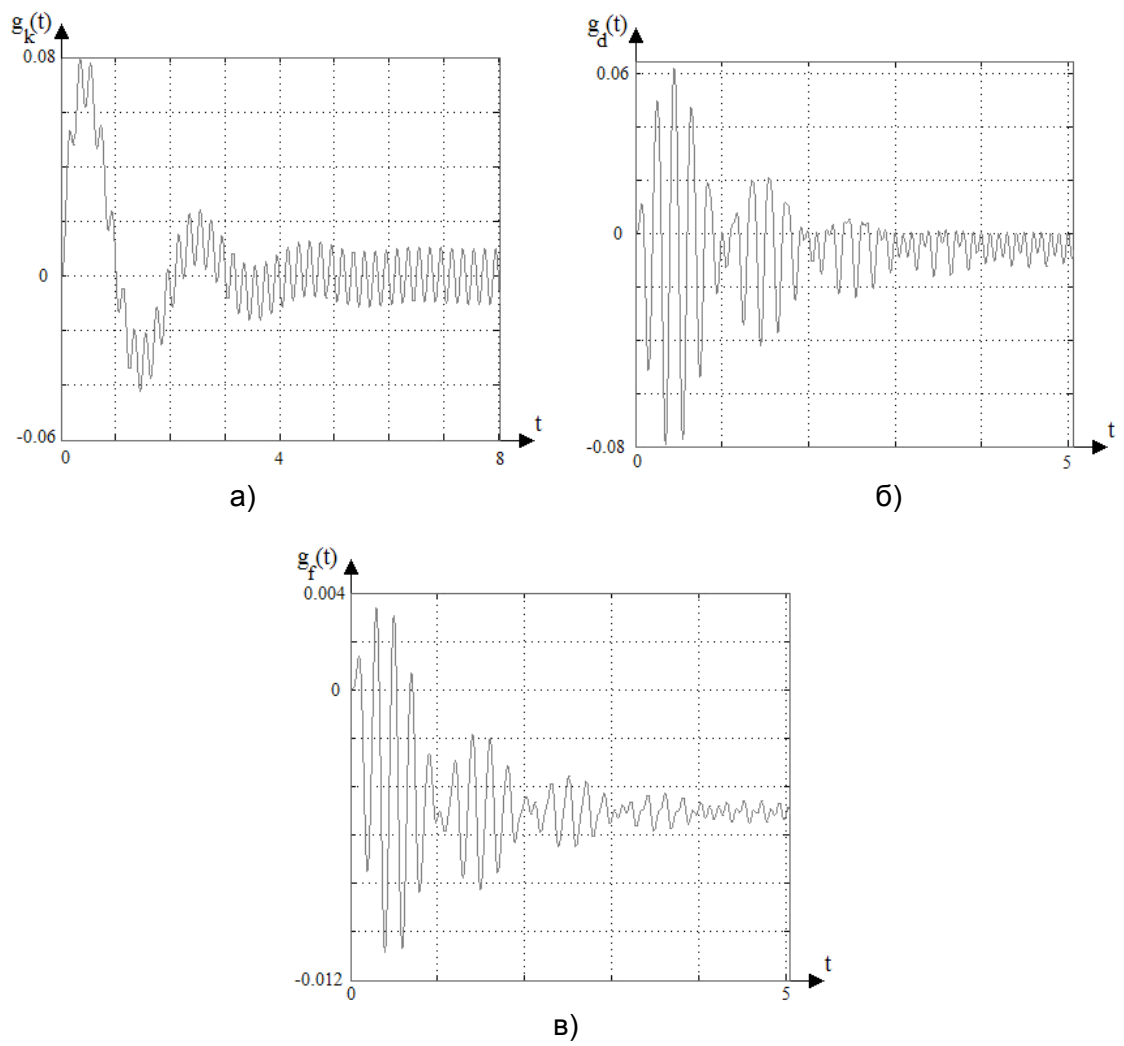


Рис. 2. Сигналы: а) $g_k(t)$, б) $g_d(t)$, в) $g_f(t)$

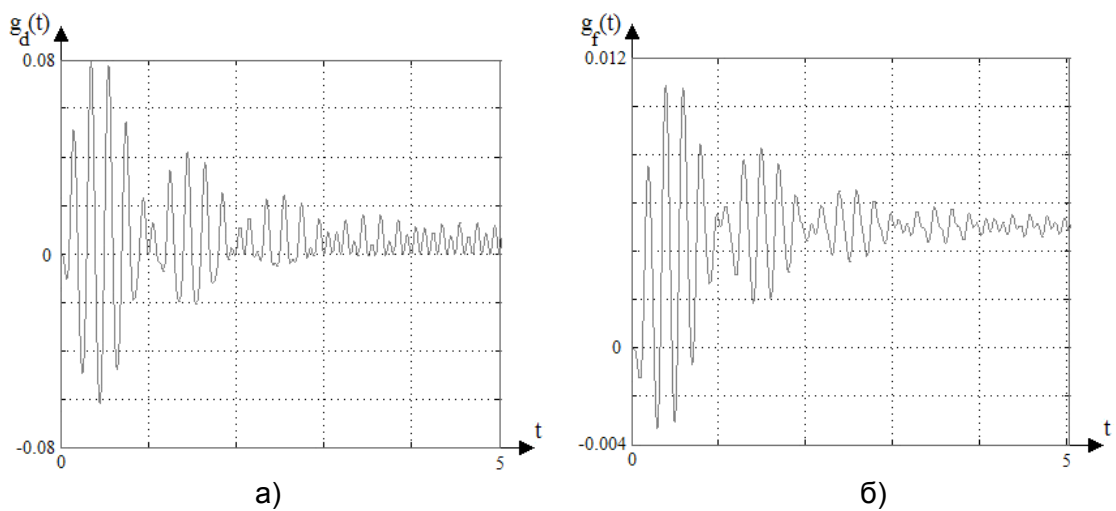


Рис. 3. Сигналы: а) $g_d(t)$, б) $g_f(t)$

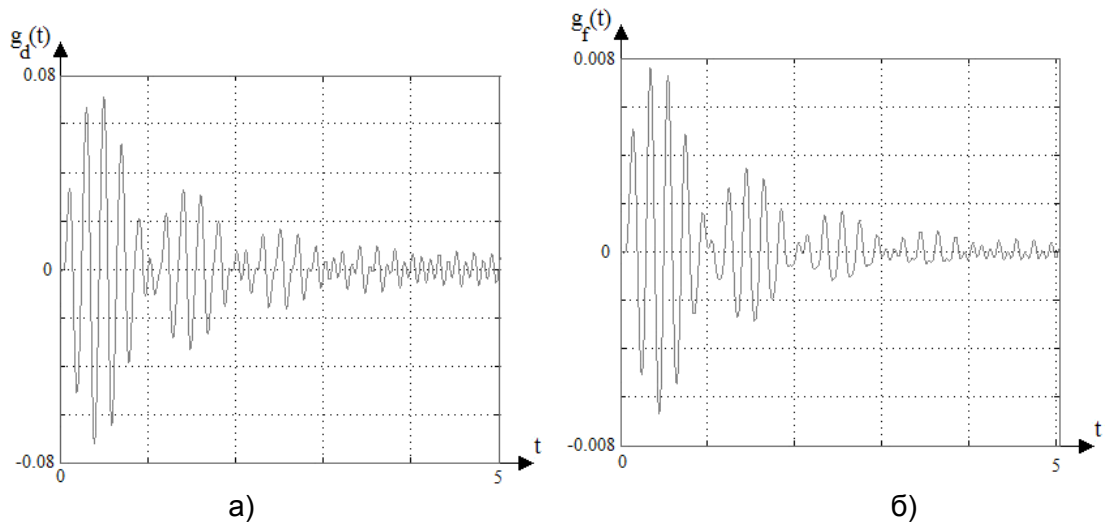


Рис. 4. Сигналы: а) $g_d(t)$, б) $g_f(t)$

Использование операторного подхода

Рассмотрим лапласовы образы модулирующей и демодулирующей функций (1), (2)

$$G_m(s) = L\{h_{m0} \sin \omega_m t\} = h_{m0} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}, \quad (12)$$

$$G_d(s) = L\{h_{d0} \sin(\omega_d t + \varphi(\omega_d))\} = h_{d0} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \left(1 + \frac{2}{e^{\frac{\pi s}{\omega}} - 1} \right). \quad (13)$$

Отсюда передаточная функция демодуляции

$$\Phi_d(s) = \frac{G_d(s)}{G_m(s)} = 1 + \frac{2}{e^{\frac{\pi s}{\omega}} - 1}. \quad (14)$$

Таким образом, операторный подход с использованием преобразований Лапласа и аппарата передаточных функций даёт возможность рассматривать системы с модуляцией двухполупериодного вида (рис. 5).

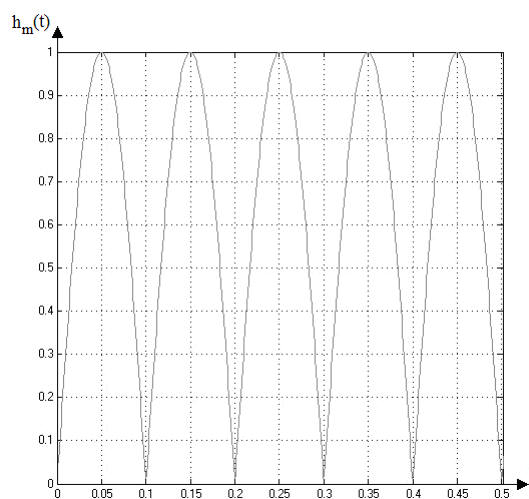


Рис. 5. Двухполупериодная модуляция

Процессы системы, представленной на рис. 1, построенной на таких модулирующих элементах с использованием фазирования сигналов, показаны на рис. 6.

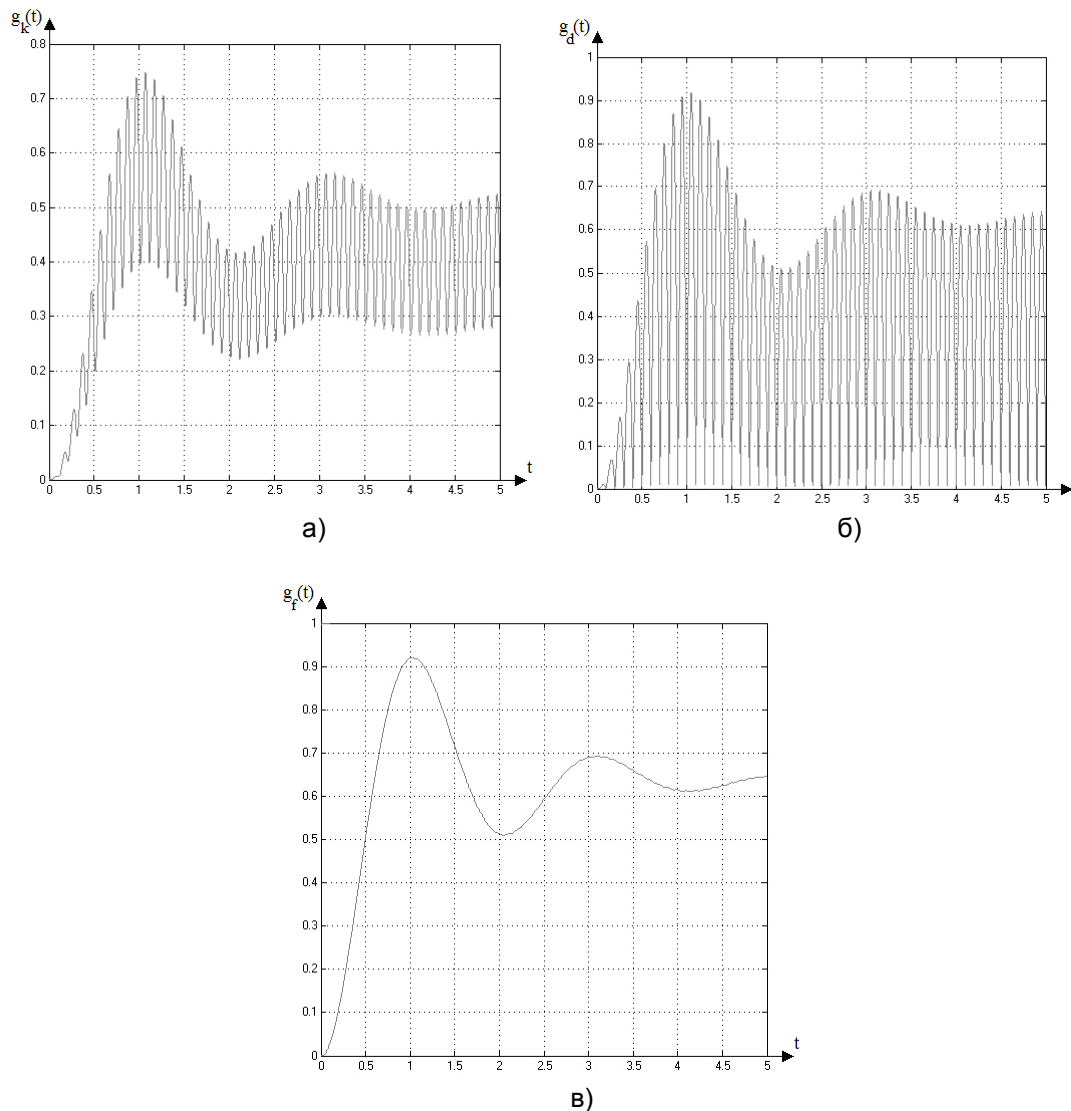


Рис. 6. Сигналы: а) $g_k(t)$, б) $g_d(t)$, в) $g_f(t)$

Очевидно, что по сравнению с результатами, полученными ранее, процессы, при соблюдении надлежащего фазирования, значительно меньше ослабляются по амплитуде и имеют более низкую колебательность.

Заключение

Рассмотрен метод полуфизического моделирования с использованием представлений процессов модуляции и демодуляции в виде процедуры перемножения сигналов. В качестве альтернативы стандартному синусоидальному модулирующему сигналу рассмотрен двухполупериодный сигнал.

Исследования процессов показали возможность возникновения проблем обработки входного сигнала из-за рассогласования фазы. Рекомендация – обязательное фазирование модулирующего и демодулирующего сигналов, параметры которого могут быть определены аналитически.

Также налицо сильное ослабление информационного сигнала после прохождения цепи «модуляция–демодуляция–фильтрация». Рекомендация – согласования частотных параметров и усиление сигнала.

Литература

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
3. Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и 2-преобразования: Пер. с англ. – М.: Наука. 1971. – 288 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Е.А. Федоров

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.И. Бойков

В работе рассмотрен современный асинхронный электропривод с точки зрения информационной пропускной способности как комплексной характеристики эффективности, получены значения максимальной скорости передачи информации для различных устройств, сделан краткий обзор рынка приводов.

Введение

Электропривод получил огромное распространение не только в современной промышленности, но и в сфере обслуживания, в бытовых устройствах и т.д. Развитие электроники и микропроцессорной техники позволяет получать экономически эффективные компактные приводные решения на базе не только двигателей постоянного тока, но и асинхронных электродвигателей, которые обладают целым рядом преимуществ. Прежде всего, это значительно более высокая надежность, более простая и менее подверженная износу конструкция, сравнительно невысокая цена.

Современная элементная база позволяет осуществлять эффективное управление асинхронными двигателями в широком диапазоне регулирования. Долгое время регулирование в области малых скоростей вращения ротора было недоступно без применения редукторов (пожалуй, за исключением лишь очень мощных двигателей, где было экономически оправдано разрабатывать и внедрять сложные и дорогостоящие регуляторы и силовые коммутирующие схемы). В наши дни микроконтроллеры позволяют реализовывать очень сложные алгоритмы управления, а современные силовые элементы обеспечивают отработку импульсных управляющих воздействий с пренебрежимо малыми задержками. Становится экономически эффективным применение в сервоприводах даже асинхронных микродвигателей, оснащенных векторными и частотными регуляторами.

В работе рассматривается информационная пропускная способность асинхронного электропривода как комплексная характеристика эффективности его функционирования. Количество информации, которое может проходить через электропривод в единицу времени, определяет его динамический диапазон и качественные характеристики. Рассмотрены устройства ведущих мировых производителей (Omron, Hitachi, Schneider Electric, Siemens), изучены перспективы дальнейшего повышения информационной пропускной способности.

Информационная пропускная способность систем

Пропускная способность – одна из основных характеристик информационного канала связи. Она оценивается предельным числом бит данных, передаваемых по каналу за единицу времени, и измеряется в *бит/с* (c^{-1}). Согласно теореме К. Шеннона [1], пропускная способность канала связи с помехами (или произвольного устройства, через которое проходит информация), определяется по формуле (1).

$$C_{\max} = F \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) . \quad (1)$$

В (1) F – частотная полоса пропускания, S и N – соответственно мощности сигнала и шума. Очевидно, что ширина полосы пропускания влияет на пропускную способность системы в значительно большей степени, чем отношение сигнал-шум. На рис. 1

показана зависимость C_{\max} от отношения $\frac{S}{N}$ при постоянной полосе пропускания $F = 400 \text{ Гц}$.

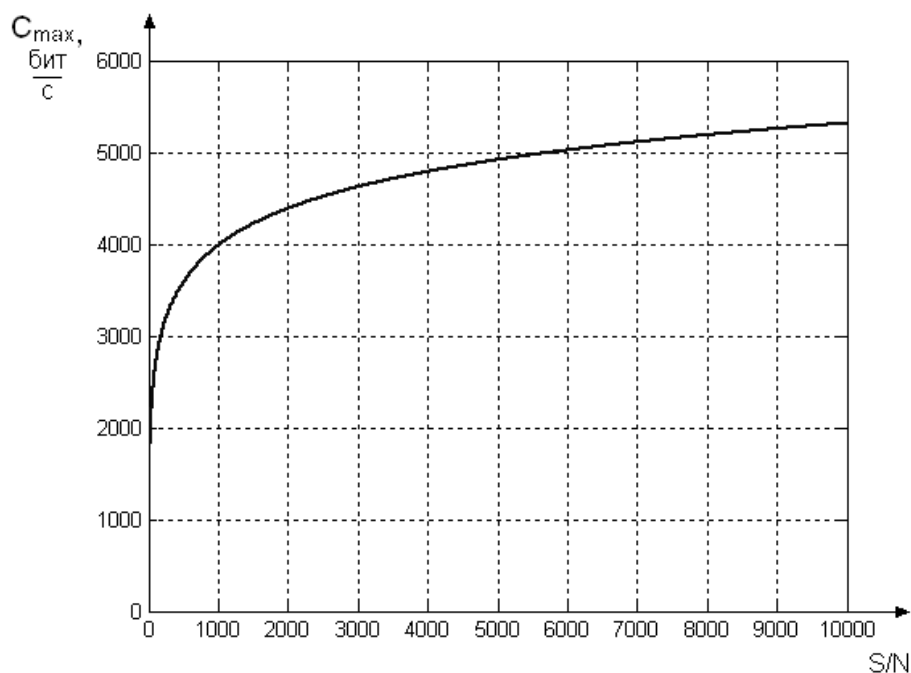


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости передачи информации от отношения сигнал-шум

Однако в рассматриваемом классе устройств полоса пропускания физически ограничена сверху, и ограничения определяются применяемым в приводе электродвигателем. В том случае, когда необходимо обеспечивать управление в области малых скоростей вращения ротора, применение редуктора снижает динамический диапазон практически пропорционально отношению редукции. Отношение полезного сигнала к шуму фактически определяет точностные характеристики электропривода и может значительно повышаться с применением прецизионных компонентов и датчиков с высоким разрешением.

Единственный недостаток информационной проводимости как комплексной характеристики заключается в том, что она стремится к насыщению при снижении ошибки и относительно слабо отражает расширение динамического диапазона вниз, представляющее значительный интерес для управления.

Современные алгоритмы управления (частотное, потоковое, векторное) позволяют получить управляемость двигателя даже в области так называемых «ползучих» скоростей (на два и более порядка ниже номинальной скорости). Используется импульсное управление с высокой (как правило, постоянной) амплитудой напряжения, подаваемого на обмотки двигателя. Это позволяет при условии передачи того же количества энергии преодолевать значительные нелинейности характеристики двигателя в области низких частот.

В области показателей качества систем микроконтроллерное управление также дает значительный эффект. Более высокие по сравнению с аналоговыми регуляторами точностные характеристики и быстродействие объясняются снижением задержек в управлении и возможностью применения точных нелинейных моделей в реализации алгоритма. Хорошие результаты достигнуты даже в разомкнутом управлении, хотя и существуют известные проблемы нестационарности модельных параметров и неточностей, обусловленных неточностью их задания, ошибками и погрешностями

измерения и расчета. Замкнутое управление открывает более широкие перспективы в области повышения информационной проводимости электроприводов, так как определение рассогласования и измерение переменных состояния с помощью высокоточных датчиков легко доступны с применением решений промышленного масштаба. В частности, существуют и применяются в устройствах датчики импульсного типа – энкодеры с разрешением 10^6 битов на оборот ротора двигателя, которые можно устанавливать непосредственно на вал ротора. Однако датчики с таким высоким разрешением крайне дороги, и их использование, как правило, не является оправданным.

Промышленные решения

Промышленные решения на рынке асинхронного электропривода представляют собой либо специализированные устройства управления с двигателями в составе других приборов, либо более универсальные приборы – инверторы, которые рассчитаны на подключение различных двигателей в некотором диапазоне мощностей. В этом случае параметры конкретного двигателя задаются программно.

Упрощенная блок-схема электропривода представлена на рис. 2.

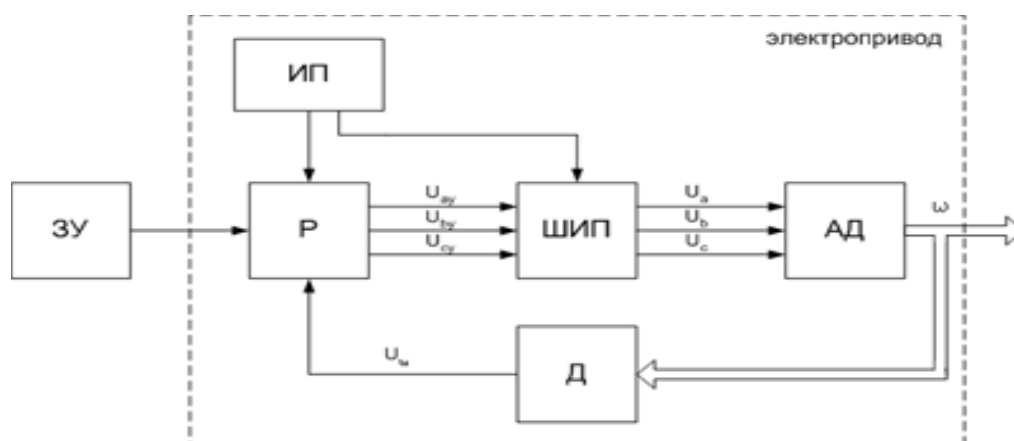


Рис. 2. Блок-схема асинхронного электропривода

На рис. 2 ИП – источник питания, Р – регулятор на базе микроконтроллера, реализующий закон управления, ШИП – широтно-импульсный преобразователь (силовой управляемый блок), Д – датчик скорости, ЗУ – задающее устройство, передающее команды электроприводу (в простейшем случае на аналоговый вход).

Инверторы обычно включают не только устройство управления и силовые элементы, но и органы управления – клавиатуру с дисплеем, интерфейсные устройства для принятия информации извне. Они обеспечивают возможность задавать параметры функционирования, обеспечивать выбор алгоритма работы и его параметров, функционировать интерактивно через пользовательский интерфейс или удаленный сетевой доступ по стандартным протоколам, вести журнал событий, реализовывать встроенными средствами типовую безопасность.

На рис. 3 представлен инвертор Siemens Micromaster 410 в типовом исполнении, обеспечивающем возможность установки на стену.



Рис. 3. Инвертор Siemens Micromaster 410

Рассмотрим инверторы ведущих мировых производителей, ориентированные на работу с маломощными асинхронными двигателями, и рассчитаем для них значения информационной проводимости.

OMRON 3G3MV. Линейка 3G3MV представляет собой устройства для управления асинхронными двигателями, реализующие как разомкнутое, так и замкнутое частотное и векторное управление, с поддержкой разнообразных сетевых интерфейсов [2]. Маломощные представители рассчитаны на работу с двигателями, мощности которых не превышают значения из ряда 0,1; 0,2; 0,4 кВт. Диапазон рабочих частот инвертора – от 0,1 до 400 Гц, заявленная производителем ошибка отработки скорости в замкнутом контуре не превышает 0,1%. Рассчитаем пропускную способность по формуле (1):

$$C_{\max} = (400 - 0,1) \cdot \log_2(1 + 1000);$$

$$C_{\max} = 3985,89 \frac{\text{бит}}{\text{с}}.$$

Hitachi L200-02. Это недорогое, но полнофункциональное устройство для управления асинхронными двигателями мощностью до 112 Вт (0,15 лошадиной силы) с базовой функциональностью [3]. Диапазон рабочих частот инвертора – от 0,5 до 360 Гц, заявленная производителем ошибка отработки скорости в замкнутом контуре не превышает 1%. Рассчитаем пропускную способность по формуле (1):

$$C_{\max} = (360 - 0,5) \cdot \log_2(1 + 100);$$

$$C_{\max} = 2366,99 \frac{\text{бит}}{\text{с}}.$$

Schneider Electric Altivar 11. Altivar 11 – недорогой, но полнофункциональный инвертор, поддерживающий управление как по предустановленным программам, так и по командам через клавишный, сетевой интерфейс и через аналоговый задающий вход [3]. Диапазон поддерживаемых мощностей управляемого двигателя – от 0,18 до 0,25 кВт. Диапазон рабочих частот инвертора – от 0 до 200 Гц, заявленная производителем ошибка отработки скорости в замкнутом контуре не превышает 0,4%. Рассчитаем пропускную способность по формуле (1):

$$C_{\max} = 200 \cdot \log_2(1 + 250);$$

$$C_{\max} = 1594,31 \frac{\text{бит}}{\text{с}}.$$

Siemens Micromaster 410. Серия инверторов Micromaster – одна из последних разработок фирмы Siemens, которую производитель позиционирует как одно из самых удачных своих решений. Инвертор поддерживает очень широкий спектр функциональности и может работать с двигателями мощностью от 0,12 до 0,75 кВт [4]. Диапазон рабочих частот инвертора – от 0 до 650 Гц, заявленная производителем ошибка отработки скорости в замкнутом контуре не превышает 0,1%. Рассчитаем пропускную способность по формуле (1):

$$C_{\max} = 650 \cdot \log_2(1 + 1000);$$

$$C_{\max} = 6478,70 \frac{\text{бит}}{\text{с}}.$$

Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

Во-первых, информационная пропускная способность асинхронных электроприводов значительно выросла после перехода на новую элементную базу и новые алгоритмы управления. Нетрудно подсчитать, что при сравнимой погрешности отработки скорости и отказе от работы на малых скоростях с редуктором, снижающим скорость вращения вала двигателя в 10 раз, мы получаем увеличение максимальной скорости передачи информации на порядок. Специфика работы сервопривода такова, что наиболее применимым является как раз диапазон низких скоростей вращения, а для работы только в номинальном диапазоне сложный регулятор не требуется вовсе.

Во-вторых, наблюдается тенденция улучшения со временем характеристик не только дорогих устройств, но и дешевых решений, применимых в недорогой, в том числе и бытовой, технике. В настоящее время совершенно обычным является применение частотного электропривода в бытовых стиральных машинах стоимостью менее 300 долларов США. Недорогие устройства в основном уступают более сложным и полнофункциональным за счет отсутствия интерфейсных входов-выходов, возможностей расширения и сложных сервисных функций, а не за счет значительного ограничения точности и диапазона рабочих частот.

В-третьих, можно судить о том, что при постоянном улучшении характеристик недорогих устройств и снижении их цены можно ожидать расширения области применения приводов, особенно мало- и микромощных.

Состояние рынка

Интересные результаты можно получить при исследовании рынка электроприводов с точки зрения требуемой информационной пропускной способности. Поскольку это комплексная характеристика, которая позволяет судить об эффективности функционирования привода и о заложенном в нем потенциале реализации разнообразных задач, имеет смысл рассмотреть ряд типовых решений, применяемых в современной промышленности.

Область применения регулируемых электроприводов весьма обширна: в энергетике это вентиляторы и дымососы, механизмы топливоподачи; в химической и нефтяной промышленности – перемешивающие устройства, центрифуги, насосы, компрессоры; в угольной и горнорудной отрасли – транспортеры и конвейеры, дробилки и мельницы; в коммунальном хозяйстве – насосы городских систем холодного и горячего водоснабжения, отопления и водоочистки и т.д. Использование регулируемых электроприводов позволяет снизить потребление электроэнергии на 20–50% за счет использования механизмов, в которых электродвигатели рассчитаны на максимальную

нагрузку, а среднесуточная нагрузка составляет 60–80%. При этом улучшаются условия работы двигателей и механизмов в целом благодаря исключению динамических ударов, пусковых перегрузок и ограничению тока в обмотках электродвигателя. Таким образом, применение регулируемых электроприводов позволяет создать новую технологию энергосбережения, в которой не только экономится электрическая энергия, но и увеличивается срок службы оборудования [7].

Для техники, применяемой в бытовых условиях и в сфере обслуживания, требования к информационной проводимости, относительно невысокие. Так, для стиральной машины, поддерживающей с погрешностью 5% частоту вращения бака (в зависимости от режима) от 0,1 до 20 Гц, необходимая максимальная скорость передачи информации составляет по формуле (1) всего $87,85 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$. Однако применение управляемого электропривода обосновано с точки зрения экономии электроэнергии. Для других устройств этого класса требования также невысокие относительно существующих на рынке решений, но асинхронный электропривод актуален в связи с его компактностью, дешевизной, экономичностью.

Высокие требования к электроприводу предъявляют робототехника, станки с ЧПУ, авиация. В связи с высокой стоимостью устройств в этих классах оправданным является поиск более эффективных компонентов, которые способствовали бы снижению стоимости, затрат на сервис и эксплуатацию, а также открывали бы перспективу для повышения качественных характеристик.

Высокие по сравнению с универсальными и тем более бытовыми решениями обеспечивают приводы, используемые в ЧПУ Sinumerik фирмы Siemens, в продуктах японской фирмы Fanuc и тайваньской фирмы Sinumerik. У некоторых моделей при рабочих частотах от 0 до 500 Гц заявленная производителем погрешность поддержания скорости вращения составляет не более 0,02%. Это дает скорость передачи информации $6144 \frac{\text{бит}}{\text{с}}$. Весьма вероятно, что дальнейшие возможности улучшения характеристик при использовании более высококачественных компонентов будут применены производителями немедленно. Это позволит выйти на качественно новый уровень точности, которая обеспечивается при функционировании станков.

Рассмотренные устройства и полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что с точки зрения информационной проводимости на настоящее время рынок обеспечен разнообразием готовых решений. Однако с учетом того, что рынок к 2001 г. был укомплектован асинхронными электродвигателями лишь на 50%, причем подавляющее их большинство использовалось без применения регуляторов, т.е. неэффективно [7], можно судить об обширных перспективах увеличения объема производства регулируемых электроприводов. Развитие производства электроприводов, удешевление устройств низшего класса, на которые приходится основная доля спроса, и достижение качественно новых показателей среди наиболее сложных и качественных приводов обещают значительное увеличение средней скорости передачи информации в данном классе устройств среди реально применяемых решений.

Заключение

Электропривод на основе асинхронных электродвигателей в современной технике применяется практически повсеместно. Он перспективен как экономически эффективное и надежное решение, позволяет увеличить компактность и простоту устройств, нивелирует многие технические сложности. С применением современной элементной базы, особенно микроконтроллеров и силовых элементов, становится нетрудно вне-

дрять сложные алгоритмы, которые обеспечивают высокие показатели качества систем.

В данной работе рассмотрен асинхронный электропривод с точки зрения информационной проводимости как комплексной характеристики эффективности его работы. Увеличение количества информации, которое может проходить через электропривод в единицу времени, соответствует расширению области его применения и улучшению параметров работы. Однако существуют физические ограничения динамического диапазона двигателя, которые ограничивают информационную пропускную способность. Недостатком данной характеристики является стремление к насыщению в фиксированной полосе пропускания при увеличении отношения сигнал–шум и незначительное увеличение при расширении диапазона регулирования в области низких частот, представляющей значительный промышленный интерес.

Рассмотрены различные классы устройств с управляемым асинхронным электроприводом, для них получены значения максимальной скорости передачи информации. Сделан обзор рынка современных приводов и рассмотрены его перспективы.

Литература

1. С.Е. Shannon. A Mathematical Theory of Communication // The Bell Systems Technical Journal. – October 1948. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.
2. Лидовский В.В. Теория информации: Учебное пособие. – М.: Компания Спутник+, 2004. – 111с.
3. OMRON Industrial Automation [Электронный ресурс] – Электрон., дан. – Режим доступа: <http://www.ia.omron.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ., рус.
4. Hitachi Global [Электронный ресурс] – Электрон., дан. – Режим доступа: <http://hitachi.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
5. Schneider Electric – Electrical Distribution and Automation and Control [Электронный ресурс] – Электрон., дан. – Режим доступа: <http://schneider-electric.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
6. Siemens AG – Global Web Site [Электронный ресурс] – Электрон., дан. – Режим доступа: <http://siemens.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ., рус.
7. Электроприводы [Электронный ресурс] – Электрон., дан. – Режим доступа: http://www.power-e.ru/2004_01_46.php, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЕ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.С. Исаков

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

В статье рассматривается процесс построения адаптивного наблюдателя для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, позволяющего отказаться от измерения механических величин. Приведены результаты моделирования сходимости наблюдателя, а также сравнение спроектированного наблюдателя с наблюдателем на основе фильтра Калмана в различных условиях функционирования.

Введение

При использовании современной технологии векторного управления без датчика обратной связи по положению система получает ряд преимуществ по сравнению с приводами имеющие в своем составе датчики механических величин. К основным преимуществам относятся: снижение стоимости, упрощение конструкции электропривода, возможность замены существующих систем нерегулируемого электропривода с целью повышения эксплуатационных характеристик (срок службы, экономия ресурсов и т.д.) без затрат на покупку и установку датчиков. Основными недостатками таких систем является сложность алгоритмической реализации (в связи с большими объемами вычислений) и ограниченный диапазон вращения (в связи с ненаблюдаемостью системы при скоростях, близких к нулю).

Для оценки скорости асинхронного двигателя воспользуемся адаптивным наблюдателем с эталонной моделью (в англ. терминологии MRAS). Наблюдатели на основе MRAS достаточно популярны для оценки параметров и состояний асинхронного двигателя [1, 2]. Наблюдатель (рис. 1) будем строить на основе двух моделей, одна из которых является базовой, а вторая адаптивной. Механизм адаптации настраивает адаптивную модель таким образом, чтобы свести разницу между выходами моделей к нулю.

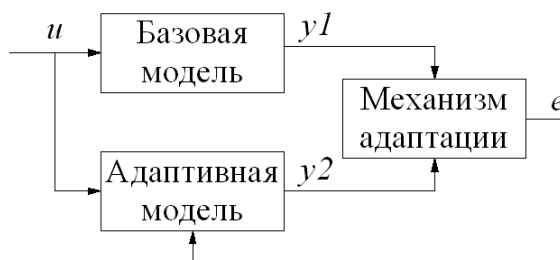


Рис. 1. Структура адаптивным наблюдателем с эталонной (базовой) моделью

Наблюдатель

Рассмотрим по отдельности составляющие схемы, представленные на рис. 1.

Модели наблюдателя строятся на основе полной модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в относительных величинах [3]:

$$\begin{cases} \bar{u}_S = r_S \bar{i}_S + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\alpha_k \bar{\psi}_S \\ 0 = r_R \bar{i}_R + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - \nu) \bar{\psi}_R \\ \bar{\psi}_S = x_S \bar{i}_S + x_m \bar{i}_R \\ \bar{\psi}_R = x_m \bar{i}_S + x_R \bar{i}_R \\ m = k \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_i \times \bar{i}_k) \\ T_m \frac{d\nu}{dt} = m - m_H \end{cases} \quad (1)$$

В этих уравнениях все переменные – относительные, полученные как результат деления реальных значений на базовые, все коэффициенты – также безразмерные, полученные аналогично. В уравнениях приняты следующие обозначения:

$\bar{u} = \frac{\vec{u}}{U_b}$, $\bar{i} = \frac{\vec{i}}{I_b}$, $\bar{\psi} = \frac{\vec{\psi}}{\psi_b}$ – относительные электромагнитные переменные состояния,

$\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}$, $\nu = \frac{\omega}{\omega_b}$ – относительные скорости вращения системы координат и ротора,

$m = \frac{M}{M_b}$ – относительный момент на валу машины, $r_S = \frac{R_S}{R_b}$, $r_R = \frac{R_R}{R_b}$, $x_S = \frac{\omega_b L_S}{R_b}$,

$x_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b}$, $x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}$, $T_m = \frac{J\omega_b}{M_b}$, $x_{sig} = \frac{(\sigma L_S)\omega_b}{R_b} = \frac{\left(L_S - \frac{L_m^2}{L_R}\right)\omega_b}{R_b} = x_S - \frac{x_m^2}{x_R}$ – относительные параметры.

В качестве критерия оценки скорости будем использовать вектор потокосцепления ротора в неподвижной системе координат $O\alpha\beta$, т.е. при $\alpha_k = 0$.

На основании системы (1) запишем уравнения для вычисления потокосцепления ротора, которые будут положены в основу базовой и адаптивной моделей:

$$\frac{d\bar{\psi}_R}{dt} = \omega_b \left(\bar{u}_S - r_S \bar{i}_S - x_{sig} x_s \frac{d\bar{i}_S}{dt} \frac{V_b}{I_b \omega_b} \right), \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{\psi}_R}{dt} = \frac{x_m}{T_R} \bar{i}_S - \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R - j\omega_b \nu \bar{\psi}_R, \quad (3)$$

где $T_R = \frac{x_R}{r_R \omega_b}$.

Скорость вращения ротора определяется из рассогласования уравнений (2) и (3). Перепишем уравнения в проекциях на оси системы координат и дополним уравнением рассогласования. Чтобы различать вектора потокосцепления ротора, обозначим уравнение для адаптивной модели знаком « $\hat{}$ »:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} &= \omega_b \left(u_{S\alpha} - r_S i_{S\alpha} - x_{sig} x_s \frac{di_{S\alpha}}{dt} \frac{V_b}{I_b \omega_b} \right) \\ \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} &= \omega_b \left(u_{S\beta} - r_S i_{S\beta} - x_{sig} x_s \frac{di_{S\beta}}{dt} \frac{V_b}{I_b \omega_b} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{d\widehat{\psi}_{R\alpha}}{dt} = \frac{x_m}{T_R} i_{S\alpha} - \frac{1}{T_R} \widehat{\psi}_{R\alpha} - \omega_b \nu \widehat{\psi}_{R\beta} \quad (5)$$

$$\frac{d\widehat{\psi}_{R\beta}}{dt} = \frac{x_m}{T_R} i_{S\beta} - \frac{1}{T_R} \widehat{\psi}_{R\beta} + \omega_b \nu \widehat{\psi}_{R\alpha} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \psi_{R\alpha} \cdot \widehat{\psi}_{R\beta} - \psi_{R\beta} \cdot \widehat{\psi}_{R\alpha} \quad (7)$$

В качестве механизма адаптации воспользуемся стандартным ПИ-регулятором вида

$$W_{pec} = K + \frac{1}{T_S} \quad (7)$$

На рис. 2 изображена схема моделирования описанной выше системы.

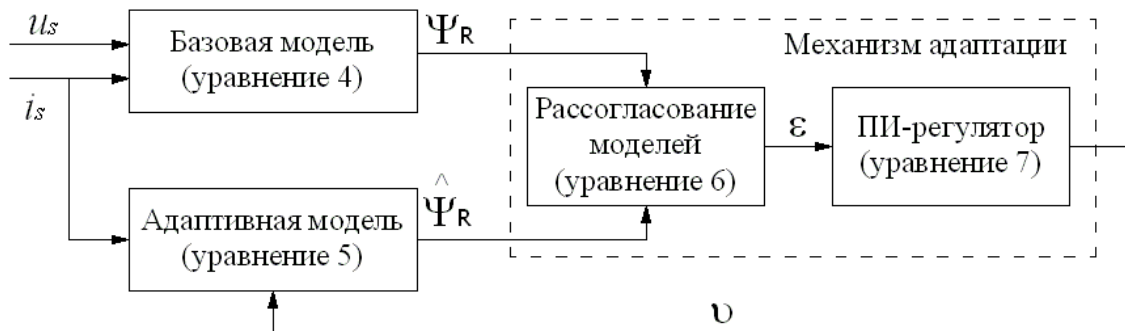


Рис. 2. Структура адаптивного наблюдателя для оценки скорости вращения ротора двигателя

Моделирование и результаты

Моделирование проводилось для двигателя АКМ114/10 (200 кВт, пять пар полюсов, фазный ротор замкнутый накоротко) по схеме слежения во всех четырех квадрантах, диаграмма задания скорости и момента приведена на рис. 3. В работе [4] была разработана векторная система управления этим двигателем и спроектирован наблюдатель на основе фильтра Калмана. Проведем сравнение этих двух наблюдателей при отсутствии и наличии помех в каналах измерения.

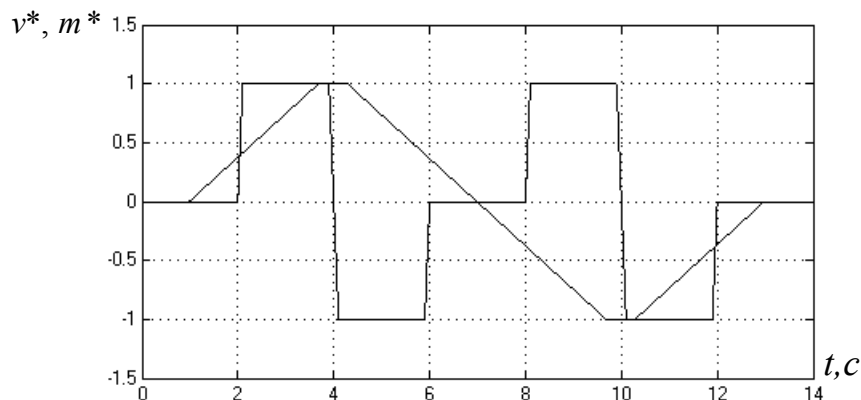


Рис. 3. Диаграмма задания скорости вращения ротора и момента на валу двигателя

На рис. 4 и 5 приведены ошибки слежения за скоростью наблюдателями на основе MRAS и фильтра Калмана при идеализированных условиях и отсутствии каких-либо

возмущающих воздействий. Из рисунков видно, что в данных условиях ошибка слежения у первого наблюдателя (0.4%) несколько меньше, чем у второго (0.6%).

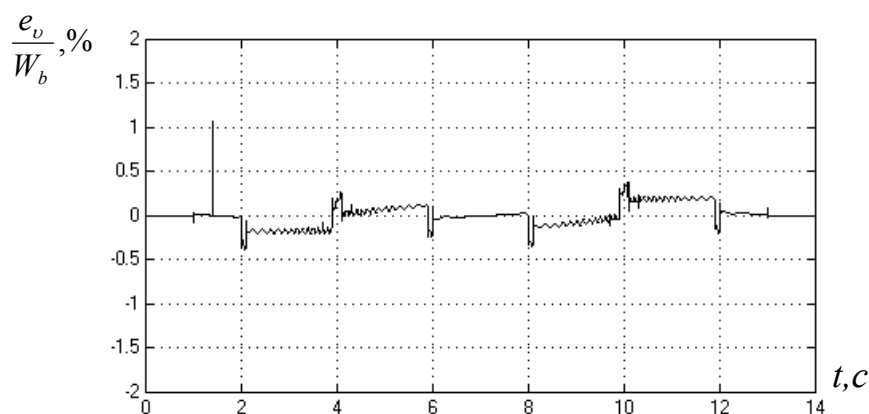


Рис. 4. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе MRAS

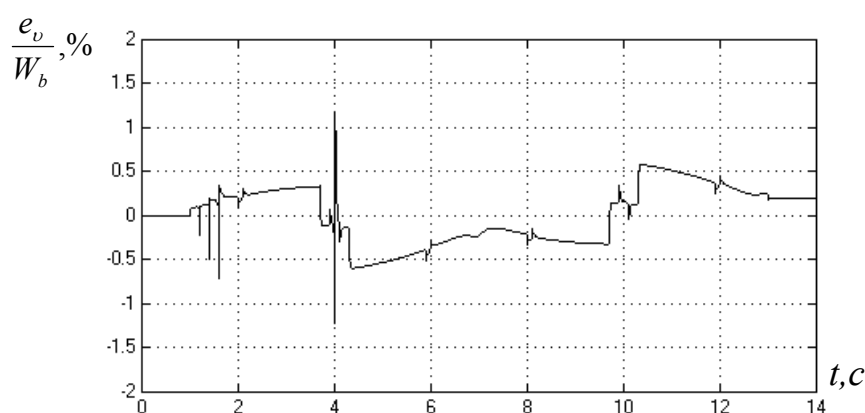


Рис. 5. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе фильтра Калмана

Известно, что при подаче управляющего воздействия на двигатель посредством автономного инвертора напряжения с ШИМ-модуляцией наибольшим искажениям подвергаются напряжения в силу природы их формирования. Поэтому проверим чувствительность наблюдателей при введении в канал измерения напряжения стохастического возмущающего воздействия. На рис. 6 и 7 приведены ошибки слежения за скоростью исследуемых наблюдателей в условиях зашумленности канала измерения напряжений. Из рисунков видно, что картина резко изменилась: ошибка слежения первого наблюдателя на некоторых участках достигает 10%, а для второго наблюдателя не превышает 0.5%. При этом наблюдатель на основе фильтра Калмана иногда не совсем корректно ведет себя при нулевой скорости. Это одна из основных проблем этих наблюдателей, которая решается контролем уровня токов.

Дальнейшее повышение уровня шумов приводит к потере работоспособности наблюдателя на основе MRAS и увеличению погрешности оценивания (до 3%) у наблюдателя на основе фильтра Калмана. Результаты приведены на рис. 8 и 9.

На основании проделанных экспериментов можно сделать вывод: наблюдатель на основе MRAS хорошо себя ведет при невозмущенной системе, в остальных же случаях необходима фильтрация сигналов в канале измерения, что также вносит свою погрешность.

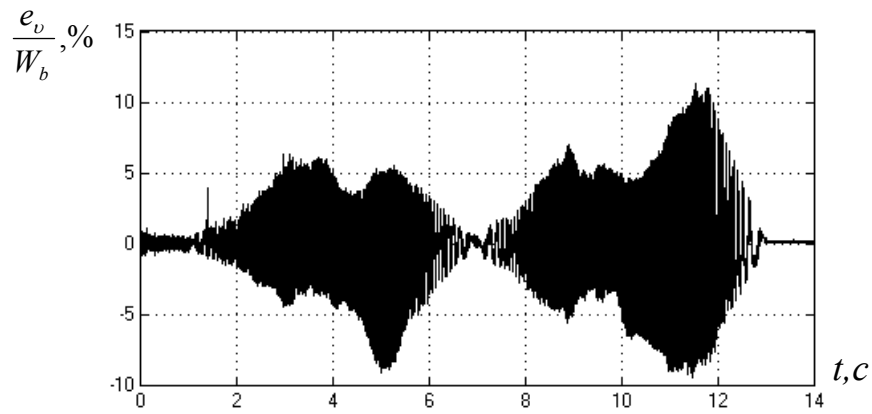


Рис. 6. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе MRAS

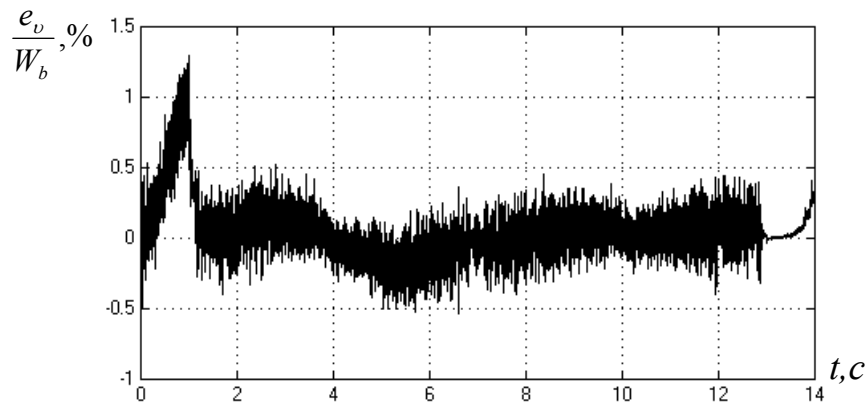


Рис. 7. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе фильтра Калмана

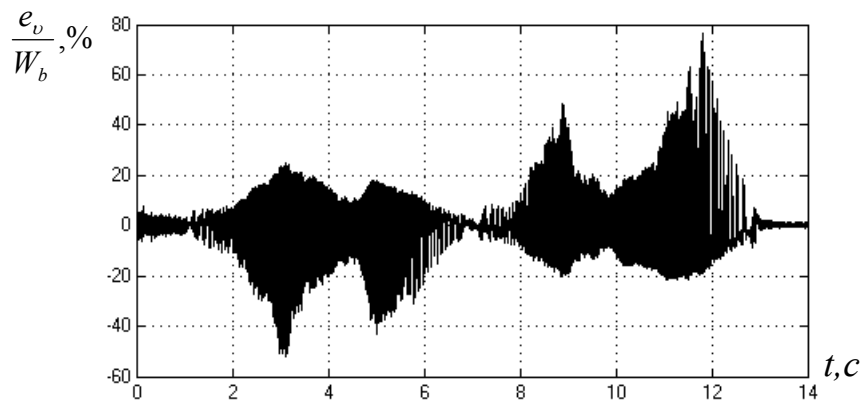


Рис. 8. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе MRAS

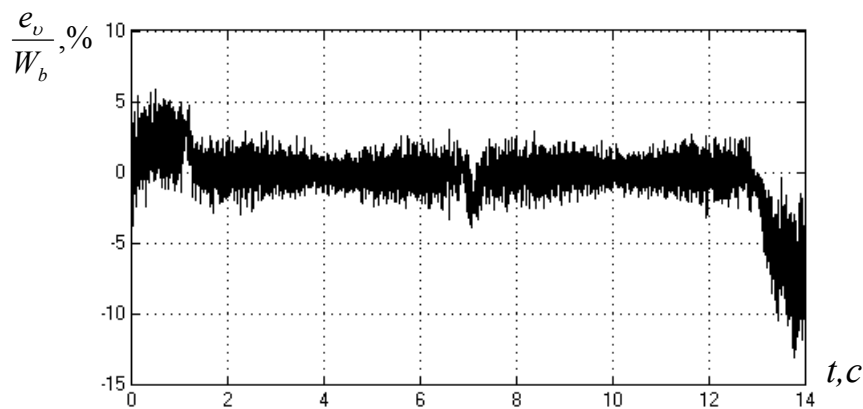


Рис. 9. Ошибка слежения за скоростью наблюдателем на основе фильтра Калмана

Заключение

В статье рассмотрен процесс построения наблюдателя для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, позволяющего отказаться от измерения механических величин. Такая реализация системы позволяет оценивать только одно состояние системы, и данный наблюдатель чувствителен к воздействию шумов, хотя его структура значительно проще фильтра Калмана, а его реализация требует меньше вычислительных ресурсов системы. Данный вариант подходит для недорогих решений, с невысокими требованиями к показателям качества управления.

Литература

1. F.Z. Peng and T. Fukao. Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors // IEEE Trans. Industry Applications. – Oct. 1994. – V. 30. – № 5. – P.1234–1239.
2. C. Schauder. Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers // IEEE Trans. Industry Applications. – Oct. 1992. – V. 28. – № 5. – P. 1054–1061.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: Учебное пособие. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 320 с., ил.
4. Исаков А.С. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Выпуск 38. Технология управления. – С. 280–286.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПРИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛИНЗЫ

М.М. Корсун, А.Н. Игнатьев

(Новосибирский государственный технический университет)

Научный руководитель – к.т.н., доцент М.Э. Рояк

(Новосибирский государственный технический университет)

Приводится вариационная и конечноэлементная постановки трехмерных задач магнитостатики с выделением нормального поля и использованием двух скалярных потенциалов. Применение рассматриваемого подхода показано на примере решения задачи численного моделирования квадрупольной линзы.

Введение

Довольно часто при моделировании трехмерных физических процессов, в том числе и магнитостатических, искомое поле имеет достаточно хорошее приближение, получаемое как решение другой, возможно, двумерной задачи, которое можно получить с более высокой точностью, чем требуется от решения исходной задачи. В том случае, если разница решений рассматриваемых задач составляет не более 10–15%, можно построить более эффективные как в плане вычислительных затрат, так и в плане точности расчетные схемы, учитывающие это обстоятельство. В этих схемах, основанных на выделении основной части поля, ставится задача на нахождение разницы полей, являющихся решением двух рассматриваемых задач, причем требования к точности решения такой задачи существенно ослабляется в силу того, что разница является достаточно малой по сравнению с искомым решением [1, 2].

Рассмотрим вычислительную схему, являющуюся модификацией схемы решения трехмерных задач магнитостатики с использованием двух потенциалов, с выделением главной части поля.

Математическая модель для метода скалярных потенциалов

Будем считать, что рассматриваемое магнитное поле имеет довольно хорошее приближение в виде решения более простой задачи, определяющей напряженность магнитного поля \vec{H}^0 , которая удовлетворяет системе уравнений Максвелла

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H}^0 = \vec{J}^0, \\ \text{div}(\mu^0 \vec{H}^0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{J}^0 – плотность стороннего тока, μ^0 – относительная магнитная проницаемость среды. Заметим, что \vec{J}^0 и μ^0 могут, как совпадать с соответствующими величинами полной задачи, так и отличаться от них. Решение исходной задачи

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{H} = \vec{J}, \\ \text{div}(\mu \vec{H}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

будем искать в виде

$$\vec{H} = \vec{H}^0 + \vec{H}^+, \quad (3)$$

считая вектор-функцию \vec{H}^0 известной и удовлетворяющей системе (1), при этом будем называть поле \vec{H}^0 нормальным, а поле \vec{H}^+ – аномальным (или добавочным).

Учитывая соотношения (1), (3), систему (2) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}(\vec{H}^+) = \vec{J} - \vec{J}^0, \\ \operatorname{div}(\mu\vec{H}^+ + (\mu - \mu^0)\vec{H}^0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Важно отметить, что в случае равенства токов полной и нормальной задач первое уравнение системы (4) будет иметь нулевую правую часть, и в этом случае решение задачи нахождения аномального поля \vec{H}^+ является достаточно простым за счет возможности представления его в виде градиента некоторой функции. В дальнейшем будем рассматривать общий случай, учитывающий, что поле \vec{H}^+ не является безвихревым.

Аналогично тому, как это сделано в [3], выделим в расчетной области Ω полной задачи две подобласти: область Ω_p , содержащую токи $\vec{J} - \vec{J}^0$, с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$, и область Ω_ψ , содержащую ферромагнитные материалы. Обратим особое внимание на тот факт, что токи аномальной задачи представляют собой разность токов исходной и нормальной задач, при этом по-прежнему должно выполняться условие, что никакой контур, лежащий в области Ω_ψ , не должен охватывать ненулевой ток.

В области Ω_ψ добавочное поле \vec{H}^+ является безвихревым, а значит, его можно определить как градиент некоторой функции ψ (полного потенциала):

$$\vec{H}^+ = \vec{H}_\psi^+ = -\operatorname{grad} \psi. \quad (5)$$

В области Ω_p добавочное поле \vec{H}^+ имеет ненулевой ротор, потому определим его как сумму двух полей: поля, создаваемого разностью токов $\vec{J} - \vec{J}^0$ в однородном пространстве, и градиентом функции p (неполного потенциала). Таким образом, в области Ω_p

$$\vec{H}^+ = \vec{H}_c^+ + \vec{H}_p^+ = \vec{H}_c^+ - \operatorname{grad} p, \quad (6)$$

где $\operatorname{rot}(\vec{H}_c^+) = \vec{J} - \vec{J}^0$, $\operatorname{div}(\vec{H}_c^+) = 0$.

Вариационная постановка и конечноэлементная дискретизация

При определении добавочного поля \vec{H}^+ , согласно формулам (5), (6), первое уравнение системы (4) автоматически выполнилось, поэтому потенциалы ψ и p будем искать как решение второго дифференциального уравнения этой системы в области Ω , при этом выберем область Ω настолько большой, чтобы на ее границах можно было положить $\vec{H} = \vec{H}^+ + \vec{H}^0 = 0$. Для решения этого уравнения перейдем к эквивалентной вариационной формулировке, умножив это уравнение на пробную функцию v и проинтегрировав по Ω :

$$\int_{\Omega} \operatorname{div}(\mu\vec{H}^+ + (\mu - \mu^0)\vec{H}^0) v d\Omega = 0. \quad (7)$$

Представив область Ω в виде объединения областей полного и неполного потенциалов Ω_ψ и Ω_p , перейдем от уравнения (7) к уравнению

$$\int_{\Omega_\psi} \operatorname{div}(\mu\vec{H}^+ + (\mu - \mu^0)\vec{H}^0) v d\Omega + \int_{\Omega_p} \operatorname{div}(\mu\vec{H}^+ + (\mu - \mu^0)\vec{H}^0) v d\Omega = 0.$$

Далее, подставляя в полученное равенство соотношения (5), (6) и учитывая, что в области Ω_p $\mu = 1$, а поле \vec{H}_c^+ является соленоидальным, получим

$$\int_{\Omega_\psi} \operatorname{div} \left(\mu \vec{H}_\psi^+ + (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \right) \upsilon d\Omega + \int_{\Omega_p} \operatorname{div} \left(\vec{H}_p^+ + (1 - \mu^0) \vec{H}^0 \right) \upsilon d\Omega = 0. \quad (8)$$

Применяя к каждому слагаемому в левой части равенства (8) формулу Грина интегрирования по частям и учитывая, что на внешней границе S области Ω $\vec{H}^0 + \vec{H}^+ = \vec{0}$, перейдем к следующему соотношению:

$$\begin{aligned} & - \int_S \mu^0 \vec{H}^0 \upsilon d\bar{S} - \int_{\Omega_p} \vec{H}_p^+ \operatorname{grad} \upsilon d\Omega - \int_{\Omega_p} (1 - \mu^0) \vec{H}^0 \operatorname{grad} \upsilon d\Omega + \\ & + \int_{S_p} \vec{H}_p^+ \upsilon d\bar{S} + \int_{S_p} (1 - \mu^0) \vec{H}^0 \upsilon d\bar{S} - \int_{\Omega_\psi} \mu \vec{H}_\psi^+ \operatorname{grad} \upsilon d\Omega - \int_{\Omega_\psi} (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \operatorname{grad} \upsilon d\Omega + \\ & + \int_{S_\psi} \mu \vec{H}_\psi^+ \upsilon d\bar{S} + \int_{S_\psi} (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \upsilon d\bar{S} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В данном равенстве S_ψ – граничная поверхность между областями Ω_ψ и Ω_p с нормалью \vec{n}_ψ , внешней для области Ω_ψ , а поверхность S_p – та же поверхность, но с нормалью \vec{n}_p , внешней для области Ω_p . Таким образом, нормали \vec{n}_ψ и \vec{n}_p являются противоположно направленными, а значит, определив нормаль единым образом, например, $\vec{n} = \vec{n}_\psi$, и обозначив соответствующую поверхность S_u , поверхностные интегралы в соотношении (9) можно свести в один. Используя в объемном интеграле единое обозначение μ для магнитной проницаемости во всей области Ω , получим

$$\begin{aligned} & - \int_S \mu^0 \vec{H}^0 \upsilon d\bar{S} - \int_{\Omega_p} \vec{H}_p^+ \operatorname{grad} \upsilon d\Omega - \int_{\Omega_\psi} \mu \vec{H}_\psi^+ \operatorname{grad} \upsilon d\Omega - \\ & - \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \operatorname{grad} \upsilon d\Omega + \int_{S_u} \left(\mu \vec{H}_\psi^+ - \vec{H}_p^+ + (\mu - \mu_\psi^0) \vec{H}_\psi^0 - (1 - \mu_p^0) \vec{H}_p^0 \right) \upsilon d\bar{S} = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где \vec{H}_ψ^0 и \vec{H}_p^0 – нормальное поле, а μ_ψ^0 и μ_p^0 – относительные магнитные проницаемости в прилегающих к поверхности областях полного и неполного потенциалов, соответственно.

Рассмотрим более подробно выражение, стоящее внутри полученного поверхностного интеграла. Заметим, что на поверхности S_u нормальные составляющие вектора магнитной индукции как нормального, так и суммарного поля должны быть непрерывны. Это условие можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \left[\mu \left(\vec{H}_\psi^0 + \vec{H}_\psi^+ \right) \right]_n = \left[\vec{H}_p^0 + \vec{H}_p^+ + \vec{H}_c^+ \right]_n, \\ \left[\mu_\psi^0 \vec{H}_\psi^0 \right]_n = \left[\mu_p^0 \vec{H}_p^0 \right]_n. \end{cases} \quad (11)$$

Из первого уравнения системы (11) получаем

$$\left[\vec{H}_c^+ \right]_n = \left[\mu \left(\vec{H}_\psi^0 + \vec{H}_\psi^+ \right) - \vec{H}_p^0 - \vec{H}_p^+ \right]_n.$$

Таким образом,

$$\left[\mu \vec{H}_\psi^+ - \vec{H}_p^+ + (\mu - \mu_\psi^0) \vec{H}_\psi^0 - (1 - \mu_p^0) \vec{H}_p^0 \right]_n =$$

$$= \left[\vec{H}_c^+ - \mu_\psi^0 \vec{H}_\psi^0 + \mu_p^0 \vec{H}_p^0 \right]_n = \left[\vec{H}_c^+ \right]_n. \quad (12)$$

С учетом равенства (12), справедливого на поверхности S_u , уравнение (10) может быть записано в более простом виде:

$$\begin{aligned} & - \int_S \mu^0 \vec{H}^0 \circ \vec{dS} - \int_{\Omega_p} \vec{H}_p^+ \text{grad} \circ d\Omega - \int_{\Omega_\psi} \mu \vec{H}_\psi^+ \text{grad} \circ d\Omega - \\ & - \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \text{grad} \circ d\Omega + \int_{S_u} \vec{H}_c^+ \circ \vec{dS} = 0. \end{aligned}$$

Переносим в правую часть все слагаемые, не содержащие неизвестного поля \vec{H}^+ в явном виде, и подставляя выражения (5), (6) для добавочного поля через градиенты скалярных потенциалов, получим окончательное уравнение:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_p} \text{grad} p \text{grad} \circ d\Omega + \int_{\Omega_\psi} \mu \text{grad} \psi \text{grad} \circ d\Omega = \\ & = \int_S \mu^0 \vec{H}^0 \circ \vec{dS} + \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \vec{H}^0 \text{grad} \circ d\Omega - \int_{S_u} \vec{H}_c^+ \circ \vec{dS}. \end{aligned} \quad (13)$$

Это уравнение обеспечивает выполнение равенства $\text{div}(\mu \vec{H}) = 0$ в области Ω , а также необходимую для этого непрерывность нормальной составляющей вектора $\mu \vec{H}$ на поверхности $S_u = \Omega_\psi \cap \Omega_p$.

Для того чтобы на границе S_u между областями Ω_ψ и Ω_p выполнялись требования для решения исходного уравнения условия сопряжения, зададим соотношение между значениями полного и неполного потенциалов в следующем виде:

$$\psi = p + u, \quad (14)$$

где функция u – скачок (или разрыв) потенциалов аномальной задачи. Значения этой функции на поверхности S_u определяются из условия непрерывности тангенциальной составляющей напряженности суммарного магнитного поля \vec{H} на этой поверхности. Далее для определенности представим область Ω в виде тетраэдров с линейными базисными функциями, а в качестве пробной функции \circ в уравнении (13) будем поочередно выбирать глобальные базисные функции, получаемые сшивкой локальных.

Представим функции ψ и p в виде линейных комбинаций базисных функций ϕ_i :

$$\psi = \sum_{i \in I(\Omega^\psi)} q_i^\psi \phi_i, \quad p = \sum_{i \in I(\Omega^p)} q_i^p \phi_i. \quad (15)$$

Здесь $I(\Omega^\psi)$ – множество индексов узлов сетки, принадлежащих области Ω^ψ , включая ее границы, а $I(\Omega^p)$ – аналогичное множество для области Ω^p . Обозначим множество индексов узлов, принадлежащих поверхности S^u как $I(S^u)$, т.е.

$I(S^u) = I(\Omega^\psi) \cap I(\Omega^p)$. Тогда из равенства (14) следует, что

$$q_i^\psi = q_i^p + u_i, \quad i \in I(S^u), \quad (16)$$

где u_i – значение скачка потенциалов u в i -ом узле заданной сетки. Подставим выражения (15) в уравнение (13). В результате получим следующее уравнение:

$$\int_{\Omega_p} \left(\sum_{i \in I(\Omega_p)} q_i^p \text{grad } \varphi_i \right) \text{grad } \upsilon d\Omega + \int_{\Omega_\psi} \mu \left(\sum_{i \in I(\Omega_\psi)} q_i^\psi \text{grad } \varphi_i \right) \text{grad } \upsilon d\Omega = \quad (17)$$

$$= \int_S \mu^0 \bar{H}^0 \upsilon d\bar{S} + \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \bar{H}^0 \text{grad } \upsilon d\Omega - \int_{S_u} \bar{H}_c^+ \upsilon d\bar{S}.$$

Неизвестными в данном уравнении являются q_i^ψ , $i \in I(\Omega^\psi)$ и q_i^p , $i \in I(\Omega^p)$, т.е. узлам с номерами $i \in I(S^u)$ соответствуют по две неизвестные. Чтобы ввести единый вектор неизвестных \vec{q} , размерность которого совпадает с числом узлов конечноэлементной сетки (а, следовательно, и с числом базисных функций), используем соотношение (14). В этом случае компоненты вектора \vec{q} можно определить следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} q_i^\psi, & i \in I(\Omega^\psi), \\ q_i^p, & i \in I(\Omega^p) \setminus I(S^u). \end{cases}$$

Вводя дополнительный вектор \vec{q}^u той же размерности, что и вектор \vec{q} , компоненты которого определяются соотношениями

$$q_i^u = \begin{cases} u_i, & i \in I(S^u), \\ 0, & i \in (I(\Omega^\psi) \cup I(\Omega^p)) \setminus I(S^u), \end{cases}$$

перепишем уравнение (17) в виде

$$\int_{\Omega} \mu \left(\sum_{i=1}^N q_i \text{grad } \varphi_i \right) \text{grad } \upsilon d\Omega - \int_{\Omega_\psi} \left(\sum_{i=1}^N q_i^u \text{grad } \varphi_i \right) \text{grad } \upsilon d\Omega =$$

$$= \int_S \mu^0 \bar{H}^0 \upsilon d\bar{S} + \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \bar{H}^0 \text{grad } \upsilon d\Omega - \int_{S_u} \bar{H}_c^+ \upsilon d\bar{S},$$

где N – полное число узлов в конечноэлементной сетке.

Выбирая поочередно в качестве пробной функции υ базисные функции, получим систему уравнений, которая в матричном виде может быть записана как $A\vec{q} = \vec{F}$, где

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \mu \text{grad } \varphi_i \text{grad } \varphi_j d\Omega, \quad i, j = \overline{1, N},$$

$$F_j = \int_{\Omega_p} \left(\sum_{i=1}^N q_i^u \text{grad } \varphi_i \right) \text{grad } \varphi_j d\Omega + \int_{\Omega} (\mu - \mu^0) \bar{H}^0 \text{grad } \varphi_j d\Omega -$$

$$- \int_{S_u} \bar{H}_c^+ \bar{n} \varphi_j d\bar{S} + \int_S \mu^0 \bar{H}^0 \varphi_j d\bar{S}, \quad j = \overline{1, N}.$$

Полученная система уравнений, очевидно, является в общем случае нелинейной, так как коэффициент относительной магнитной проницаемости μ в большинстве реальных задач является функцией от напряженности магнитного поля, аномальная часть которого в области Ω_ψ определяется через полный потенциал ψ .

Результаты численного моделирования

Рассмотрим задачу моделирования постоянного магнитного поля в квадрупольной линзе, предложенную ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера. Прежде всего, дадим описание расчетной области. Конструкция магнита симметрична относительно плоскости $z=0$, что дает возможность решать задачу в одной, например, верхней, его половине, при задании соответствующих краевых условий на плоскости симметрии. Также плоскостями симметрии являются плоскости $x=0$ и $y=0$, а значит, мы можем перейти к решению задачи в области $x \geq 0$, $y \geq 0$, $z \geq 0$, что позволяет задавать в этой области более подробную сетку, чем это было бы возможно при решении задачи во всей конструкции. Требуемая симметрия обеспечивается краевыми условиями первого рода на границах $x=0$, $y=0$ и $z=0$.

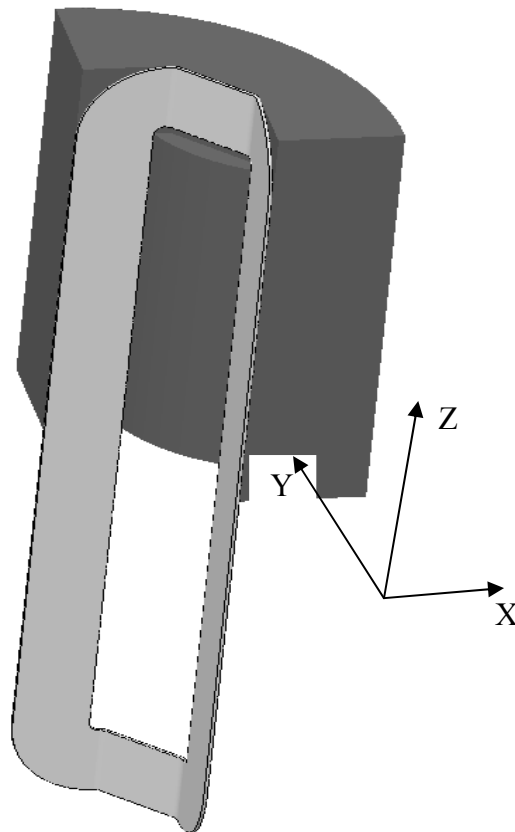


Рис. 1. Трехмерная конструкция

На рис. 1 представлена часть расчетной области, обладающая ферромагнитными свойствами. Высота рассматриваемого фрагмента – 68.8 см, внешний радиус – 42 см, толщина боковых стенок – 16.5 см. Полус магнита в плоскости $z = const$ описывается гиперболой, радиус гиперболы 23 см, высота полюса – 56 см.

Таким образом, в полной конструкции было четыре полюса, на каждом из которых была расположена токовая обмотка. Плотность тока во всех четырех обмотках одинакова и составляет 1780 кА/см^2 , сечение обмоток – $0.5 \times 11.26 \text{ см}$, при этом направление токов в обмотках меняется при переходе к следующему полюсу.

Базовое сечение расчетной области, с учетом удаленных границ большого объема для задания первых краевых условий, имеет вид, представленный на рис. 2, а; на рис. 2, б, представлена дискретизация базового сечения конечными элементами.

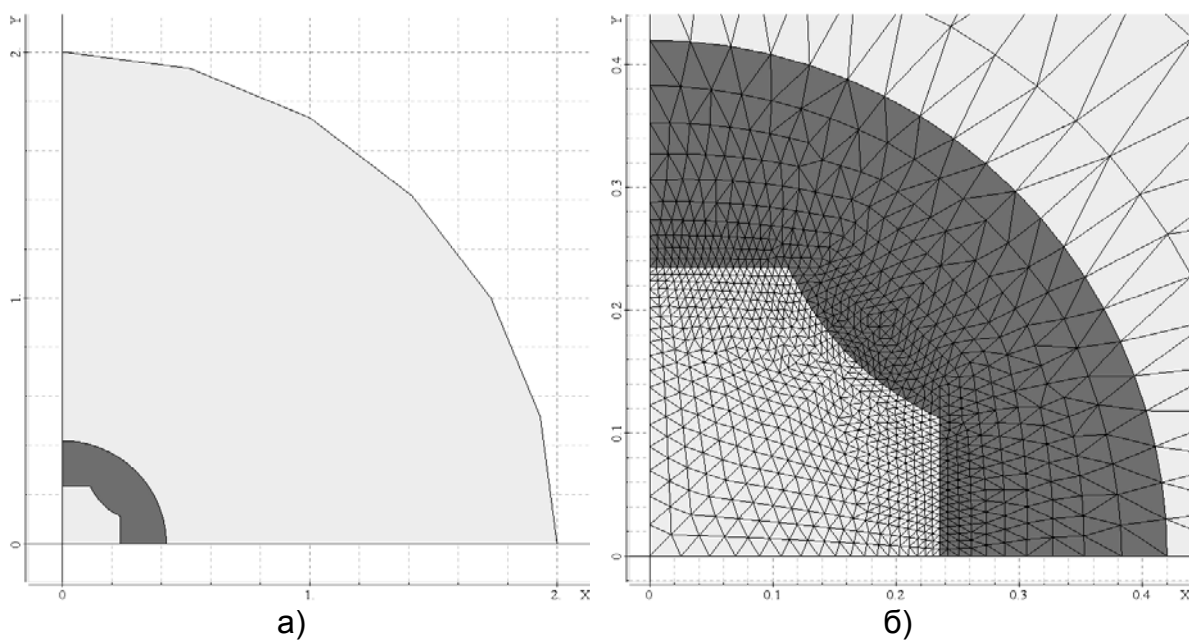


Рис. 2. Базовое сечение расчетной области

Квадрупольная линза имеет хорошее двумерное приближение, поэтому для ее моделирования можно очень эффективно применить технологию выделения нормального поля, поскольку мы можем очень точно решить двумерную задачу, а затем перейти к решению трехмерной задачи на аномалию. Для решения двумерной задачи воспользуемся постановкой с вектор-потенциалом. Стационарное магнитное поле описывается уравнением

$$\operatorname{rot} \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J}, \quad (18)$$

где \vec{J} – плотность тока, \vec{B} – вектор магнитной индукции, μ – коэффициент магнитной проницаемости среды. Вводя векторный потенциал \vec{A} такой, что $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$, преобразуем уравнение (18) к виду

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{J}. \quad (19)$$

В рассматриваемой двумерной задаче вектор плотности тока \vec{J} и векторный потенциал \vec{A} имеют только одну ненулевую компоненту, т.е. $\vec{J} = (0, 0, J_z)$ и $\vec{A} = (0, 0, A_z)$. Это позволяет переписать уравнение (19) в скалярном виде:

$$-\operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{grad} A_z \right) = J_z. \quad (20)$$

На внешней границе Γ расчетной области положим A_z равным нулю:

$$A_z|_{\Gamma} = 0. \quad (21)$$

Используя найденное из уравнения (20) с краевыми условиями (21), распределение A_z , компоненты вектора магнитной индукции вычисляем по формулам

$$\vec{B}_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad \vec{B}_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}.$$

Так как решение рассматриваемой двумерной задачи используется как нормальное поле для решения другой задачи, его необходимо получить с очень высокой точностью, поэтому конечноэлементная сетка для решения этой задачи была взята очень подробной. Число узлов при конечноэлементной дискретизации составило 688168. Ис-

пользование столь подробной сетки для решения задачи в трехмерной постановке очевидно нереально. На рис. 3 представлено распределение вектор-потенциала \vec{A} .

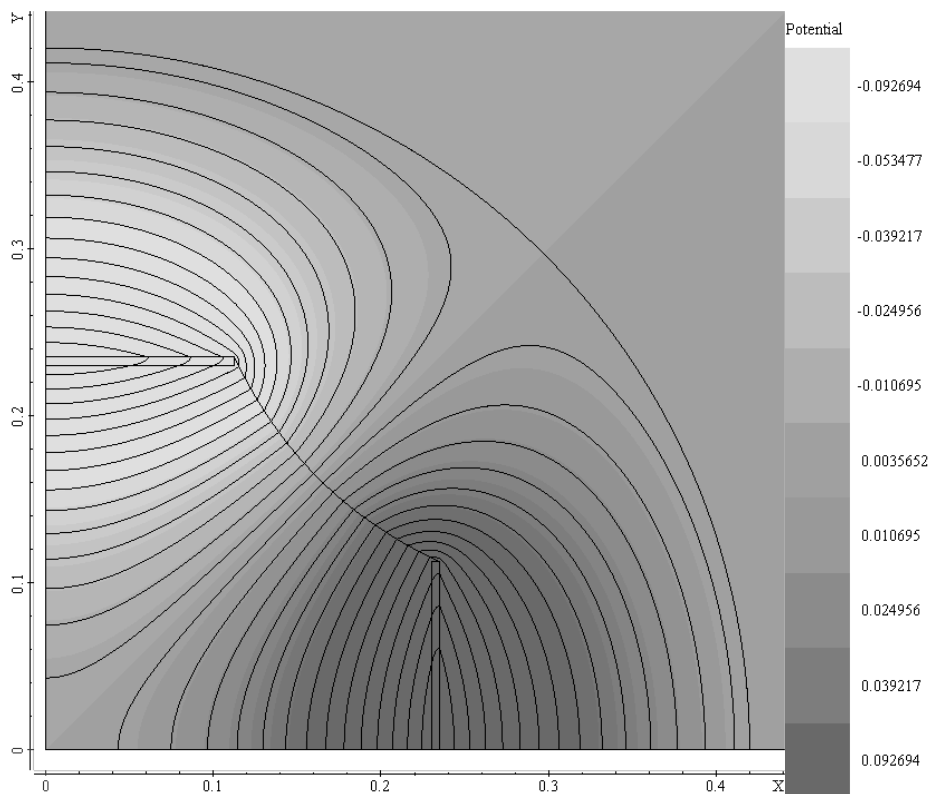


Рис. 3. Решение двумерной задачи

Искомыми характеристиками, которые применяются на практике для оценки качества квадрупольной линзы, являются гармоники магнитного поля \vec{B} . Гармоники представляют собой коэффициенты ряда Фурье:

$$A_n = \frac{1}{\pi r} \int_0^{2\pi r} I_B \sin\left(n \frac{\varphi}{r}\right) r d\varphi, \quad B_n = \frac{1}{\pi r} \int_0^{2\pi r} I_B \cos\left(n \frac{\varphi}{r}\right) r d\varphi,$$

где n – номер гармоники, r – радиус, на котором проводятся измерения, а величина

I_B рассчитывается по формуле $I_B = \int_{\alpha}^{\beta} \vec{B}_{\varphi}(r, \varphi) dz$. В силу симметрии конструкции все

гармоники $A_n = 0$, а ненулевыми являются только гармоники B_n с номерами $n = 4i - 2$, $i = \overline{1, \infty}$.

Оценим эффективность применения технологии выделения поля, вычислив гармоники с номерами 2, 6 и 10 при $r = 19$ см, $\alpha = 0$ см, $\beta = 56$ см, в сравнении с результатами, полученными непосредственно при решении трехмерной исходной задачи (2). Для этого решим задачи (2) и (4) на вложенных конечноэлементных сетках, при этом за грубую примем сетку с числом узлов 28368 (дискретизация базового сечения такой сетки изображена на рис. 2, б). Следовательно, удвоенная и учетверенная трехмерные сетки будут содержать 217469 и 1708689 узлов соответственно. При этом оценку точности конечноэлементной аппроксимации построенной трехмерной сетки для решения задачи (2) напрямую дополнительно проверим следующим образом: зададим ферромагнитную часть расчетной области и обмотки как бесконечно длинные. В этом случае мы фактически будем решать двумерную задачу, т.е. в любом сечении $z = const$ полу-

чим двумерное решение, точность которого будем оценивать путем сравнения с решением двумерной задачи на подробной сетке (используемым как нормальное поле).

	B_2	B_6	B_{10}
Двумерное решение (нормальное поле)	0.50528427	0.00004262	0.00000254
Решение исходной трехмерной задачи как двумерной на грубой сетке	0.50477600	0.00029760	0.00001469
Решение исходной трехмерной задачи как двумерной на удвоенной сетке	0.50510539	0.00028654	0.00005079
Решение исходной трехмерной задачи как двумерной на учетверенной сетке	0.50521215	0.00010346	0.00001654

Таблица 1. Результаты вычисления гармоник на основе двумерных решений

	B_2	B_6	B_{10}
Решение исходной трехмерной задачи на грубой сетке	0.49887337	-0.00011270	0.00052052
Решение исходной трехмерной задачи на удвоенной сетке	0.49909997	0.00000941	0.00057038
Решение исходной трехмерной задачи на учетверенной сетке	0.49910367	-0.00011407	0.00053633
Решение задачи с выделением аномальной части на грубой сетке	0.50067227	-0.00060202	0.00039387
Решение задачи с выделением аномальной части на удвоенной сетке	0.50094538	-0.00057088	0.00039105
Решение задачи с выделением аномальной части на учетверенной сетке	0.501045418	-0.00056978	0.00041062

Таблица 2. Результаты вычисления гармоник на основе трехмерных решений

Из полученных результатов (см. табл. 1) решения двумерной задачи (нормальное поле) и трехмерной задачи как двумерной видим, что трехмерность задачи вносит существенную погрешность в решение. С дроблением конечноэлементной сетки, конечно, трехмерное решение постепенно сходится к точному решению, однако вычислительные затраты, например, на учетверенной сетке являются уже критическими, и дальнейшие дробления практически невозможны.

Рассмотрим результаты решения трехмерных задач, приведенные в табл. 2. Здесь следует отметить, что аномалия поля достаточно низка, т.е. на 2–3 порядка меньше нормального поля. Вследствие этого можем утверждать, что технология выделения поля уже на самой грубой сетке дает результаты гораздо точнее, чем решение трехмерной задачи (2) напрямую на самой подробной сетке.

Заключение

Разработанная вычислительная схема реализована в конечноэлементном программном комплексе TELMA и довольно эффективно применяется для решения сложных практических задач.

Построенная вычислительная схема решения трехмерных задач магнитостатики с использованием скалярных потенциалов, основанная на выделении главной части напряженности магнитного поля, позволяет получить более высокую точность решения, чем исходная схема, при проведении расчетов на одной и той же конечноэлементной сетке. Чтобы получить такую же точность базовым методом, необходима гораздо более подробная сетка, использование которой приводит к значительному увеличению потребностей в ресурсах ЭВМ и временных затрат на решение поставленной задачи.

Высокая точность и эффективность такой вычислительной схемы, основанной на том, что главная часть поля определяется из решения более простых (двумерных) задач с высокой точностью, продемонстрирована на примере решения практической задачи моделирования магнитостатического поля в квадрупольной линзе.

Литература

1. Игнатъев А.Н., Рояк М.Э. Выделение основной части поля при решении трехмерных нелинейных задач магнитостатики // Материалы 8 международной конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения. – Новосибирск, 2006. – № 6. – С. 37–44.
2. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 869 с.
3. Шурина Э.П., Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э. Решение трехмерных нелинейных магнитостатических задач с использованием двух потенциалов. – Новосибирск, 1996. – 28 с. (Препринт / РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ; № 1070).

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОГРАВИТИРУЮЩЕГО ГАЗА*

И.М. Куликов

(Новосибирский государственный технический университет)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.А. Вшивков

(Новосибирский государственный технический университет)

Получены равновесные конфигурации вращающегося самогравитирующего газа в результате трехмерного моделирования нестационарных процессов в гравитирующей газовой системе с самосогласованным полем. Описан метод численной реализации, использование которого позволило исключить влияние направления сеточных линий и эмпирических параметров на решение.

Введение

Моделирование в астрофизике является основной методикой изучения нелинейных процессов эволюции космических структур и проверки теорий возникновения Вселенной. Вначале при создании космологических моделей использовались методики решения задачи многих тел. Для моделирования процессов видимой Вселенной требуется вводить дополнительные физические процессы. В первую очередь возникает необходимость введения газового компонента, связанного с темной материей через влияние сил гравитации. На современном этапе наиболее актуально численное моделирование нестационарной и пространственно трехмерной динамики гравитирующего газа [1, 2].

В настоящее время из всего широкого диапазона численных методов используются следующие: лагранжев метод сглаженных частиц SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), в основе которого лежит интерполяция расчетных ячеек в области сглаживания [3], и эйлеровы методы на адаптивных сетках AMR (Adaptive Mesh Refinement), базирующиеся в основном на кусочно-параболическом методе PPM (piece-parabolic method) [4], который является конечно-разностным методом высокого порядка точности типа метода Годунова. Метод сглаженных частиц SPH, разработанный в 1977 г. [5, 6], имеет большие возможности к адаптации к любой геометрии задачи. Более того, лагранжева природа метода позволяет локально изменять разрешение, которое «автоматически» следует за локальной массовой плотностью. Введение адаптивных сеток (Adaptive Mesh Refinement) позволяет повысить точность сеточных методов решения газодинамических задач. Такие особенности, как развитие больших градиентов в ударных волнах или контактных разрывах, особенно для сжимаемого течения, без использования переопределяемой адаптивной сетки становятся источником ошибок для всего решения. Методика AMR путем локального переопределения сетки оптимизирует качество численного решения. При использовании такого подхода стало возможным изучение физических процессов отдельно или совместно с астрофизическими течениями в широком диапазоне временных и пространственных масштабов.

В ходе эксплуатации разработанных кодов, помимо численного моделирования астрофизических задач, можно получить интересные результаты фундаментального характера, например, построить равновесные конфигурации самогравитирующих газовых тел [7–12]. Хорошо известны равновесные конфигурации самогравитирующей вращающейся жидкости [13]. Аналитическим путем можно получить равновесные конфигурации самогравитирующего вращающегося газа только при условии наличия ограничений на газодинамические параметры [13]. Задачу получения равновесных конфигураций самогравитирующего вращающегося газа можно решить только в ходе проведения численного эксперимента. Существующее аналитическое решение для стационар-

* Работа выполнена при поддержке программы Рособразования «Развитие научного потенциала ВШ» (проект РНП.2.2.1.1.3653)

ного самогравитирующего газового шара в настоящей работе выступает в качестве тестового решения.

Описание численного метода

Рассмотрим систему уравнений газовой динамики, дополненную уравнением Пуассона, в безразмерном виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho \bar{v}}{\partial t} + \operatorname{div}(\bar{v} \rho \bar{v}) &= -\operatorname{grad}(p) - \rho \operatorname{grad} \Phi, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{v}) &= -\operatorname{div}(p \bar{v}) - (\rho \operatorname{grad} \Phi, \bar{v}), \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(p \bar{v}) &= -\operatorname{div}(\bar{v}) p (\gamma - 1), \\ \Delta \Phi &= 4\pi \rho, \\ p &= (\gamma - 1) \rho \varepsilon.\end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность, \bar{v} – вектор скорости, p – давление, Φ – потенциал, ρE – плотность полная энергия, ε – внутренняя энергия, γ – показатель адиабаты.

За основу метода решения системы уравнений газовой динамики выбран метод крупных частиц Белоцерковского-Давыдова [14], который ранее применялся для решения газодинамических уравнений без учета гравитации [15], поэтому метод требовал модификаций для решения задач гравитационной газовой динамики. Этот метод обеспечивает автоматическое выполнение законов сохранения массы, импульса и полной энергии. Исходная система газодинамических уравнений решается в три этапа. Система уравнений на первом, эйлеровом, этапе получается из исходной системы уравнений, если в них опустить дивергентные слагаемые плотности потоков массы, компонент импульса и полной энергии. Эта система уравнений описывает процесс изменения параметров газа в произвольной области течения за счет работы сил давления, а также за счет разности потенциалов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \rho_1 \bar{v}_1}{\partial t} &= -\operatorname{grad}(p) - \rho \operatorname{grad} \Phi, \quad \frac{\partial \rho_1 E_1}{\partial t} = -\operatorname{div}(p \bar{v}) - \rho (\operatorname{grad} \Phi, \bar{v}), \\ \frac{\partial p_1}{\partial t} &= -\operatorname{div}(\bar{v}) p (\gamma - 1).\end{aligned}$$

Система уравнений на втором, лагранжевом, этапе, содержит дивергентные слагаемые и отвечает за процесс конвективного переноса газодинамических величин:

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 \bar{v}_2) = 0, \quad \frac{\partial \rho_2 \bar{v}_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 \bar{v}_2 \bar{v}_2) = 0, \quad \frac{\partial \rho_2 E_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 E_2 \bar{v}_2) = 0, \quad \frac{\partial p_2}{\partial t} + \operatorname{div}(p_2 \bar{v}_2) = 0.$$

На каждом временном шаге решение уравнений неразрывности, движения, полной и внутренней энергий сводится к последовательной реализации эйлерова и лагранжева этапов. В качестве начального условия для эйлерова этапа берется значение функций с предыдущего момента времени, для лагранжева этапа начальным условием является решение с эйлерова этапа.

Значения внутренней энергии независимо вычисляются с целью контроля выполнения законов сохранения как полной, так и внутренней энергии [16]. Контроль, происходящий на заключительном этапе, осуществляется перенормировкой схемных скоростей переноса массы, импульса и двух видов энергий на лагранжевом этапе метода Белоцерковского-Давыдова введением множителя. Такая перенормировка сохраняет направление скорости, корректируя его длину.

Введем в трехмерной области решения равномерную прямоугольную сетку с узлами: $x_i = ih$, $y_i = kh$, $z_i = lh$, где $i = 1 \dots I_{\max}$, $k = 1 \dots K_{\max}$, $l = 1 \dots L_{\max}$, h – шаг сетки в трех направлениях, $I_{\max}, K_{\max}, L_{\max}$ – количество узлов по направлениям x, y, z : $h = r_x / I_{\max}$, $h = r_y / K_{\max}$, $h = r_z / L_{\max}$. Определим ячейки, имеющие своими вершинами восемь узлов, через их центры с координатами: $x_{i+1/2} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$, $y_{i+1/2} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2}$, $z_{i+1/2} = \frac{z_i + z_{i+1}}{2}$. Для численной реализации необходимо перейти от функций с непрерывными аргументами к дискретным наборам чисел, их заменяющих. Определим в узлах только компоненты вектор скорости $v_{\xi,ikl}^n = v_{\xi}(x_i, y_k, z_l, t^n)$, где $\xi = x, y, z$, остальные газодинамические параметры определим в ячейках $f_{ikl}^n = f(x_{i+1/2}, y_{k+1/2}, z_{l+1/2}, t^n)$, где $f = \rho, \rho v_{\xi}, p, T, \Phi$.

Рассмотрим подробнее численную реализацию первого этапа. Для исключения влияния направлений координатных линий используем операторный подход [17].

$$\begin{aligned} \rho_{ikl} &= \rho_{ikl}^n, \\ \frac{\rho_{ikl} v_{x,ikl}^n - \rho_{ikl}^n v_{x,ikl}^n}{\tau} &= -\frac{p_{i+1,kl}^n - p_{i-1,kl}^n}{2h_x} - \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{i+1,kl}^n - \Phi_{i-1,kl}^n}{2h_x}, \\ \frac{\rho_{ikl} v_{y,ikl}^n - \rho_{ikl}^n v_{y,ikl}^n}{\tau} &= -\frac{p_{i,k+1,l}^n - p_{i,k-1,l}^n}{2h_y} - \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{i,k+1,l}^n - \Phi_{i,k-1,l}^n}{2h_y}, \\ \frac{\rho_{ikl} v_{z,ikl}^n - \rho_{ikl}^n v_{z,ikl}^n}{\tau} &= -\frac{p_{ik,l+1}^n - p_{ik,l-1}^n}{2h_z} - \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{ik,l+1}^n - \Phi_{ik,l-1}^n}{2h_z}, \\ \frac{\rho_{ikl} E_{ikl} - \rho_{ikl}^n E_{ikl}^n}{\tau} &= -\frac{p_{i+1,kl}^n m(v_{x,i+1,kl}^n) - p_{i-1,kl}^n m(v_{x,i-1,kl}^n)}{2h_x} - \\ & - \frac{p_{i,k+1,l}^n m(v_{y,i,k+1,l}^n) - p_{i,k-1,l}^n m(v_{y,i,k-1,l}^n)}{2h_y} - \frac{p_{ik,l+1}^n m(v_{z,ik,l+1}^n) - p_{ik,l-1}^n m(v_{z,ik,l-1}^n)}{2h_z} - \\ & - \left(m(v_{x,ikl}^n) \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{x,i+1,kl}^n - \Phi_{x,i-1,kl}^n}{2h_x} + m(v_{y,ikl}^n) \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{y,i,k+1,l}^n - \Phi_{y,i,k-1,l}^n}{2h_y} + m(v_{z,ikl}^n) \rho_{ikl}^n \frac{\Phi_{z,ik,l+1}^n - \Phi_{z,ik,l-1}^n}{2h_z} \right), \\ \frac{p_{ikl} - p_{ikl}^n}{\tau} &= -(\gamma - 1) p_{ikl}^n \left(\frac{m(v_{x,i+1,kl}^n) - m(v_{x,i-1,kl}^n)}{2h_x} + \frac{m(v_{y,i,k+1,l}^n) - m(v_{y,i,k-1,l}^n)}{2h_y} + \frac{m(v_{z,ik,l+1}^n) - m(v_{z,ik,l-1}^n)}{2h_z} \right). \end{aligned}$$

Схема является консервативной и аппроксимирует уравнения со вторым порядком по пространству и с первым по времени.

На лагранжевом этапе реализуется конвективный перенос плотности, импульса, полной и внутренней энергии через грани ячеек со схемной скоростью. Схемная скорость не соответствует искомой скорости газа, которая определяется после завершения лагранжева этапа системы как результирующая итоговых значений импульса и плотности. Перемещенную по одному из направлений (x, y, z) долю значения физической величины можно записать в виде $a = \left| \frac{\tau v_{\xi}}{h_{\xi}} \right|$, где $v_{\xi} = \frac{\rho v_{\xi}}{\rho}$. Значение каждой газодинамической величины разделяется между исходной ячейкой и семью соседними. Потоки через грани, ребра и вершины ячейки газодинамического параметра M , $M = \rho, \rho \bar{v}, \rho E, p$ имеют вид: $M(1 - a_x)(1 - a_z)a_x$ – поток через грань, ортогональную оси x ,

$M(1-a_x)(1-a_z)a_y$ – поток через грань, ортогональную оси y , $M(1-a_x)(1-a_y)a_z$ – поток через грань, ортогональную оси z , $M(1-a_x)a_ya_z$ – поток через ребро, параллельное оси x , $M(1-a_y)a_xa_z$ – поток через ребро, параллельное оси y , $M(1-a_z)a_xa_y$ – поток через ребро, параллельное оси z , $Ma_xa_ya_z$ – поток через вершину. В ячейке остается $M(1-a_x)(1-a_y)(1-a_z)$. Здесь $a_\xi = \left| \frac{\tau v_\xi}{h_\xi} \right|$.

С целью получения разностной схемы со свойством инвариантности относительно вращения применяется модифицированный расчет скоростей переноса на лагранжевом этапе [18]:

$$\bar{v}_\xi = \frac{V_{\xi_1}}{1 + \frac{\tau}{h_\xi}(V_{\xi_1} - V_{\xi_2})},$$

V_ξ – осредненная скорость на внешней грани, когда направление вектора скорости совпадает с направлением внешней нормали, или внутренней грани, в противном случае, ортогональной оси ξ . В программной реализации лагранжева этапа направление перемещения величин учитывается через определение знаков компонент вектора скорости ($\text{sign } x, \text{sign } y, \text{sign } z$).

На заключительном этапе на каждом временном шаге производится корректировка баланса энергий [19]. С этой целью осуществляется перенормировка схемных скоростей переноса массы, импульса и двух видов энергий на лагранжевом этапе метода Белоцерковского-Давыдова:

$\|V_i^n\| = \sqrt{2 \left(E_i^n - \frac{1}{\rho_i^n} \frac{P_i^n}{\gamma - 1} \right)}$. Таким образом, происходит кор-

ректировка длины вектора скорости при неизменном направлении. Такая модификация метода обеспечивает справедливость детального баланса энергий. Заметим, что разностная схема не становится полностью консервативной, поскольку коррекция скорости вносит погрешность в закон сохранения импульса.

Решение уравнения Пуассона основано на разложении функции потенциала и плотности в виде суперпозиции по собственным функциям оператора Лапласа [20]. Используя 27-точечный шаблон, получим следующую формулу перехода в пространстве гармоник от амплитуды гармоник плотности к амплитудам гармоник потенциала:

$$\varphi_{jmn} = - \frac{4\pi h^2 \rho_{jmn}}{6 \left(1 - \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi j}{I} \right) \right) \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi m}{K} \right) \right) \left(1 - \frac{2}{3} \sin^2 \left(\frac{\pi n}{L} \right) \right) \right)}.$$

Основной вычислительной сложностью является нахождение амплитуд гармоник, поэтому их нахождение реализовано с помощью быстрого преобразование Фурье.

Тестирование газодинамической части программы

Так как в астрофизике математическое моделирование зачастую выступает единственной возможностью подтвердить или опровергнуть новые теории, то исследователи особенно нуждаются в применении надежных и заслуживающих доверия программ. Прежде чем представлять новые результаты моделирования, необходимо провести разнообразные тестовые расчеты для обоснования и верификации используемой программы. Верификация и обоснование – основные этапы развития для любой технологии, будь это пакет программ для математического моделирования или инструментарий для

наблюдений. Для вычислительной технологии целью такого этапа тестирования является оценка правомерности и точности моделирования. В области вычислительной гидродинамики проделана большая работа по обоснованию и верификации [21].

В процессе создания комплекса программ проводилась верификация численного алгоритма на тестах с решениями из специализированного банка данных [22]. Рассмотрим результаты тестирования на задачах Годунова и исследование работы численного метода на границе газ-вакуум. Тесты Годунова основаны на решении задачи распада разрыва. В расчетной области $[0; \Omega]$ задан скачок значений плотности, давления и скорости, время счета t , $\gamma = 1.4$ (см. табл. 1).

№	ρ_1	V_1	p_1	ρ_2	V_2	p_2	x_0	Ω	t
1	2	0	2	1	0	1	1.0	2	0.2
2	1	0.75	1	0.125	0	0.1	0.3	1	0.2
3	1	-2	0.4	1	2	0.4	0.5	1	0.15
4	1	0	1000	1	0	0.01	0.5	1	0.012
5	5.99924	19.5975	460.894	5.99242	-6.19633	46.095	0.4	1	0.035
6	1	0	1	0	0	0	1.0	2	0.4

Таблица 1. Начальные данные для задач Годунова и распространения газа в вакуум

Целью первого теста является определение правильности описания контактного разрыва. Большинство методов решения газодинамических уравнений дают либо осцилляцию, либо диффузию («размазывание» ударных волн) [22]. Метод Белоцерковского–Давыдова дает размазывание решения в области контактного разрыва, которое уменьшается с дроблением сетки (рис. 1, а1, б1, в1, г1).

Отличие второго теста от первого состоит в задании начальной скорости газа с левой части ударной трубы. Особенность постановки приводит к провоцированию усиленного размазывания ударных волн. При дроблении сетки размазывание ударной волны уменьшается (рис. 1, а2, б2, в2, г2).

В ходе теста №3 газ с одинаковыми термодинамическими параметрами разлетается в разные стороны, образуя в центре существенную область разрежения. Тест выявляет способность физически правдоподобно моделировать такую ситуацию. Из литературы известно, что многие методы дают ошибочный (нефизический) рост температуры в области сильного разрежения и как следствие, получаемое решение искажается. Метод Белоцерковского–Давыдова успешно моделирует область разрежения (рис. 1, а3, б3, в3, г3).

Основная задача теста №4. – проверка устойчивости численного метода. Огромный перепад давления (5 десятичных порядков) должен выявить способность метода устойчиво моделировать сильные возмущения с возникновением быстро распространяющихся ударных волн. Графики на рис. 4 показывают, что имеют место малые осцилляции решения в области контактного разрыва. Так называемая волна-предшественник (ступенька на графике внутренней энергии на правом фронте ударной волны) отражена корректно, без размазывания, что говорит в пользу метода (рис. 1, а4, б4, в4, г4).

Особенностью теста №5 является наличие трех разрывов: две ударные волны и один контактный разрыв, движущийся направо. При дроблении сетки сокращаются осцилляции давления и скорости и уменьшается размазывание ударных волн (рис. 1, а5, б5, в5, г5).

Тест №6 предназначен для проверки точности воспроизведения решения на границе газ – вакуум методом крупных частиц. Из рисунков (рис. 1, а6, б6, в6, г6) видно, что газодинамические функции на границе газ–вакуум гладкие и ограниченные, имеет

место характерный пик плотности на границе, совпадающий с экспериментальными данными.

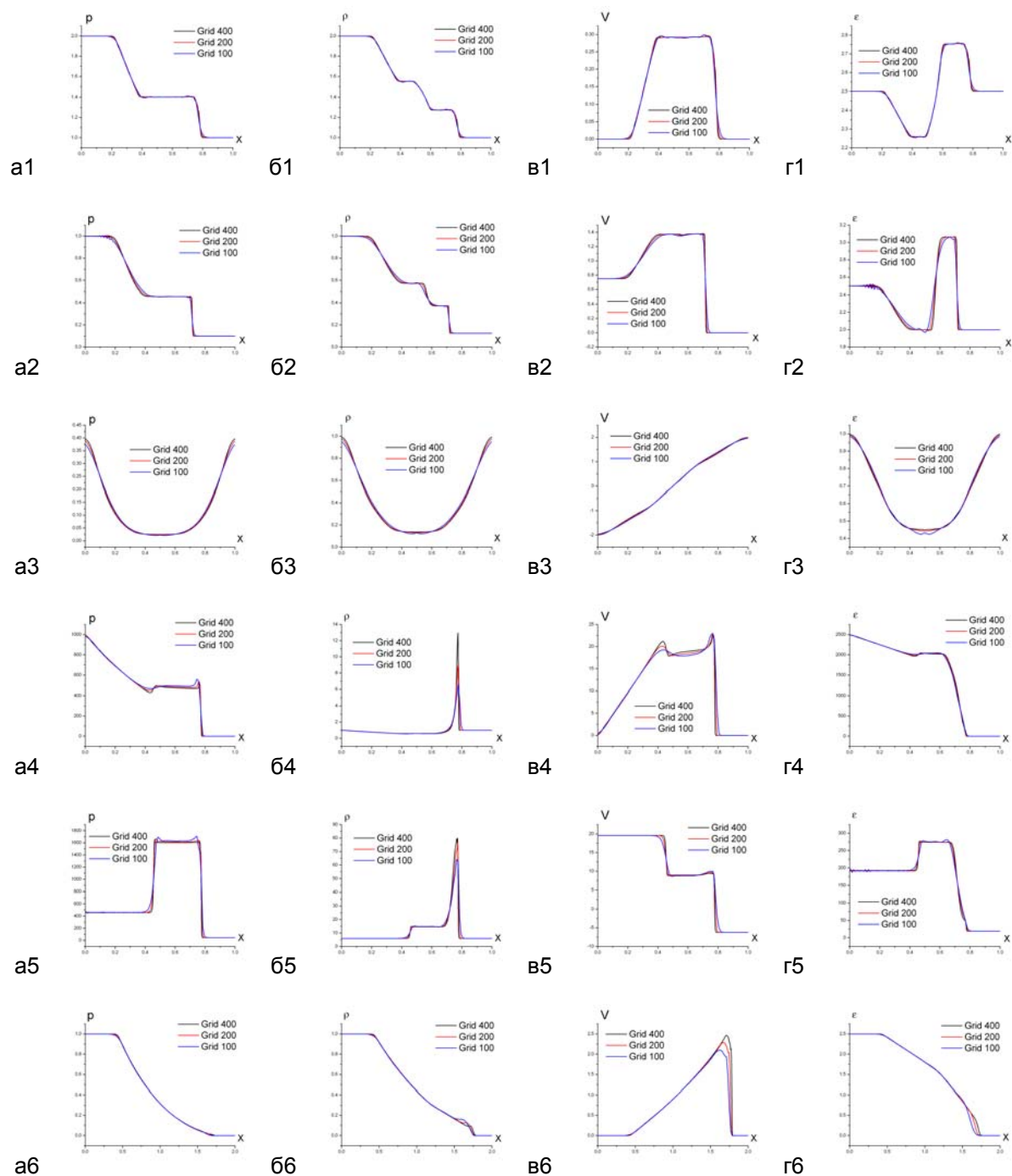


Рис. 1. Распределение давления (а), плотности(б), скорости (в), внутренней энергии (г). Тесты № 1–6

Получение равновесных фигур самогравитирующего газа

Как показывают наблюдения [7], большая часть звезд находится в состоянии гидростатического равновесия, и поэтому значительный интерес с точки зрения астрофизики представляют собой различные стационарные и квазистационарные образования вращающегося самогравитирующего газа. Особенно важно исследовать процессы, которые приводят начальную конфигурацию газового облака к таким стационарным со-

стояниям. Облако газа может либо коллапсировать под действием сил гравитации, либо разлетаться под действием сил давления. Равновесные конфигурации самогравитирующих облаков газа являются результатом равновесия этих двух процессов [23]. В качестве начального приближения используем стационарную конфигурацию самогравитирующего газового шара. При введении в начальное распределение небольших значений угловой скорости (как постоянных, так и вытекающих из закона Кеплера) удастся получить последовательность равновесных фигур вращающегося самогравитирующего газа.

Рассмотрим подробнее результаты численного моделирования задачи о самогравитирующем газовом шаре. Расчетная область задана в виде куба. Область заполнена вакуумом. В центре области находится самогравитирующее газовое облако в форме шара с заданным начальным распределением плотности и давления.

В качестве начальных данных для системы уравнений возьмем гидростатически равновесную стационарную конфигурацию, которую можно найти [24, 25], задав распределение плотности, из системы уравнений газовой динамики, дополненной уравнением Пуассона, записанных в сферических координатах:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dr} = -\frac{M(r)\rho}{r^2} \\ \frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho \\ p = (\gamma - 1)\rho\varepsilon \end{cases}$$

Существование аналитического решения позволяет рассматривать эту задачу в качестве тестовой. Выберем радиус шара $r_0 = 1$ и начальное распределения плотности в виде

$$\rho_0(r) = \begin{cases} 1-r, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}$$

Тогда начальные распределения давления и гравитационного потенциала имеют вид

$$p_0(r) = \begin{cases} -\frac{\pi r^2}{36}(9r^2 - 28r + 24) + \frac{5\pi}{36}, & r \leq 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}, \quad \Phi_0(r) = \begin{cases} -\frac{\pi}{3}(r^3 - 2r^2) - \frac{2\pi}{3}, & r \leq 1 \\ -\frac{\pi}{3r}, & r > 1 \end{cases}$$

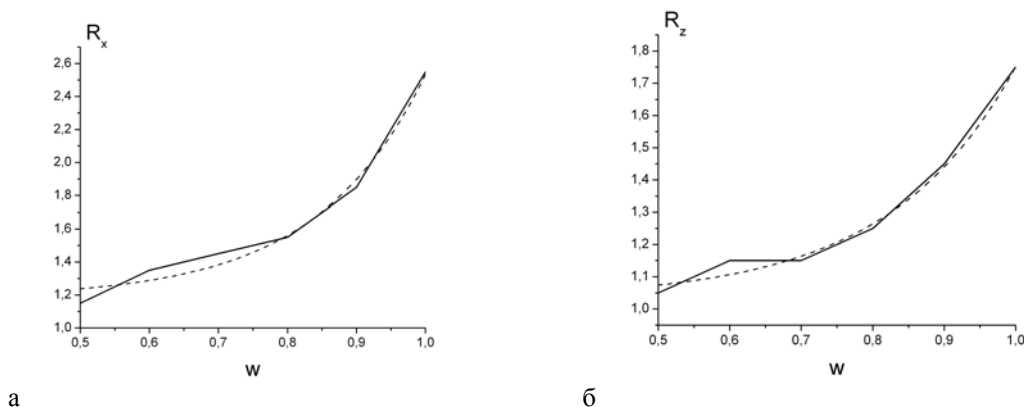


Рис. 2. Изменение формы самогравитирующего газового шара при вращении. Зависимость длин полуосей эллипса от угловой скорости (сплошная линия) и ее аппроксимация (пунктирная линия) (а,б)

Угловая скорость ω должна удовлетворять условию

$$0 < \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho \omega^2 r^2 d\Omega < 0.4 \left| \frac{1}{2} \int_{\Omega} \rho \Phi d\Omega \right|.$$

С увеличением угловой скорости самогравитирующий газовый шар принимает форму эллипсоида вращения, полуоси которого можно аппроксимировать функциями (рис. 2):

$$r_x(w) = 2.35 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{w}{0.15736}\right) + 1.18171, \quad r_z(w) = 2.52 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{w}{0.17686}\right) + 1.03146.$$

Параллельная реализация программы для модели общей памяти

Большие объемы обрабатываемых данных и большое время счета заставляют использовать суперкомпьютеры. Данная задача требует использования суперкомпьютеров с распределенной памятью, мы для начала ограничимся архитектурой с общей памятью. Суть реализации алгоритма решения задачи гравитационной газовой динамики – независимые вычисления газодинамических параметров на трех этапах. Для параллельной реализации программы для модели общей памяти будем использовать библиотеку OpenMP [26, 27], в основе которой находится модель fork-join. Программа разработана для SMP-системы calc2.ami.nstu.ru факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного университета.

Выводы

В статье изложены результаты моделирования динамики самогравитирующих газовых объектов. Эволюция облака газа описывается системой уравнений газовой динамики с учетом уравнения Пуассона для гравитационного потенциала. Описан метод численной реализации, использование которого позволило исключить влияние направления сеточных линий и эмпирических параметров на решение. Приведены результаты верификации газодинамической части результирующей численной модели. В результате трехмерного моделирования нестационарных процессов в гравитирующей газовой системе с самосогласованным полем получены равновесные конфигурации вращающегося самогравитирующего газа. Получены аналитические зависимости длин полуосей эллипсоида – формы тела вращения газового облака. Разработана параллельная программа для модели общей памяти.

Выражаю благодарность профессору кафедры ПВТ НГТУ, д.ф.-м.н. В.А. Вшивкову и к.ф.-м.н., доценту Г.Г. Лазаревой за научное руководство.

Литература

1. Снытников В.Н., Пармон В.Н. Жизнь создает планеты? // Наука из первых рук. – 2004. – Т. 0. – С. 20–31.
2. Снытников В.Н., Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Никитин С.А., Пармон В.Н., Снытников А.В. Численное моделирование гравитационных систем многих тел с газом // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7. – № 3. – С. 72–84.
3. Monaghan J.J., Gingold R.A. Shock simulation by the particle method SPH // Journal of computational Physics. – 1983. – Vol. 52. – P 374–389.
4. Collela P., Woodward P.R. The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations // J. Comp. Phys. – 1984. – V.54. – P. 174–201.
5. Gingold R.A., Monaghan J.J. SPH: theory and application to non-spherical stars // Monthly Notices Royal Astronomical Society. – 1977. – Vol. 181. – P 375–389.
6. Lucy L.B. A numerical approach to the testing of fusion process // Astronomical Journal. – 1977. – Vol. 88. – P. 1013–1024.
7. Тассуль Ж.Л. Теория вращающихся звезд. – М: Наука, 1982. – 472с.

8. Абакумов М.В., Мухин С.И., Попов Ю.П., Четкин В.М. Исследование равновесных конфигураций газового облака вблизи гравитирующего центра. – Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – 1995. – №33.
9. Баранов В.Б. Устойчивость течений в гидроаэромеханике // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – №9. – С.106–111.
10. Богоявленский О.И. Автомодельные адиабатические движения самогравитирующего газа в звездах // Письма в ЖЭТФ. – Т 27. – В.2. – С. 91–94.
11. Aksenov A.G., Blinnikov S.I. A Newton iteration method for obtaining equilibria of rapidly rotating stars // Astronomy and Astrophysics. – 1994. – 290. – P.674-681.
12. Nachisu I. A versatile method for obtaining structures of rapidly rotating stars // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 1986. – 61. – P. 479–507.
13. Лихтенштейн Л. Фигуры равновесия вращающейся жидкости / Пер. с нем. – Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 252 с.
14. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 293 с.
15. Программный комплекс FlowVision. – Режим доступа: www.flowvision.ru
16. Куликов И.М. Численное моделирование самогравитирующего газового облака // Труды конференции молодых ученых ИВМиМГ. Новосибирск, 2006. С. 111-117.
17. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Куликов И.М. Операторный подход для численного моделирования гравитационных задач газовой динамики // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – № 3. – С. 27–35.
18. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Куликов И.М. Модификация метода крупных частиц для задач гравитационной газовой динамики // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – № 6. – С. 56–65.
19. Куликов И.М. Численное моделирование вращения газа в гравитационном поле / Труды XLIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». – Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2005. – С. 169–173.
20. Вшивков В.А., Лазарева Г.Г., Киреев С.Е., Куликов И.М. Параллельная реализация модели газовой компоненты самогравитирующего протопланетного диска на суперЭВМ // Вычислительные технологии. – 2007. – Т.12. – № 3. – С. 38–52.
21. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 608 с.
22. Toro E.F. A linearised Riemann Solver for the time dependent Euler equations of the dynamics // Proc. Roy Soc. London. – 1991. – Vol. A434. – P. 683–693.
23. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1992. – 424 с.
24. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1962. – 568 с.
25. Барская И.С., Мухин С.И., Четкин В.М. Математическое моделирование равновесных конфигураций самогравитирующего газа. – Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2006.
26. The OpenMP API specification for parallel programming. – Режим доступа: www.openmp.org
27. Лаборатория параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова. – Режим доступа: www.parallel.ru

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ КОРАБЕЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

А.В. Лочехин

Научный руководитель – д.т.н., профессор Г.И. Емельянецв

Цель работы заключается в изучении структуры построения, режимов функционирования, дискретных алгоритмов интеграции данных бескарданного инерциального измерительного модуля, приемной аппаратуры GPS и лага, моделей погрешностей ИСОН и их анализ.

Введение

Различные исследования последнего времени указывают на то, что основными факторами, определяющими состав и тактико-технические характеристики навигационного оборудования (НО) морских подвижных объектов (МПО) начала XXI века, будет ужесточение требований по точности, информационной автономности в условиях действия естественных и искусственных помех, стоимости, массогабаритным характеристикам и энергопотреблению, а также по уровню автоматизации рабочего места штурмана вследствие необходимости сокращения численности обслуживающего личного состава.

Определяющими требованиями к точности НО кораблей и морских судов различных классов являются нормы ИМО (англ. International Maritime Organization, ИМО) для открытого моря и требования национальной администрации для входов в порты, гавани и в акватории портов по точности определения координат места в интересах навигационной безопасности плавания:

- (а) в открытом море – $\Delta\varphi, \Delta\lambda \leq 4$ морских миль, $p=0,95$ (Резолюция ИМО А.529 от 17.11.1983 г.);
- (б) в прибрежной зоне (на удалении до 50 морских миль от берега) – $\Delta\varphi, \Delta\lambda \leq 4\%$ от расстояния до навигационной опасности, но не более 2 морских миль, $p=0,95$ (Резолюция ИМО А.529 от 17.11.1983 г.);
- (в) в стесненных водах и на подходах к портам – $\Delta\varphi, \Delta\lambda \leq 100$ метров, $p=0,95$;
- (г) в акватории порта – $\Delta\varphi, \Delta\lambda \leq 20$ метров, $p=0,95$.

Из эксплуатационных характеристик наибольшее значение для чувствительных элементов имеют надежность (среднее время наработки на отказ) и массогабаритные характеристики (МГХ), энергопотребление и стоимость. Как показывает анализ, лучшие образцы платформенных ИНС в настоящее время обладают средним временем наработки на отказ не более 3–5 тысяч часов. Для перспективных МПО обязательным является снижение МГХ и энергопотребления навигационного оборудования при ужесточении требований по надежности. Этим требованиям соответствует внедрение в НО МПО бесплатформенных инерциальных измерительных модулей (БИИМ).

Выполнение приведенных выше требований к точностным характеристикам инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) для перспективных МПО различного назначения является сложной проблемой, решение которой требует значительных финансовых и временных затрат. Поэтому, как показывает мировой опыт, решение данной проблемы принято искать на путях интеграции информации как платформенных, так и бесплатформенных (бескарданных) инерциальных измерительных модулей с приемной аппаратурой (ПА) спутниковой навигационной системой (СНС) ГЛОНАСС/GPS и корреляционно-экстремальными навигационными системами (КЭНС), т.е. прежде всего путем калибровки инерциальных ЧЭ после запуска БИИМ на интервалах времени возможного использования данных СНС ГЛОНАСС/GPS – на путях построения интегрированных систем навигации и ориентации (ИСОН).

ИСОИ на базе БИИМ, информационно интегрированных с ПА СНС GPS и ГЛОНАСС, КЭНС и ЭКНИС

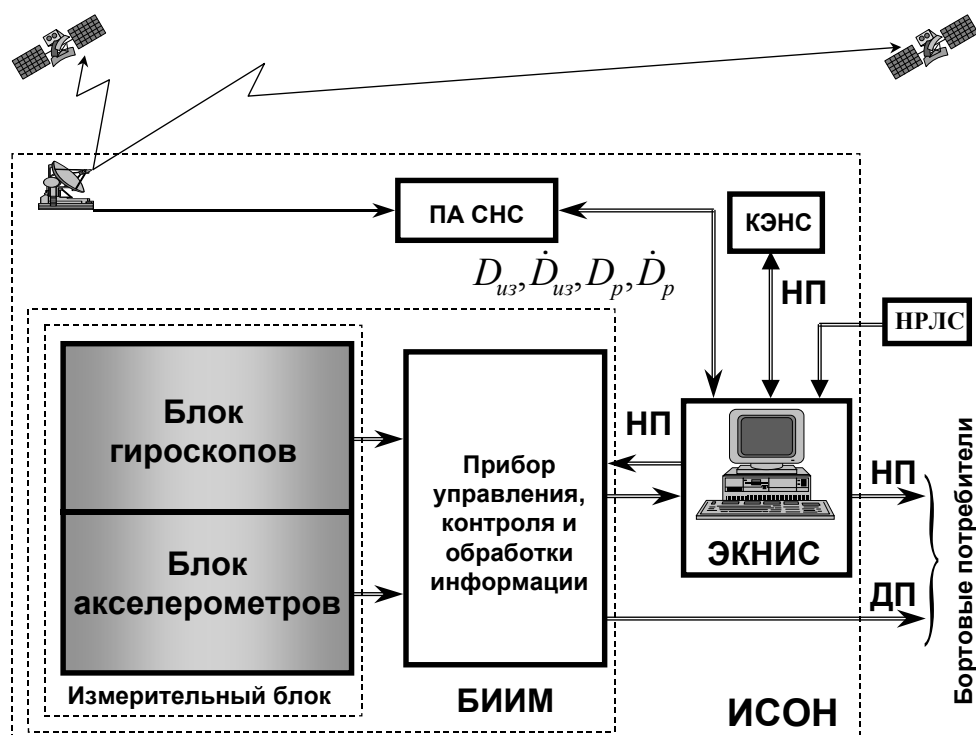


Рис. 1. Структурная схема ИСОИ для перспективных МПО

На рис.1 приведена структурная схема ИСОИ, где БИИМ – бескарданный инерциальный измерительный модуль; ПА СНС – приемная аппаратура спутниковой навигационной системы; КЭНС – корреляционно-экстремальная навигационная система; ЭКНИС – электронная картографическая навигационно-информационная система; НРЛС – навигационная радиолокационная система; ДП – динамические параметры; НП – навигационные параметры.

Наиболее вероятным представляется развитие ИСОИ в двух направлениях:

- 1) ИСОИ с опорой на данные СНС для работы в составе НО надводных кораблей в зонах устойчивого приема информации СНС ГЛОНАСС/GPS (обсервационный режим) и данные лага (автономный режим);
- 2) ИСОИ с опорой на данные КЭНС – в зонах отсутствия возможности приема информации СНС, а также при работе в составе НО подводных объектов (обсервационный режим) и данные лага (автономный режим).

Принципиальной особенностью ИСОИ является более глубокая интеграция данных инерциального модуля, ПА СНС и ЭКНИС по сравнению с обменом информацией для стандартного корабельного НО. В вычислителе комплексной обработки информации (фильтре Калмана СНС/БИИМ) обрабатываются измерения от СНС и БИИМ на уровне координат местоположения \vec{R} и линейной скорости \vec{V} объекта. При этом сохраняется избыточность и независимость выходов СНС и БИИМ. Кроме того, выходные данные БИИМ по координатам местоположения и линейной скорости объекта используются в ПА СНС (в схеме поиска и сбора исходных данных) для задания начальных прогнозируемых значений задержки кода и несущей частоты входного сигнала, давая возможность сократить время поиска и выделения полезного сигнала. Это обеспечивает для интегрированного выхода СНС/БИИМ повышение точности в выработке НП (относительно данных СНС из-за сглаживания их шумов) и параметров ориентации

(относительно данных БИИМ вследствие постоянной калибровки погрешностей их ЧЭ), а также устойчивости системы при «сбоях» в информации СНС.

Анализ современного состояния разработок в области гироскопических чувствительных элементов, приведенный в статье [1], позволяет схематично изобразить диапазон точностных характеристик различных типов современных гироскопов в виде, представленном на рис. 2.

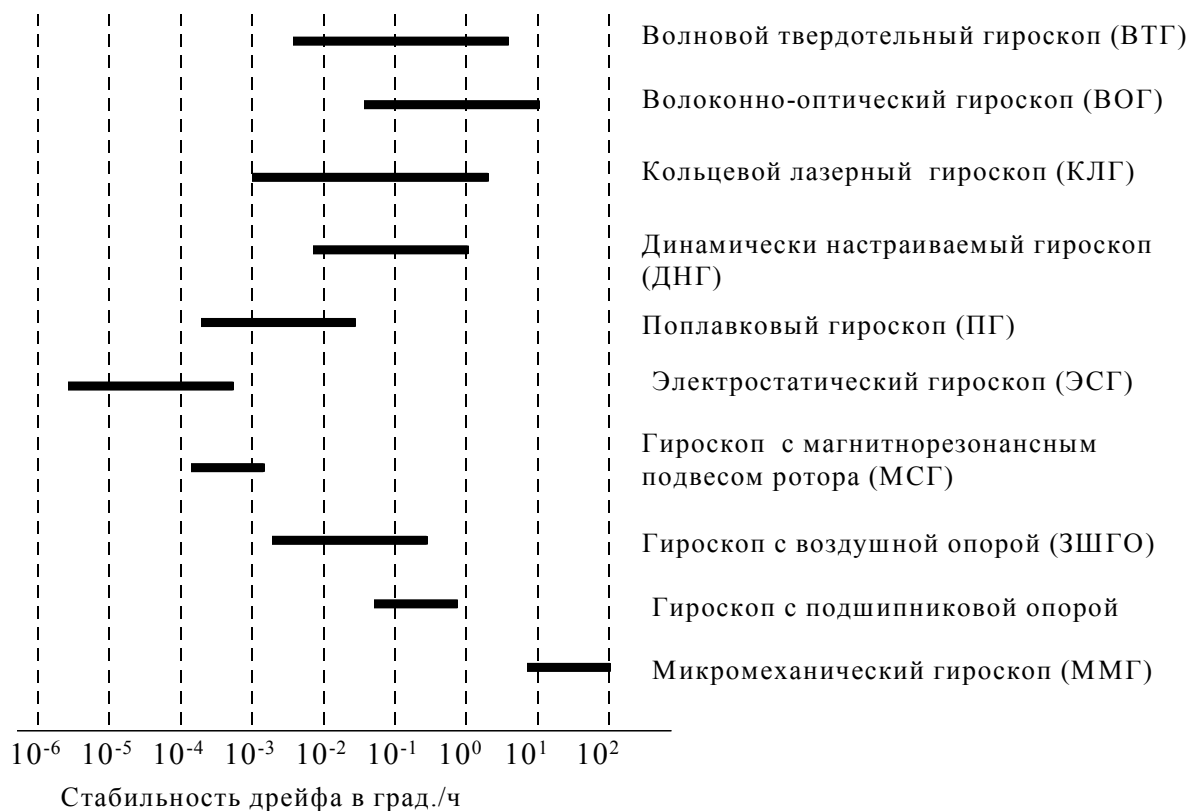


Рис. 2. Диапазон точностных характеристик различных типов гироскопов

По результатам анализа, проведенного (1995 г.) сотрудниками Лаборатории им. Ч. Дрейпера (США), современного состояния разработки гироскопов и акселерометров, а также перспективных областей их применения в будущем (2010 г.) можно определить следующие тенденции развития в мировой практике инерциальных измерительных модулей различного применения.

- (1) По элементной базе – переход от классических электромеханических типов гироскопов (ПГ, ДНГ и т.д.) к электростатическим, лазерным, волоконно-оптическим, микромеханическим и другим типам гироскопов, использующим новые физические принципы.
- (2) По структуре построения – переход от инерциальных измерительных модулей, содержащих гироплатформы, к бесплатформенным и бескарданным ИИМ, которые характеризуются, прежде всего, большей надежностью и меньшими массогабаритными характеристиками, энергопотреблением и стоимостью.

Режимы работы и используемые в них методы комплексной обработки информации

Режимы работы ИСОН определяются главным образом решаемой задачей и наличием ограничений на использование внешней по отношению к БИИМ информации.

Совместная обработка в ИСОН информации БИИМ, СНС, относительного лага и НРЛС позволяет осуществлять демпфирование или коррекцию колебательных состав-

ляющих и ограничивать уровень растущих во времени погрешностей БИИМ, а также производить калибровку инструментальных погрешностей его чувствительных элементов. Это определяет следующие режимы работы ИСОН:

- (а) режим начальной выставки (и калибровки);
- (б) обсервационный режим;
- (в) автономный режим;
- (г) режим взаимодействия с бортовыми потребителями.

В настоящее время для совместной обработки в реальном масштабе времени информации навигационных измерителей широкое применение получили методы оптимальной фильтрации, что обусловлено случайным характером как внешних воздействий (случайные качка и рыскание, флюктуации морских течений и т.п.), так и инструментальных погрешностей навигационных измерителей. Постановка задачи оптимальной фильтрации состоит в том, что на основании формируемых измерений (например, разности выходных данных различных навигационных измерителей) и априорных статистических моделей погрешностей навигационных измерителей требуется найти алгоритм, позволяющий построить или найти наилучшую (оптимальную в смысле некоторого критерия) оценку погрешностей НП. Поскольку от интегрированных систем требуется прежде всего высокая точность выработки навигационных и кинематических параметров движения, то в качестве критерия оптимальности целесообразно использовать минимум дисперсии ошибки оценки вырабатываемого параметра. Подчеркнем, что такой критерий оптимальности использует статистическую оптимизацию интегрированной системы, т.е. нахождение оптимальной системы «в среднем» на множестве реализаций измеряемого процесса в заданных условиях, хотя для каждой отдельной реализации в оптимальной системе не всегда выполняется требование экстремума выбранного критерия (минимума дисперсии ошибки). Найденный из решения этой задачи алгоритм преобразования измерений может быть реализован в ЦВМ в виде некоторой динамической системы или оптимального фильтра.

На практике широкое распространение в ИСОН получили методы обработки навигационной информации на базе алгоритмов калмановского типа, которые используют процедуры линеаризации, как навигационных измерений, так и моделей погрешностей измерителей, входящих в состав ИСОН.

Алгоритм построения модели ИСОН

- (а) Формирование измерений.
- (б) Описание вектора состояния, матрицы динамики системы и матрицы измерений.
- (в) Ковариационный канал фильтра Калмана (ФК).
- (г) Оценочный канал.
- (д) Формирование обратных связей.

Схоластическая задача математического обеспечения ИСОН по интеграции данных БИИМ на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ), стандартной и мультиантенной ПА GPS и лага с использованием ФК

Измерения

Скоростные измерения по GPS

$$z_{V_{GPS}}(t_{k+1}) = (prS_E^u - prS_E^c) / Tz, \quad z_{V_{GPS}}(t_{k+1}) = (prS_N^u - prS_N^c) / Tz, \quad (1)$$

где $prS_i^u(t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} V_i^u(\tau) d\tau, (i = E, N)$ – приращения декартовых координат МПО в проекциях на географические оси, вырабатываемые по данным $V_i^u (i = E, N)$ БИИМ о составляющих вектора линейной скорости на интервале $Tz = \Delta t_{изм} = t_k - t_{k-1}$ измерений приращений $prS_i^c = V_{GPS} \cdot \Delta t_{изм}, (i = E, N)$ декартовых координат в доплеровском канале ПА СНС, пересчитанных от точки размещения приемной антенны $prS_i^{cA} (i = E, N)$ СНС к месту установки измерительного блока (ИБ) БИИМ.

$$\begin{bmatrix} prS_E^c \\ prS_N^c \\ prS_h^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} prS_E^{cA} \\ prS_N^{cA} \\ prS_h^{cA} \end{bmatrix} - dC_{oh}(K, \psi, \theta) \cdot \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix},$$

где $dC_h^o(K, \psi, \theta)$ – приращение матрицы ориентации МПО за время $\Delta t_{изм.} = t_k - t_{k-1}$, $R_i (i = x, y, z)$ – отстояние приемной антенны СНС от ИБ БИИМ).

Соотношения (1) могут быть приведены к виду

$$\begin{aligned} z_{V_E^{GPS}}(t_{k+1}) &= \Delta V_E(t_k + Tz/2) - \delta[\nabla S_E^c(t_{k+1})]/Tz = \Delta V_E(t_{k+1}) - v_{V_E}(t_{k+1}), \\ z_{V_N^{GPS}}(t_{k+1}) &= \Delta V_N(t_k + Tz/2) - \delta[\nabla S_N^c(t_{k+1})]/Tz = \Delta V_N(t_{k+1}) - v_{V_N}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\delta[\nabla S_i^c(t_{k+1})]/Tz, i = E, N$ – погрешности доплеровского канала ПА GPS/ГЛОНАСС – дискретные белые шумы с дисперсиями $\sigma_{V_E^{GPS}}^2, \sigma_{V_N^{GPS}}^2$ на частоте 1Гц, $\sigma_{V_E^{GPS}} = \sigma_{V_N^{GPS}} = 0,2\text{м/с}$; $v_{V_i}(t_{k+1}) = [\Delta V_i(t_{k+1}) - \Delta V_i(t_k + Tz/2)] + \delta[\nabla S_i^c(t_{k+1})]/Tz$ – реальные шумы скоростных измерений.

Позиционные измерения

$$\begin{aligned} z_\varphi(t_{k+1}) &= \varphi^u(t_{k+1}) - \varphi^c(t_{k+1}) = \Delta\varphi(t_{k+1}) + v_\varphi(t_{k+1}), \\ z_\lambda(t_{k+1}) &= \lambda^u(t_{k+1}) - \lambda^c(t_{k+1}) = \Delta\lambda(t_{k+1}) + v_\lambda(t_{k+1}), \\ z_h(t_{k+1}) &= h^u(t_{k+1}) - h^c(t_{k+1}) = \Delta h(t_{k+1}) + v_h(t_{k+1}). \end{aligned} \quad (3)$$

Курсовое измерение

$$z_K(t_{k+1}) = K^u(t_{k+1}) - K^c(t_{k+1}) \cong \alpha(t_{k+1}) + v_K(t_{k+1}), \quad (4)$$

Скоростные измерения по лагу

$$\begin{aligned} z_{V_E^L}(t_{k+1}) &= V_E^u(t_{k+1}) - V_E^c(t_{k+1}) \sin K = \Delta V_E(t_{k+1}) - V_N \alpha + V_{TE}(t_{k+1}) - v_{V_E}(t_{k+1}), \\ z_{V_N^L}(t_{k+1}) &= V_N^u(t_{k+1}) - V_N^c(t_{k+1}) \cos K = \Delta V_N(t_{k+1}) + V_E \alpha + V_{TN}(t_{k+1}) - v_{V_N}(t_{k+1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где V_{TE}, V_{TN} – восточная и северная составляющие морских течений как основная методическая погрешность относительных лагов.

$$\delta V_j = \delta V_j^{(1)} + \delta V_j^{(2)}, \quad j = E, N, \quad (6)$$

где

$$\delta \dot{V}_j^{(1)} = -\mu_1 \delta V_j^{(1)} + \sqrt{2\sigma_1^2 \mu_1} \cdot \xi(t), \quad \delta \dot{V}_j^{(2)} = -\mu_2 \delta V_j^{(2)} + \sqrt{2\sigma_2^2 \mu_2} \cdot \xi(t), \quad (7)$$

$\sigma_1 = 0,1 - 0,4$ уз, $\sigma_2 = 0,23$ уз, $\mu_1 = \left[0,1 + \sqrt[3]{|V/10|^2}\right] \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = [0,2|V/10|] \text{ ч}^{-1}$, V – линейная скорость объекта в узлах, $\xi(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности; v_{ij} – шумы измерений, включающие неизмеряемую лагом поперечную составляющую вектора скорости корабля и инструментальные погрешности лага и аппроксимированные белыми шумами с дисперсией $(\sigma_{Li}^\Phi)^2 = (0,2 \text{ м/с})^2$ на частоте 1 Гц.

Для построения расчетной модели погрешностей ИСОН восточную и северную составляющие морских течений аппроксимируем марковскими процессами первого порядка с интервалом корреляции $1/\mu$ порядка 5400 с и $\sigma_{Ti} = 0,2 \dots 0,3$ м/с ($i = E, N$).

Расчетная модель погрешностей ИСОН

Модель погрешностей ВОГ

Модель дрейфов ВОГ может быть аппроксимирована в виде суммы нескольких составляющих:

- (а) погрешности калибровки начального смещения «нуля» и его нестабильности в пуске, т.е. погрешности, практически постоянной на достаточно длительном интервале времени, которую, вследствие отсутствия данных о спектре ее изменчивости, целесообразно описывать винеровским процессом при соответствующих начальных условиях;
- (б) погрешности масштабного коэффициента, которая определяет составляющую, пропорциональную измеряемой величине;
- (в) погрешности знания румбовых дрейфов ВОГ, которая обусловлена влиянием внешнего магнитного поля и могут быть представлены в виде первой гармоники от угла поворота ИБ;
- (г) составляющей, обусловленной неортогональностями осей измерительного блока ВОГ;
- (д) «шумовой» составляющей, характеризующей флуктуационные погрешности гироскопов

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{bi} &= \Delta\bar{\omega}_{bi} + \Delta\tilde{\omega}_{bi} + \Delta\omega_{bi}^R + \Delta\omega_{Nbi} + \Delta\omega_{bi}^\Phi, \quad i = x, y, z, \\ \Delta\dot{\bar{\omega}}_{bi} &= \sqrt{Q_{gi}} \cdot \xi(t), \quad \Delta\bar{\omega}_{bi}(t_0), \\ \Delta\tilde{\omega}_{bi} &= \omega_{bi} \Delta M_{gi}, \quad \Delta\dot{M}_{gi} = \sqrt{Q_{Mgi}} \cdot \xi(t), \quad \Delta M_{gi}(t_0), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta\bar{\omega}_{Nb} = \begin{bmatrix} 0 & G_{xz} & -G_{xy} \\ -G_{yz} & 0 & G_{yx} \\ G_{zy} & -G_{zx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{xb} \\ \omega_{yb} \\ \omega_{zb} \end{bmatrix},$$

где $\Delta\bar{\omega}_{bi}$ – квазисистематическая составляющая с начальным уровнем $\Delta\bar{\omega}_{bi}(t_0)$, характеризуемым погрешностью калибровки смещения «нуля» ВОГ от пуска к пуску, и интенсивностью Q_{gi} , обусловленной нестабильностью смещения «нуля» в пуске из-за температурных деформаций гироскопа; ΔM_{gi} – погрешность масштабного коэффициента гироскопа, а ω_{bi} – измеряемая им угловая скорость; $\Delta\omega_{Nbi}$ – составляющие, обусловленные неортогональностями G_{ij} (аппроксимированными соответствующими винеровскими процессами) осей измерительного блока ВОГ; $\Delta\omega_{bi}^\Phi$ – «белозумная» составляющая с интенсивностью Q_{gi}^Φ ; $\xi(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности; $\Delta\omega_i^R$ ($i = xb, yb$) – румбовые дрейфы ВОГ, обусловленные в основном влиянием на гироскопы внешнего аномального магнитного поля.

Модель погрешностей линейных акселерометров

Модель погрешностей линейных акселерометров, как правило, имеет следующие составляющие:

- (а) погрешность калибровки начального смещения «нуля» и его нестабильность в пуске, практически постоянную на достаточно длительном интервале, которая может описываться либо случайной постоянной величиной либо интегралом от белого шума;
- (б) погрешность масштабного коэффициента, которая определяет составляющую, пропорциональную измеряемой величине;
- (в) составляющую, обусловленную неортогональностями осей измерительного блока акселерометров;
- (г) шумовую составляющую, характеризующую флуктуационные погрешности датчиков.

С учетом этого инструментальные погрешности линейных акселерометров могут быть описаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta a_i &= \bar{\delta} a_i + \tilde{\delta} a_i + \delta a_{Ni} + \delta a_i^\Phi, i = x_b, y_b, z_b \\ \dot{\bar{\delta}} a_i &= \sqrt{Q_A} \cdot \xi(t), \bar{\delta} a_i(t_0) \\ \tilde{\delta} a_i &= n_{bi} \cdot \Delta M_{ai}, \Delta \dot{M}_{ai} = \sqrt{Q_{Mai}} \cdot \xi(t), \Delta M_{ai}(t_0) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\delta a_{Nb} = \begin{bmatrix} 0 & A_{xz} & -A_{xy} \\ -A_{yz} & 0 & A_{yx} \\ A_{zy} & -A_{zx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{xb} \\ n_{yb} \\ n_{zb} \end{bmatrix},$$

где $\Delta \bar{a}_{bi}$ – погрешность калибровки начального смещения «нуля» и его нестабильность в пуске; Q_A – интенсивность изменения квазисистематической составляющей; ΔM_{ai} – погрешность масштабного коэффициента акселерометра; δa_{Ni} – составляющие, обусловленные неортогональностями A_{ij} осей измерительного блока акселерометров; бел шумовая составляющая погрешности, характеризуемая среднеквадратическим отклонением σ_{ai}^Φ на частоте обработки данных; n_{bi} – измеряемое акселерометрами кажущееся ускорение в осях измерительного блока x_b, y_b, z_b ; $\xi(t)$ – «белый» шум единичной интенсивности.

Решение задачи

Решение поставленной задачи проводилось при следующих исходных данных.

- (а) Файлы записи результатов стендовых испытаний интегрированной системы «Мининавигация-К» в нормальных климатических условиях и после прогрева прибора содержали данные (съем данных на частоте 1 кГц, интегрирование по Эйлера на частоте 50 Гц) показаний ВОГ VG 951, акселерометров АК-10/4 и датчика угла поворота ИБ. ИБ (связанный с ним трехгранник – x_b, y_b, z_b) БИИМ совершал вокруг оси z_b , ортогональной палубе, реверсные повороты $\pm 360^\circ$ (1 оборот – 5 мин) с постоянной скоростью и ступенчатым изменением ее знака. Файлы были записаны на разных румбах от 0° до 360° через 60° , каждый продолжительностью около 6 ч.
- (б) Файлы записи результатов мореходных испытаний интегрированной системы «Мининавигация-К» с интенсивным маневрированием содержали, кроме данных ИБ (съем данных на частоте 1 кГц, интегрирование по Эйлера на частоте 100 Гц), данные стандартной и мультиантенной (МРК-11, НИИ радиотехники, г. Красноярск) ПА GPS/ГЛОНАСС. ИБ БИИМ совершал вокруг оси z_b постоянное вращение (1 оборот – 1 мин).

(в) Математическое обеспечение БИИМ и ИСОН разработано в MATLAB (Simulink). К особенностям решения на частоте 50 Гц или 100 Гц (шаг дискретности dT) задачи ориентации ИБ БИИМ следует отнести формирование первых интегралов от данных ВОГ и акселерометров на рабочей частоте, вычисление в качестве промежуточного кинематического параметра вектора Эйлера, используя дискретный алгоритм 4-го порядка, затем кватерниона на основе параметров Родрига-Гамильтона и матрицы направляющих косинусов.

Предусмотрен режим калибровки на стенде или объекте с привлечением скоростных, позиционных и курсовых измерений, наблюдательный режим работы ИСОН со стандартной ПА GPS или мультиантенной типа МРК-11 и автономный режим работы с относительным лагом.

(г) Для совместной обработки измерений БИИМ, GPS и лага использовался дискретный алгоритм фильтра Калмана (ФК) 24-го порядка с обратной связью по всему вектору состояния на каждом шаге измерений. Дискретность измерений – 1 с. При этом считалось, что режим грубой выставки БИИМ завершен, т.е. взаимная ориентация сопровождающего географического трехгранника ENH и трехгранника xuz , который является его приборным аналогом, определяется вектором $\vec{\Lambda}_\gamma = [\beta \ \gamma \ \alpha]^T$ малого угла, где угол α характеризует разворот трехгранника xuz вокруг вертикали места, а углы β, γ характеризуют погрешности построения вертикали места соответственно в плоскости меридиана места и в плоскости первого вертикала. В этом случае погрешности БИИМ могут быть описаны линеаризованной моделью.

При формировании расчетной модели погрешностей ИСОН использовались следующие аппроксимации:

(а) смещения нулей гироскопов $\Delta\bar{\omega}_i$ ($i = xb, yb, zb$) и акселерометров $\Delta\bar{a}_i$, изменения систематических составляющих погрешностей масштабных коэффициентов ΔM_{gi} ВОГ от запуска к запуску и их изменчивость в пуске были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;

(б) погрешности знания румбовых дрейфов ВОГ $\Delta\omega_i^R$ ($i = xb, yb$) были представлены в виде первой гармоники от угла поворота ИБ

$$\Delta\omega_{xb}^R = \Delta RA_x \cos q + \Delta RB_x \sin q, \quad \Delta\omega_{yb}^R = \Delta RA_y \cos q + \Delta RB_y \sin q, \quad (10)$$

где для условий стенда $q = K - \rho$ (для корабельных условий: $q = \rho$); $\Delta RA_i, \Delta RB_i$ – искомые коэффициенты разложения, аппроксимированные соответствующими винеровскими процессами ($i = x, y$); здесь K – курс, ρ – угол поворота ИБ относительно корпуса БИИМ.

Результат

Результаты стендовых и мореходных испытаний БИИМ по оценке румбовых дрейфов приведены на рис. 3, 4.

Румбовые дрейфы ИБ на ВОГ БИИМ «Мининавигация-К», обусловленные влиянием внешнего магнитного поля в условиях эксплуатации, находились в пределах 0.04–0.05°/ч., что приводило к погрешности по курсу в пределах 30 угл. мин. В корабельных условиях из-за наличия аномального магнитного поля корабля требуется постоянное уточнение румбовых дрейфов. При отсутствии курсовых измерений возможно использование специального маневрирования корабля по курсу для обеспечения наблюдаемости и оценки румбовых дрейфов ВОГ с опорой на данные стандартной аппаратуры GPS/ГЛОНАСС. Однако данное решение не всегда возможно, и точность такого решения имеет ограничение.

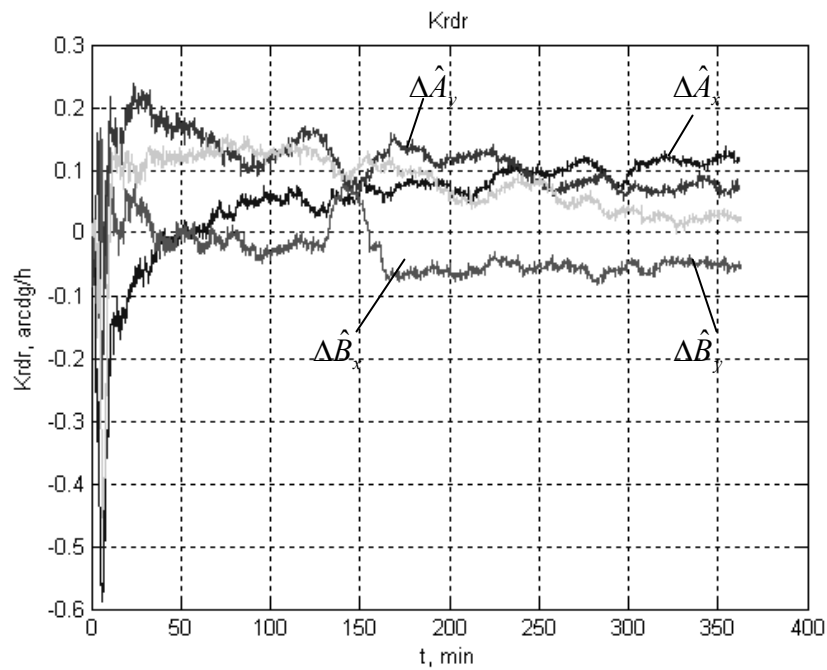


Рис. 3. Оценки коэффициентов румбовых дрейфов при калибровке ИСОН на стенде

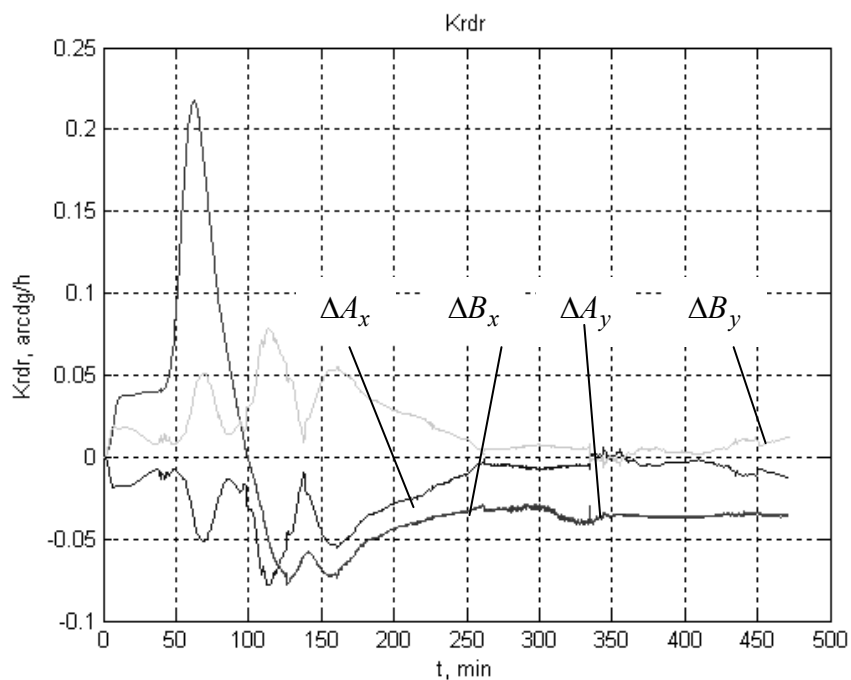


Рис. 4. Оценки коэффициентов румбовых дрейфов при мореходных испытаниях

Заключение

Одной из проблем на пути создания ИСОН для МПО на базе БИИМ низкого уровня точности (нестабильность дрейфов гироскопов которых имеет порядок град./ч) является проблема выполнения требований ИМО по точности выработки курса. Эта проблема может быть частично решена при использовании данных относительного лага в автономном режиме работы корабельной ИСОН. БИИМ на ВОГ низкой точности с модуляционными реверсными поворотами измерительного блока может обеспечить удержание погрешностей системы по курсу в пределах $1,0^{\circ}$ – $1,5^{\circ}$ в широтах до 60° . При

этом имеет место устойчивый характер погрешностей в выработке параметров ориентации объекта.

Определяющим моментом для достижения требуемого уровня погрешностей выработки курса является точность калибровки (лучше $0,1^\circ/\text{ч}$) «румбовых» дрейфов измерительного блока БИИМ при работе ИСОН в обсервационном режиме, который может обеспечиваться применением либо мультиантенной ПА GPS/ГЛОНАСС (при решении, в частности, проблемы привязки и контроля отсчетных баз по курсу между ПА GPS/ГЛОНАСС и БИИМ) либо стандартной ПА GPS/ГЛОНАСС в динамических условиях движения корабля. «Румбовые» дрейфы являются также наблюдаемыми при работе ИСОН в автономном режиме при использовании данных относительного лага в условиях рыскания объекта.

Калибровка дрейфов ВОГ и погрешностей их масштабных коэффициентов обеспечивается в системе при использовании модуляционных реверсных поворотов измерительного блока БИИМ по данным как ПА GPS/ГЛОНАСС, так и относительного лага. При этом точность калибровки масштабных коэффициентов ВОГ существенно повышается в условиях качки и рыскания объекта.

Для решения проблемы точности выработки курса возможны другие схемы интеграции, для исследования которых так же необходимо построение модели ИСОН с алгоритмом интеграции данных и модели погрешностей.

Литература

1. Пешехонов В.Г. Гироскопы начала XXI века // Гироскопия и навигация. – 2003. – № 4 (43).
2. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. (под общ. ред. акад. РАН В.Г.Пешехонова). Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. – СПб, 2004.
3. Емельянец Г.И., Курятов В.Н., Несенюк Л.П. и др. Морская БИНС на основе измерительного модуля на лазерных гироскопах КМ-11 / Доклад на Symposium Gyro Technology 2002, Stuttgart, Germany.
4. Емельянец Г.И., Старосельцев Л.П., Игнатьев С.В., Саунонен А.Г. О румбовых дрейфах бескарданного инерциального модуля на ВОГ // Гироскопия и навигация. – 2005. – Т. 48. – №1. – С. 22–29.
5. Емельянец Г.И., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г. Об уточнении модели дрейфов электростатических гироскопов бескарданной инерциальной системы ориентации и методике их калибровки на стенде и в условиях орбитального космического аппарата / Доклад на конф. им. Острякова в ЦНИИ «Электроприбор», 2006).

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОИСКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ БИЗНЕС-ПАРТНЕРОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

**А.В. Маслобоев (Кольский филиал Петрозаводского государственного университета)
Научный руководитель – д.т.н., профессор В.А. Путилов
(Кольский филиал Петрозаводского государственного университета)**

Сформулирована проблема информационной поддержки инновационной деятельности в регионе. Разработана формализованная концептуальная модель агентно-ориентированной виртуальной бизнес-среды развития инноваций. Представлены архитектура, логика функционирования и опыт программной реализации распределенной мультиагентной системы поиска потенциальных бизнес-партнеров в виртуальной среде, представляющей собой комплекс программных агентов, функционирующих в сети Интернет.

Введение

Актуальными проблемами на сегодняшний день являются формирование организационно-экономических механизмов поддержки и стимулирования инновационной деятельности, обеспечение интеграции науки, образования, промышленности и агропромышленного комплекса. В настоящее время важным фактором экономического развития становится активность инновационного бизнеса. В новом тысячелетии только страны, восприимчивые к инновациям, смогут выстоять в конкурентной борьбе на глобальном рынке товаров и услуг. Поэтому переход к инновационной экономике очень актуален для России, имеющей пока большой уклон в сырьевые отрасли.

Информационная поддержка инноваций является сложной и очень динамичной задачей со многими параметрами. В подобных условиях не приходится рассчитывать на полную автоматизацию процесса принятия управленческих решений, однако этот процесс может быть существенно поддержан наличием адекватных задаче информационных массивов, а также формализованными математическими моделями и компьютеризированными системами имитационного моделирования инновационных процессов, образующими в комплексе систему информационной поддержки инновационной деятельности, направленную на обеспечение автоматизированного поиска потенциальных бизнес-партнеров, формирование эффективных бизнес-коалиций, анализа и прогнозирования результатов от капиталовложений в инновации с учетом динамически изменяющейся конъюнктуры рынка инновационных услуг.

Все возрастающее количество и территориальная распределенность субъектов инновационной деятельности обуславливают тот факт, что лишь малая часть потенциально эффективных инновационных проектов воплощается на практике. Особенности инновационных рынков выдвигают новые требования к качеству и оперативности принятия управленческих решений, оказывающих влияние на процесс развития социально-экономических систем. Удовлетворение этим требованиям невозможно без адекватного информационного обеспечения инновационных процессов в этих системах.

В работе формулируется проблема информационной поддержки инновационной деятельности. Приводится описание практической реализации распределенной мультиагентной системы поиска потенциальных бизнес-партнеров в виртуальной среде, представляющей собой комплекс программных агентов, функционирующих в сети Интернет.

Специфика задачи информационного обеспечения инноваций

Региональные инновационные процессы специфичны в силу ряда причин [1]:

- большой объем разнородной информации, ассоциированной с инновационными процессами;

- большая территориальная распределенность компонентов инновационных структур;
- динамика структуры инновационного поля – появляются и исчезают новые участники региональных инновационных процессов;
- организационная неоднородность элементов инновационного поля, существенным образом ограничивающая применимость методов и технологий, апробированных и хорошо себя зарекомендовавших в корпоративных информационных системах;
- влияние факторов времени, неопределенности и риска (предполагаемые сроки решения с учетом возможных изменений внешней среды).

В инновационных процессах, кроме субъектов инноваций, задействованы три группы элементов: ресурсы инноваций – организационные, административные, финансовые, информационные; инфраструктура инноваций, обеспечивающая условия для успешной реализации инновационной деятельности; и инновационный менеджмент, реализующий инновационные проекты. В соответствии с этим задача информационного обеспечения инноваций имеет несколько аспектов [2]:

- создание собственно информационных ресурсов инноваций – баз данных и прочих ресурсов, имеющих отношение к инновационной деятельности;
- создание средств информационной поддержки инновационного менеджмента, прежде всего – средств поддержки принятия решений на базе моделирования инновационных процессов;
- создание информационной инфраструктуры инновационной деятельности, обеспечивающей формирование проблемно-ориентированных групп информационных ресурсов, предназначенных для поддержки отдельно взятой инновационной структуры в рамках реализации инновационного проекта.

Под информационной поддержкой инноваций понимается последний из перечисленных аспектов, т.е. создание средств проблемно-ориентированной интеграции информационных ресурсов инноваций. В этой связи возникают два вопроса: «что интегрировать» и «как интегрировать». Собирать в единое информационное хранилище всевозможные существующие информационные ресурсы, связанные с инновационной деятельностью, неэффективно из-за их большого объема и внутренней динамики. Поэтому необходимы два вида средств:

- 1) для «вычленения» из общей информационной массы лишь тех ресурсов, которые действительно необходимы для обеспечения работы данной инновационной структуры;
- 2) для интеграции этих ресурсов в логически единую взаимосвязанную группу.

Эти средства призваны обеспечить специализированные системы информационной поддержки инноваций. Эти системы должны также обеспечивать автоматизированный поиск потенциальных бизнес-партнеров, формирование бизнес-структур, автоматизированное построение бизнес-планов инновационных проектов, прогнозирование капиталовложений в инновации, совместное использование информационных баз по инновационной тематике. Сегодня существует достаточно большое количество подобных систем. Большинство из них реализовано в виде Интернет-порталов, представляющих собой образец информационных систем с централизованной архитектурой. Ее недостатки в контексте информационного обеспечения инноваций обусловлены, с одной стороны, технологическими принципами реализации централизованных архитектур, а с другой – особенностями инновационных процессов, описанные выше.

Таким образом, в условиях централизованной архитектуры возможности фактической интеграции информационных ресурсов ограничены из-за их большого количества и, соответственно, большого объема образующих информационных ресурсов данных. Также к недостаткам централизованной архитектуры, описанным в [3], в данном случае следует отнести инерционность информационной системы в реакции на изменения со-

става и контента информационных ресурсов. Изменения, появившиеся в ресурсе, отражаются в его образе на портале, как минимум, с задержкой, а могут и вообще не отражаться; в централизованном хранилище возможно появление данных, утративших актуальность, и т.д.

Технологии создания систем информационной поддержки инновационного бизнеса

Разнородность и территориальная распределенность участвующих в инновационном процессе субъектов, вкупе с динамикой их состава и параметров, создает предпосылки для того, чтобы информационная среда развития инноваций была открытой и децентрализованной. В такой ситуации, в общем случае, уже не всегда применимы архитектуры и технологии корпоративных информационных систем, ориентированные на централизованное администрирование, хранение и обработку данных. Альтернативой им являются одноранговые или пиринговые (от англ. peer-to-peer – «равный к равному») архитектуры, для которых характерны свойства открытости и расширяемости, а также потенциал самоорганизации [3].

Для повышения эффективности функционирования в децентрализованной информационной среде поддержки инноваций необходимо, с одной стороны, обеспечить качественные высокоскоростные коммуникации, а с другой – организовать адресный информационный обмен, т.е. обеспечить получение той или иной информации только заинтересованными в ней субъектами. Это позволит снизить общий объем циркулирующей в распределенной среде информации и, следовательно, уменьшить нагрузку на реализующие ее программно-технические элементы.

Поиск потенциальных бизнес-партнеров для реализации инновационного проекта, по существу, заключается в переборе имеющихся инновационных предложений и выборе среди них подходящих по заданным критериям. Эффективной технологией автоматизации поиска в распределенной информационной среде развития инноваций является технология мобильных программных агентов [4]. Технологией мультиагентных систем – это новая парадигма информационной технологии, ориентированной на совместное использование научных и технических достижений и преимуществ, которые дают идеи и методы искусственного интеллекта, современные локальные и глобальные компьютерные сети, распределенные базы данных и распределенные вычисления, аппаратные и программные средства поддержки теории распределенности и открытости [5].

Однажды инициированные мобильные агенты обеспечивают для их владельца поиск интересующих его предложений, перемещаясь в распределенной среде от узла к узлу. При большом количестве предложений их полный перебор сопряжен с необходимостью рассмотрения слишком большого количества альтернатив, поэтому также актуальной в данном контексте является задача сужения области поиска. Одним из вариантов ее решения является организация программных агентов и информационных ресурсов в «группы по интересам» с помощью технологий самоорганизующихся пиринговых систем [6].

Концептуальная модель агентно-ориентированной виртуальной бизнес-среды

Разработанная концептуальная модель виртуальной бизнес-среды (КМ ВБС), детально описанная в [7], имеет иерархическую структуру и включает в себя следующие множества элементов: объекты (субъекты инновационной деятельности) S ; агенты субъектов A , из которых формируются проблемно-ориентированные инновационные структуры BS (множества взаимосвязанных объектов, задействованных в реализации конкретного бизнес-плана); бизнес-процессы P , $R = \{BI, BPL\}$ – ресурсы инноваций, к которым относятся бизнес-идеи (инновационные предложения) BI и бизнес-планы (инве-

стиционные предложения) *BPL*. Инновационные предложения, фигурирующие в системе, разделены на два класса – генерализованные бизнес-идеи и детализированные бизнес-идеи. Такое деление обеспечивает возможность формирования в ВБС виртуальных бизнес-площадок, объединяющих субъектов инноваций с близкими интересами и целями, вероятность взаимодействия между которыми высока. Это, в свою очередь, ведет к повышению эффективности взаимодействия между агентами и снижению нагрузки на сеть. Объекты КМ ВБС, представляющие субъектов инноваций, образуют иерархию, что позволяет учитывать при поиске бизнес-партнеров и формировании инновационных структур организационную подчиненность субъектов инновационной деятельности.

Схема концептуальной модели виртуальной бизнес-среды имеет вид

$$E_{ВБС} = \{S, P, I, A, R, Atr\}.$$

Агенты $A = \{S, BI, ORG^A, C^A\}$ представляют в ВБС интересы участников бизнес-процессов и характеризуются множеством инновационных предложений *BI*, которые они представляют в ВБС, множеством базовых организационных структур ORG^A , соответствующих конкретным функциям (ролям) агентов, и внутренней структурой C^A , описывающей функциональное устройство агента.

В терминах КМ бизнес-структуры $BS = \{A, BI^{GEN}, BPL^{COM}\}$ представляют собой связанные фрагменты, удовлетворяющие определенным условиям. Коалиции агентов объединяются одной общей целью или целями для реализации соответствующих бизнес-идей. Для бизнес-структуры задаются множество входящих в нее агентов *A*, множество генеральных идей BI^{GEN} , объединяющих фрагменты в бизнес-структуры, и множество бизнес-планов BPL^{COM} , на основании которых реализуются бизнес-идеи. Бизнес-структуры формируются на основе анализа отношений между компонентами КМ, выполняющей функцию онтологии инновационной деятельности.

Бизнес-идеи $BI = \{KD, AD\}$ описываются множествами ключевых *KD* и второстепенных *AD* параметров и используются при автоматическом формировании коалиций агентов. Это делается для того, чтобы сократить информационный обмен между агентами, интересы которых существенно разнятся и, напротив, упростить и активизировать интеракции между агентами внутри группы. В число параметров входят как жестко типизированные, описываемые в терминах общесистемного тезауруса, так и параметры, описываемые на естественном языке. Формирование коалиций производится на основании семантического сопоставления соответствующих параметров бизнес-идей.

Бизнес план (БП) $BPL = \{GP, IP, RP\}$ представляет собой набор количественных параметров (*GP* – множество параметров, описывающих информационную составляющую БП, *IP* – множество параметров, описывающих инвестиционную составляющую БП, *RP* – множество параметров, описывающих ресурсную составляющую БП), детализирующих инновационное предложение: временные рамки реализации, планируемый объем производства, объем требуемых инвестиций, прогнозируемый срок окупаемости и др.

Модель атрибутов объектов в КМ ВБС образуется кортежем:

$$Atr = \{T, NM, T_h\},$$

где $T = \{T_S, T_A, T_P, T_{BI}, T_{BPL}, T_R, T_{BS}\}$, $NM = \{NM_S, NM_A, NM_P, NM_{BI}, NM_{BPL}, NM_R, NM_{BS}\}$ – множества типов и имен объектов, агентов, процессов, ресурсов, бизнес-идей, бизнес-планов и бизнес-структур КМ ВБС соответственно; T_h – множество типов отношений иерархии объектов.

Логика работы системы и ее функциональная структура описываются с помощью КМ ВБС, представляющей собой формализованное описание объектов системы, их связей и атрибутов в виде теоретико-множественных отношений. Формализация представления инновационной деятельности в концептуальной модели обеспечивает возможность автоматизированного анализа структуры и свойств предметной области, а также формирования в терминах КМ алгоритмов поиска и оценки надежности потенциальных бизнес-партнеров; алгоритмов формирования бизнес-структур; унифицированного описания алгоритмов функционирования агентов; спецификаций исполнительных среды для реализации моделирования имитации инновационной деятельности.

Архитектура и логика функционирования системы

В отличие от существующих систем информационной поддержки инноваций, разработанная система [8] имеет открытую децентрализованную архитектуру, показанную на рис. 1 и рис. 2, которая обеспечивает асинхронный характер взаимодействия и коммуникации агентов, что дает возможность их работы в условиях разнородных и ненадежных коммуникаций, что весьма актуально для систем регионального масштаба. Децентрализованный тип архитектуры системы повышает ее отказоустойчивость, делает ее легко масштабируемой и интероперабельной, а также позволяет организовать наиболее эффективный поиск потенциальных партнеров и информации об их бизнес-предложениях.

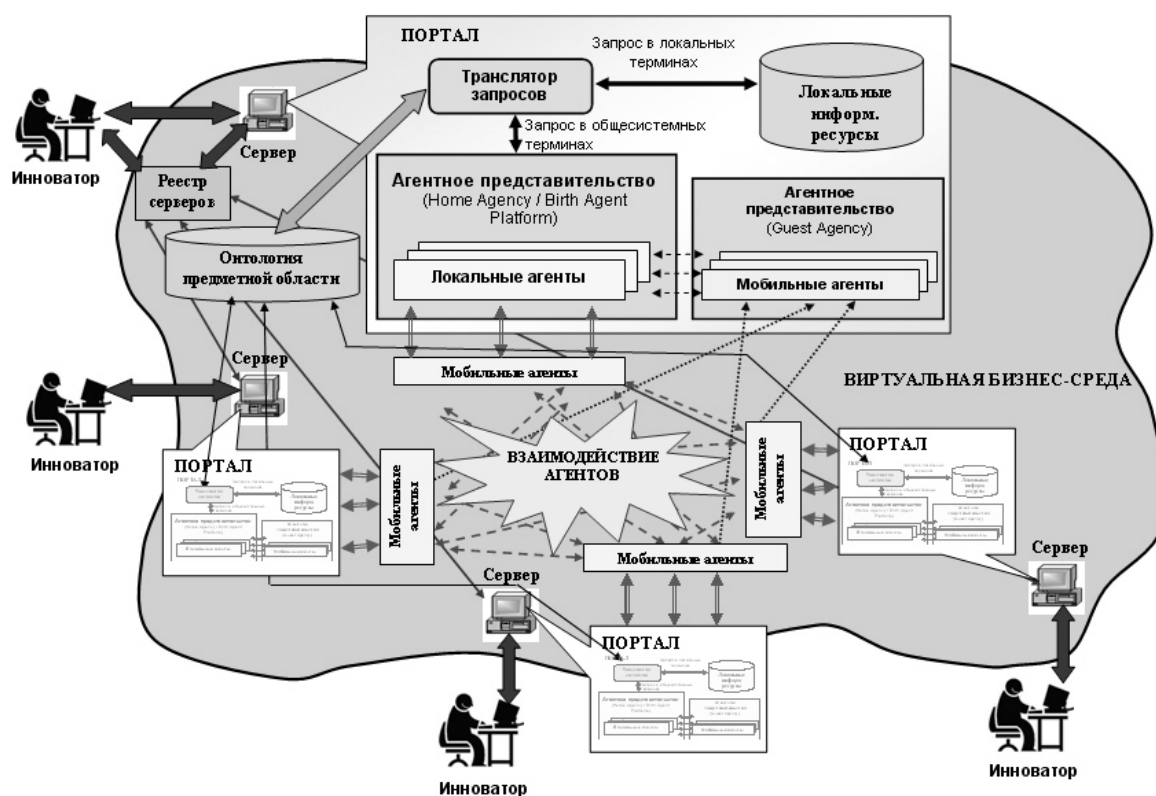


Рис. 1. Развернутая архитектура системы

Компоненты разработанной мультиагентной системы образуют логически единую виртуальную бизнес-среду. Каждый программный агент представляет в виртуальной среде некоторое бизнес-предложение, зарегистрированное на одном из порталов. Основная задача агента – поиск для своего владельца потенциальных партнеров по реализации инновационного или инвестиционного предложения (решается путем переговоров между агентами). Для уменьшения объемов данных, передаваемых по сети в ходе коммуникации агентов, в системе используются два типа агентов – мобильные агенты,

способные перемещаться между узлами для реализации локального поиска в пределах того или иного портала, и статичные агенты, представляющие интересы своего владельца на стороне портала, в котором зарегистрировано соответствующее бизнес-предложение. Статичные агенты не проявляют инициативу в межузловом поиске бизнес-партнеров и обеспечивают коммуникации с другими статичными или мобильными агентами.

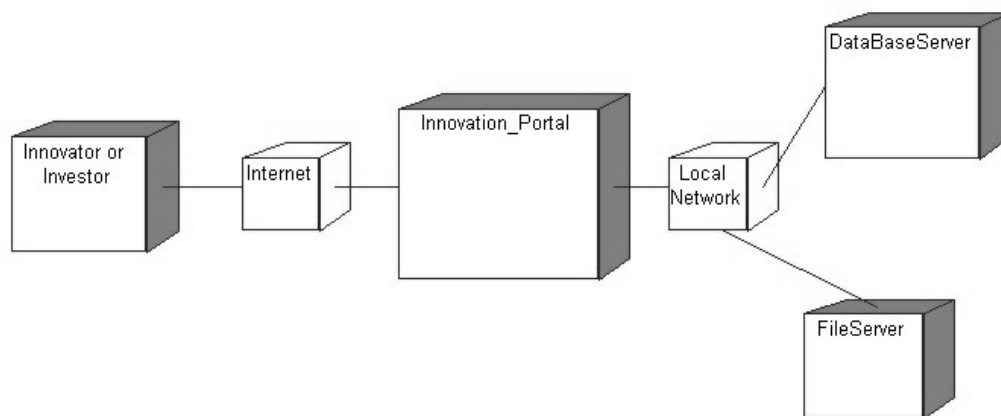


Рис. 2. Основные компоненты архитектуры

Систему образуют следующие основные функциональные модули (рис. 1).

- *Агентное представительство*, загружаемое на стороне серверной платформы инновационного портала. Данное представительство, в свою очередь, состоит из частей, реализующих локальное (home) и гостевое (guest) представительство. Первое выполняет функции порождения агентов и обеспечивает выполнение программного кода статичных локальных агентов, а второе обеспечивает среду выполнения для агентов-гостей, переместившихся с других узлов системы.

- *Перемещаемый программный код*, представляющий мобильных агентов. Представление мобильных агентов в виде перемещаемого кода позволяет обеспечить функциональную гибкость системы – произвольно изменять реализации алгоритмов расчета параметров инновационных структур и логики поведения агента при условии сохранения интерфейса вызовов.

- *Сервер онтологий предметной области*, обеспечивающий единую терминологическую базу для общесистемных и локальных запросов на поиск объектов и инновационных предложений.

- *Транслятор запросов*, обеспечивающий формирование поисковых запросов к локальным информационным базам портала на основе поступившего запроса в общесистемных терминах. В ходе трансляции используются онтологии предметных областей, хранящиеся на выделенном сервере онтологий.

- *Программные компоненты*, реализующие внутреннюю логику функционирования агентов и протоколы межагентных коммуникаций.

Компоненты архитектуры, представленные на рис. 2, можно охарактеризовать следующим образом:

- *Innovator* – компьютер участника инновационного процесса, который использует программного интеллектуального агента для поиска потенциальных партнеров и формирования инновационных цепочек.

- *Internet* – группа устройств, предоставляющих доступ к глобальной сети Интернет или ЛВС.

- *Innovation_Portal* – специализированный Web-ресурс, информационный Интернет-портал, содержащий инновационные и инвестиционные бизнес-предложения

субъектов инновационной деятельности и хранящий информацию по инновационной тематике.

- *Local Network* – устройства локальной сети, обеспечивающие связь серверов.
- *DataBase Server* – сервер информационных баз данных (например, MS SQL Server 2000, Oracle9i, DB/2 Sybase), который содержит информацию об инновационных проектах, их участниках и т.п.
- *File Server* – файловый сервер, хранит дополнительные инновационно-ориентированные бизнес-данные и материалы.

Система реализует следующие основные функции:

- 1) поиск потенциальных бизнес-партнеров по значениям атрибутов, зарегистрированных на инновационных порталах объектов и предложений;
- 2) формирование инновационных структур в ходе межагентных коммуникаций в рамках виртуальной бизнес-среды;
- 3) трансляция запросов на поиск объектов, сформулированных в общесистемных терминах, в локальные термины портала, являющегося текущим объектом поиска;
- 4) расчет количественных параметров сформированных вариантов инновационных структур и автоматизированный выбор из их числа потенциально наиболее эффективных;
- 5) настройка параметров инновационных предложений и соответствующих им программных агентов в ходе диалога с пользователем.

Логика работы системы во многом воспроизводит идеи, заложенные в концепцию Semantic Web [9]. Но, в отличие от последней, где изначально полагается, что процесс поиска, регистрации, обновления и обработки информации инициируется пользователем-человеком, в разработанной системе инициаторами процессов, аналогичных тем, что имеют место в Semantic Web, будут сами агенты, непосредственно являющиеся представителями своих владельцев. Таким образом, от инновационного субъекта будет требоваться лишь завести себе узел в распределенной виртуальной бизнес-среде, подключиться к одному из инновационно-ориентированных Интернет-порталов, на котором установлена разработанная система, зарегистрировать себя и свои бизнес-предложения, настроить требуемые опции у своего агента и ожидать результатов его деятельности. Всю работу по поиску партнеров в ВБС, предварительному анализу, оценке потенциальной эффективности и формированию инновационных структур выполняет агент. Агент, взаимодействуя с другими агентами в ВБС, собирает для своего владельца информацию, осуществляет поиск партнеров и формирование инновационных структур из территориально-распределенных компонентов, зарегистрированных на разных инновационно-ориентированных порталах в ВБС. При этом субъекту инноваций достаточно зарегистрироваться на одном из самых крупных инновационных порталов, так как агент самостоятельно продвигает и обеспечивает поддержку бизнес-предложений текущего субъекта и на всех остальных порталах, входящих в систему. Именно на основании вышеописанной функциональной возможности разработанная система названа интегрирующей. В процессе работы системы агент взаимодействует с конечным пользователем, предоставляя на рассмотрение результаты собственной работы или запрашивая уточняющую информацию о заявленных пользователем инновационных предложениях в случае изменения структуры или атрибутов инновационного поля (сцены функционирования агентов) или недостаточности информации о предложении. При этом пользователь может выбрать, как это будет происходить: интерактивно в стиле «вопрос-ответ» или в автоматическом режиме.

Разработанная система создает ряд новых возможностей для участников инновационной деятельности:

- единое информационное пространство для всех участников инновационной деятельности;

- возможность установления контактов с потенциальными партнерами;
- возможности получать информацию по всем аспектам инновационной деятельности;
- возможность получать информацию об исследованиях и разработках;
- возможности учета информационных потребностей различных участников инновационной деятельности.

Потенциальными пользователями разрабатываемой системы могут быть не только отдельные субъекты инновационной деятельности, но и целые научные, промышленные и коммерческие организации. Система с описанным набором функциональных возможностей может успешно применяться и такими специальными видами организаций, как: специализированные инжиниринговые фирмы, центры трансфера технологий, инновационно-технологические центры, инновационные инкубаторы, технопарки и т.п.

Заключение

Предложенный в работе анализ проблематики информационной поддержки инноваций позволяет говорить о том, что задача эффективного информационного обеспечения региональных инновационных процессов является весьма актуальной, но еще не полностью решена. В качестве одного из путей решения этой сложной задачи предлагается создание полностью децентрализованных одноранговых систем информационной поддержки инноваций, позволяющих гибко интегрировать в логически единое целое существующие и вновь появляющиеся информационные ресурсы инновационной тематики, обеспечивать поиск подходящих бизнес-партнеров и формирование эффективных бизнес-структур. Такие системы должны обеспечивать не только распределенный доступ к информации, но и децентрализованное хранение и обработку данных, решать проблемы технологической и семантической разнородности информационных ресурсов.

Современные технологии и прикладные программные системы российских и зарубежных разработчиков, относящиеся к сфере моделирования и автоматизации инновационных процессов, позволяют достаточно эффективно решать подобные задачи. В качестве одного из подобных решений можно рассматривать разработанный на базе Института информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН прототип системы информационной поддержки инновационной деятельности в регионе – мультиагентную систему интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций [8].

Представленная в статье система позволяет повысить эффективность информационной поддержки инновационных процессов за счет возможности гибкого совместного использования разнородных территориально-распределенных информационных ресурсов инноваций и автоматизации рутинных операций по поиску подходящих бизнес-партнеров по реализации инновационных проектов.

Настоящая работа поддержана грантами РФФИ № 05-07-90050 «Информационные технологии региональных макросистем» и № 05-07-97508 «Создание инструментальной среды для интегрированного распределенного доступа к разнородным семантически связанным источникам данных».

Литература

1. Маслобоев А.В. Информационное обеспечение развития современных экономических систем: Учеб. пособие. – Апатиты: Изд. ПетрГУ, 2008. - 121 с.
2. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Проблематика информационной поддержки региональных инновационных структур // Инновации. – 2007.– №6(104). – С. 73–76.

3. Шишаев М.Г. Архитектура и технологии региональной распределенной системы информационной поддержки инноваций // Прикладные проблемы управления макросистемами. Тр. ИСА РАН. Т. 28. Под ред. Ю.С. Попкова, В.А. Путилова. – М.: Изд-во «КомКнига УРСС», 2006. – С. 250–263.
4. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Шишаев М.Г. Обзор современного состояния технологии мультиагентных систем и перспективы ее развития // Информационные технологии в региональном развитии: Сб. науч. тр. ИИММ КНЦ РАН, вып. VI. Под ред. В.А. Путилова – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. – С. 6–12.
5. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: УРСС, 2002. – 348 с.
6. Сухорослов О.В. Принципы самоорганизации в пиринговых системах // Прикладные проблемы управления макросистемами. Сб. докл. – Том 8. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – С. 141–174.
7. Маслобоев А.В., Путилов В.А., Шишаев М.Г. Концептуальная модель агентно-ориентированной виртуальной бизнес-среды развития инноваций // Информационные технологии в региональном развитии. Сб. науч. тр. ИИММ КНЦ РАН, вып. VII.– Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. – С.15–27.
8. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Мультиагентная система интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций // Программные продукты и системы.– 2007. – Т. 92. – №4. – С. 30–32.
9. Hendler J. Agents and the Semantic Web / J. Hendler // IEEE Intelligent Systems, Vol. 16, No. 2, March/April 2001. P. 130–151.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГЛОБАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭНЕРГОСЕТЕЙ

И.И. Морозов

(Московский физико-технический институт (государственный университет))

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Я.А. Холодов

(Московский физико-технический институт (государственный университет))

В работе приведено описание модели энергосети, а также алгоритма поиска управляющего воздействия. Сделаны варианты по оценке управляющего воздействия. В завершении показаны результаты расчетов на тестовых схемах и реальной схеме ОДУ Урала.

Введение

В настоящее время для крупных энергообъединений актуальна проблема автоматического управления системой в случае возникновения сбоя в работе элементов сети. В случае несвоевременной реакции на системную ошибку, возникшую в сети, потери могут быть огромны. Достаточно вспомнить события 2005 г. в Москве. До последнего времени решение этой задачи было основано, в частности, на построении предварительных таблиц вариантов возможных сбоев и разнообразных руководств, что делать в случае каждого из них. Другой подход был реализован для объединенного диспетчерского управления (ОДУ) Урала. Данный подход основан на релаксации опасного сечения в исходном режиме, исходя из линейаризованной модели сети [1–2].

В работе предложен новый вариант решения, учитывающий изменения «опасного сечения» в процессе поиска управляющего воздействия (**УВ**) на сеть. Решение будет основано на последовательном ослаблении перетоков активной мощности между областями, разделенными сильно загруженными по мощности ветвями. Загруженность ветвей в отсутствие устойчивости режима работы сети также оценивалось с помощью линейаризованной модели.

Модель расчета установившегося режима

Постановка задачи

Рассматривается модель энергосети [3–4], содержащая следующие объекты:

- генераторы (PQ , PU типов);
- шунты на землю;
- распределительные щиты;
- линии электропередачи;
- трансформаторные линии.

Топология сети никак не была ограничена. Заметим, что в России граф глобальной электрической энергосети в силу географических причин (в большинстве случаев на уровне ОДУ) слабосвязанный. Это будет важно для алгоритма поиска УВ в дальнейшем. Выпишем уравнения для всех объектов модели сети.

- Генератор типа PQ :

$$\begin{cases} U_r I_r + U_i I_i = P_0 \\ -U_r I_i + U_i I_r = Q_0 \end{cases}.$$

- Генератор типа PU :

$$\begin{cases} U_r I_r + U_i I_i = P_0 \\ U_r^2 + U_i^2 = U_0^2 \\ -U_r I_i + U_i I_r \in [Q_{min}, Q_{max}] \end{cases}.$$

- Шунты:

$$I = YU$$

где Y – проводимость на землю.

- Распределительные щиты:

$$\sum_{k=1}^{k=N} I_{ks} = \sum_{k=1}^{k=N} U_s * B_{ks} / 2,$$

здесь B_{ks} – проводимость линии $s - k$ на землю.

- Трансформаторные линии:

$$\begin{cases} I_{out} = kI_{in} \\ U_{out} = U_{in} / k \end{cases}$$

соответственно k – коэффициент трансформации.

- Линии электропередачи:

$$U_{out} - U_{in} = IZ,$$

где Z – импеданс линии.

Оптимизация системы уравнений

Заметим, что выписанную выше систему можно решать методом Ньютона в общем виде. Но тогда количество переменных в ней будет $2N+2M$, где N , M – количества ребер и вершин в графе сети, соответственно. Для небольших схем такой подход дает приемлемые результаты. Но, если размерность схемы становится порядка 100 только генераторов, то метод начинает требовать затрат порядка $(2 * N + 2 * M)^3$ операций на одну итерацию, т.н. больше 10^6 . Это неприемлемо для функции, составляющей основу алгоритма поиска УВ, требования к которому по времени достаточно жесткие, что приводит к необходимости сокращения размерности системы до приемлемой величины.

Очевидно, что достаточно большая часть уравнений системы линейна по выписанным переменным. Таким образом, мы можем определить так называемые «базовые» переменные. Вектор этих переменных обозначим \bar{U} и определим его. Вся нелинейность сосредоточена в уравнениях для генераторов, следовательно, можно взять за компоненты \bar{U} значения напряжений на генераторах системы. Число уравнений в системе $2N + 2(M_g + M_s)$, где $M_s = M_g$ – число узлов, не являющихся генераторами, а M_g – число узлов-генераторов. Отсюда следует, что через $2 * M_g$ переменных можно линейным образом выразить оставшиеся $2N + 2M_s$ переменные, поскольку число линейных уравнений также $2N + 2M_s$. Получаем систему уравнений следующего вида:

1. генератор s , типа PQ :

$$\begin{cases} U_{sr} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{kr} U_{kr} + \beta_{kr} U_{ki}) + U_{si} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{ki} U_{kr} + \beta_{ki} U_{ki}) = P_{s0} \\ U_{si} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{kr} U_{kr} + \beta_{kr} U_{ki}) - U_{sr} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{ki} U_{kr} + \beta_{ki} U_{ki}) = Q_{s0} \end{cases},$$

2. генератор s , типа PU :

$$\begin{cases} U_{sr} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{skr} U_{kr} + \beta_{skr} U_{ki}) + U_{si} \sum_{k=1}^{k=M_g} (\alpha_{ski} U_{kr} + \beta_{ski} U_{ki}) = P_{s0} \\ U_{si}^2 + U_{sr}^2 = U_{s0}^2 \\ Q_s \in [Q_{min}, Q_{max}] \end{cases},$$

где $\alpha_{sk\gamma}$ и $\beta_{sk\gamma}$ – коэффициенты выражения тока генератора s через U_k . $\gamma = \{r, i\}$, т.е., соответственно, коэффициенты при вещественной или мнимой части. Отсюда получаем систему уравнений с числом переменных M_g .

Заметим, что в комплексных числах все записывается для s -го генератора типа PQ проще:

$$S_s = U_s I_s^* \rightarrow \frac{S_s U_s^*}{|U_s|^2} = \sum_{k=1}^{k=M_g} (\gamma_{sk} U_k),$$

здесь S_s и γ_{sk} – полная мощность, выдаваемая генератором s и коэффициент выражения комплексного тока s через комплексное напряжение k . Как показала практика, с хорошей точностью можно считать сначала $|U_s|^2$ в знаменателе равным номинальному напряжению, а потом – полученному на предыдущей итерации.

Сделанное выше предположение позволяет сократить размерность системы до M_{gPU} , т.е. до числа генераторов типа PU , получив при этом некоторые накладные расходы на выражение напряжений генераторов типа PQ .

Метод Ньютона

Для решения полученной задачи можно использовать классический метод Ньютона (**МН**) [5], который показывает хорошие результаты для удачного начального приближения. Но в решаемой задаче получить хорошее начальное приближение – отдельная и достаточно сложная проблема, которая будет рассмотрена ниже. Из вышесказанного следует, что необходимо реализовать МН так, чтобы как можно больше ослабить требование на начальное приближение.

Хорошие результаты дает модифицированный МН (**ММН**) [5]. Он состоит в следующем. В отличие от классического метода Ньютона, который для уравнения

$$f(X) = 0$$

ищет решение в виде

$$X_{n+1} = X_n - \left\{ \frac{\partial f}{\partial X} \right\}^{-1} f(X_n),$$

модифицированный метод Ньютон преобразует эту формулу к следующему виду:

$$X_{n+1} = X_n - \alpha \left\{ \frac{\partial f}{\partial X} \right\}^{-1} f(X_n),$$

где $\alpha = \operatorname{argmin}(\|f(X_{n+1})\|)$.

Показано, что данный метод значительно ослабляет требования к начальному приближению в задаче поиска установившегося режима.

Начальное приближение (НП)

Есть разные методы получения начального приближения для решения задачи. Исследован был следующий подход – берем некоторое линейное приближение системы, решаем его и полученное решение уточняем с помощью МН до точного. В литературе упоминается метод регуляризации [6], при котором для уточнения начального приближения методом простой итерации делается один шаг, после чего запускается МН. Очевидно, что уточнение в этом случае произойдет только при использовании сжимающего оператора.

Для получения НП можно использовать различные методы.

1. Для генераторов типа PU – линейаризация PQ : $\frac{S_s U_s^*}{|U_s|^2} = \sum_{k=1}^{k=M_g} (\gamma_k U_k)$.

При использовании этой линейаризации для генераторов типа PU (для которых реактивная мощность лежит в заданных границах) требуется выбрать Q , которая войдет в соответствующее S . Далее можно считать, что $|U_s|$, $s \in PQ$ (т.е. s из множества генераторов типа PQ), постоянно с некоторой точностью. Тогда, если число PU генераторов мало, то можно использовать МН для решения полученной задачи, применив 2-й подход оптимизации. Получается достаточно хорошее начальное приближение.

2. Можно использовать на ветвях приближенные уравнения вида

$$P_{kl} = |U_k| |U_l| * |\sigma_{kl}| * (\delta_k - \delta_l),$$

где δ_s – фаза напряжения s -го генератора, а σ_{kl} – коэффициент трансформации, деленный на реактивное сопротивление ветви.

В узлах тогда можно записать только закон сохранения энергии:

$$\sum_{k=1}^{k=M_s} (P_{sk}) = P_s.$$

Если теперь считать напряжения постоянными и равными либо номинальным, либо напряжениям предыдущего уже посчитанного режима (в случае просчета режима после возмущения), то получаем линейную систему уравнений, которая достаточно просто решается в связи с ее разреженностью. Получив $\{\delta\}$ и $\{P\}$, знаем распределение потоков для начального приближения.

3. Можно использовать метод, не связанный с линеаризацией системы в чистом виде. Для поиска режима текущей конфигурации схемы находим режим близкой конфигурации и линейным приращением параметров находим требуемый. Пусть Ω – вектор параметров системы, в которой мы ищем режим. Тогда находим из известных нам векторов Ω_k , $k = 1, 2, \dots, K$ вектор Ω_x такой, что $\Omega_x = \operatorname{argmin}(\|\Omega - \Omega_i\| \forall \Omega_i)$. Далее решаем следующий набор задач: для каждого $k = 1, 2, \dots, K$ $\Omega_{temp}(k) = \Omega(k/K) + \Omega_x(1 - k/K)$ находим УР для схемы $\Omega_{temp}(k)$, принимая за начальные значения решение предыдущей схемы $\Omega_{temp}(k-1)$ для $k = 2, \dots, K$.

Поиск управляющего воздействия

Постановка задачи

Задача поиска управляющего воздействия состоит в том, чтобы найти такую оптимальную в некотором смысле коррекцию текущих параметров схемы, чтобы наложение ее на текущие параметры обеспечивало сходимость системы уравнений, т.е. наличие режима. При такой постановке существует ряд ограничений на реализацию, самое существенное из которых – минимизация времени поиска. Есть также ограничение по размеру УВ и прочие, но это уже относится скорее к оптимизации самого УВ.

Оптимальность управляющего воздействия

Данный вопрос может рассматриваться с многих точек зрения, начиная от финансовой (стоимость введения дополнительных мощностей, отключения предприятий, и т.д.) и заканчивая тем, чтобы УВ было локализовано максимально близко от района возмущения. Также можно помнить, что потребителей лучше не отключать, если возможно другое решение проблемы, и УВ неплохо было бы оптимизировать по мощности. Все эти рассуждения наводят на мысль о том, что в разных ситуациях каждый критерий может иметь разный вес. Из этого и следует исходить при оптимизации УВ.

Заметим, что оптимизация должна осуществляться тогда, когда УВ найдено. В процессе оптимизации, возможно, УВ сильно изменится, но главное, чтобы вариант УВ существовал всегда.

Поиск управляющего воздействия

Предположим наличие какого-нибудь базового режима работы сети. Аварийная ситуация состоит в возмущении параметров базового режима. Спрашивается, какие варианты могут вызвать такое возмущение, чтобы режим не сошелся. Например, это может быть аварийное отключение ЛЭП, аварийная остановка генератора, аварийное отключение потребителя. Таким образом, можно попробовать постепенно подвести базовый режим к возмущенному. Сделаем это аналогично методу 3 поиска начального приближения: будем считать, что базовый режим – начальное приближение требуемого,

но, в процессе подхода к требуемому, будем вносить корректировки в схему, необходимые для того, чтобы режим в конечном итоге сошелся. Корректировки, полученные в результате, и будут являть собой искомое УВ.

Обозначим Ω – набор параметров схемы, $\overline{\Omega}$ – корректировка параметров схемы (УВ). Таким образом, получаем следующую итерационную схему:

$$k = 1, 2, \dots, K \quad \Omega(k) = \Omega_{end}(k/K) + \Omega_0(1 - k/K) + \overline{\Omega(k)}, \text{ где}$$

$$\overline{\Omega(k)} = 0 \text{ при } k = 1$$

$$\overline{\Omega(k)} = \overline{\Omega(k-1)} + \underline{\Omega(k)} \text{ при } k > 1,$$

где $\underline{\Omega(k)}$ – корректировка текущего набора параметров, требуемая для сходимости схемы.

Теперь опишем построение $\underline{\Omega(k)}$ при $k > 1$. Пусть при некотором Ω режим отсутствует. Тогда решаем систему оценочных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{i=N_j} (P_{ij}) = \Delta P_j \\ P_{ij} = |U_j| |U_i| |\sigma_{ij}| (\delta_i - \delta_j) \end{cases}$$

Получаем послеаварийное распределение активной мощности на схеме и находим опасные сечения, которые необходимо нейтрализовать. Эти сечения разбивают граф на подграфы, в каждом из которых поток мощности критичен. Стараемся уменьшить эти перетоки за счет самых мощных узлов в каждом подграфе: уменьшаем $P_{нагр}$ или $P_{ген}$ у генератора с соответствующим максимальным показателем. Шаг изменения выбираем таким, чтобы появились дополнительные подграфы, построенные указанным выше способом. Повторяем, начиная с поиска опасного сечения.

Как показала практика, для схем порядка 100 генераторов количество таких итераций не превышает 2–3.

Оптимизация управляющего воздействия

После нахождения УВ упрощенным способом его следует привести к оптимальному виду. В работе предлагается использовать метод последовательного увеличения потоков с сохранением баланса. Последовательность действий – следующая.

1. Ищем опасное сечение.
2. Ищем два узла из УВ, с уменьшенными, соответственно, потреблением и генерацией, если такие есть по одну сторону от сечения.
3. Контролируя появление новых опасных сечений, увеличиваем соответствующий переток.
4. Если УВ содержит только ОН или только ОГ, то можно использовать жадную оптимизацию, оставаясь в рамках существования режима.

Реализация системы

Ввод данных

Система поддерживает ввод схем в следующих форматах:

1. в графическом редакторе фирмы МОДУС;
2. в формате центрального диспетчерского управления (ЦДУ);
3. во внутреннем формате.

Если в формате присутствует информация о пространственном расположении узлов, то она будет учтена при визуализации схемы. При работе с форматом ЦДУ система поддерживает работу с таблицами «Узлы», «Ветви», «Дерево», по аналогии с ПО Rastr. В случае работы с форматами МОДУС, которые по умолчанию не рассчитаны на хранение спе-

циальных данных, касающихся непосредственно поиска режима для сети, в схему добавляются поля, дающие такую возможность. С этими полями и ведется работа.

Данные в схеме могут быть из двух источников – из справочника и введенные напрямую. В первом случае данные по объектам выбираются из справочника. В этом случае для линий, к примеру, требуется задать длину и тип провода. В случае же напрямую введенных данных для линий, к примеру, вводятся сразу R (активное сопротивление линии), X (реактивное сопротивление линии), B (проводимость линии на землю).

Визуализация информации

В процессе работы возможен вывод на экран данных по параметрам линий, направления линий, подписей объектов, данных по режиму (если посчитан). Также, поскольку УВ возможны не для каждого объекта, то включается режим подсветки объектов, для которых нет возможности наложения УВ.

Расчет режима

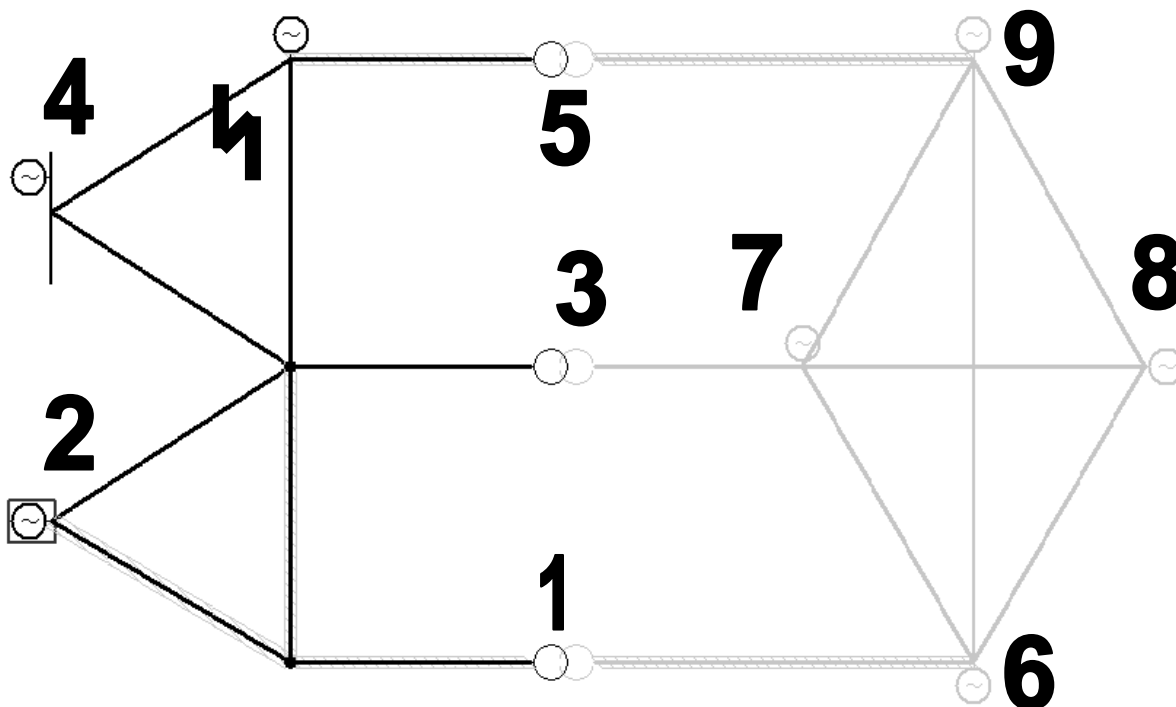
Для данной функции возможны настройки по количеству итераций и поиску начального режима.

Поиск УВ

Если система не находит УР, то автоматически возникает предложение найти УВ; если согласится, то начинается поиск УВ. Текущий вариант всегда доступен для оператора.

Примеры расчетов

Исследовались 4 схемы одинаковой топологии с разными параметрами нагрузки-генерации. Наведенное возмущение: отключение линии $4 \rightarrow 5$.



Случай 1: нарушение устойчивости по линии $3 \rightarrow 5$.

Далее в таблицах будут приведены только различия со случаем 1.

№	Рг(МВт)	Qг(МВт)	Qmin(МВт)	Qmax(МВт)	Рн(МВт)	Qн(МВт)	Uном(кВ)
1							500
2	Базовый						510
3							500
4	1000		-300	+300	200	100	514
5					1500→1000		504
6	400		-500	+500	100	100	228
7					100	50	225
8			-100	+100	100	100	225
9					100	200	225

Таблица 1. Параметры схемы 1

Случай 2: нарушение устойчивости по линии 3 → 4.

4	1500→1300		-300	+300	200	100	514
5					800		504
6	400		-500	+500	100	100	228
7					400	50	225

Таблица 2. Отличие схемы 2 от схемы 1

Случай 3: нарушение устойчивости по совокупности линий 3 → 5 & 3 → 4.

4	1500→1200		-300	+300	200	100	514
5					1500→900		504
6	400		-500	+500	100	100	228
7					100	50	225

Таблица 3. Отличие схемы 3 от схемы 1

Случай 4: нарушение устойчивости по совокупности линий 3 → 5 & 3 → 4.

4	2000→1300		-300	+300	200	100	514
5					1500→1100		504
6	800		-500	+500	100	100	228
7					100	50	225

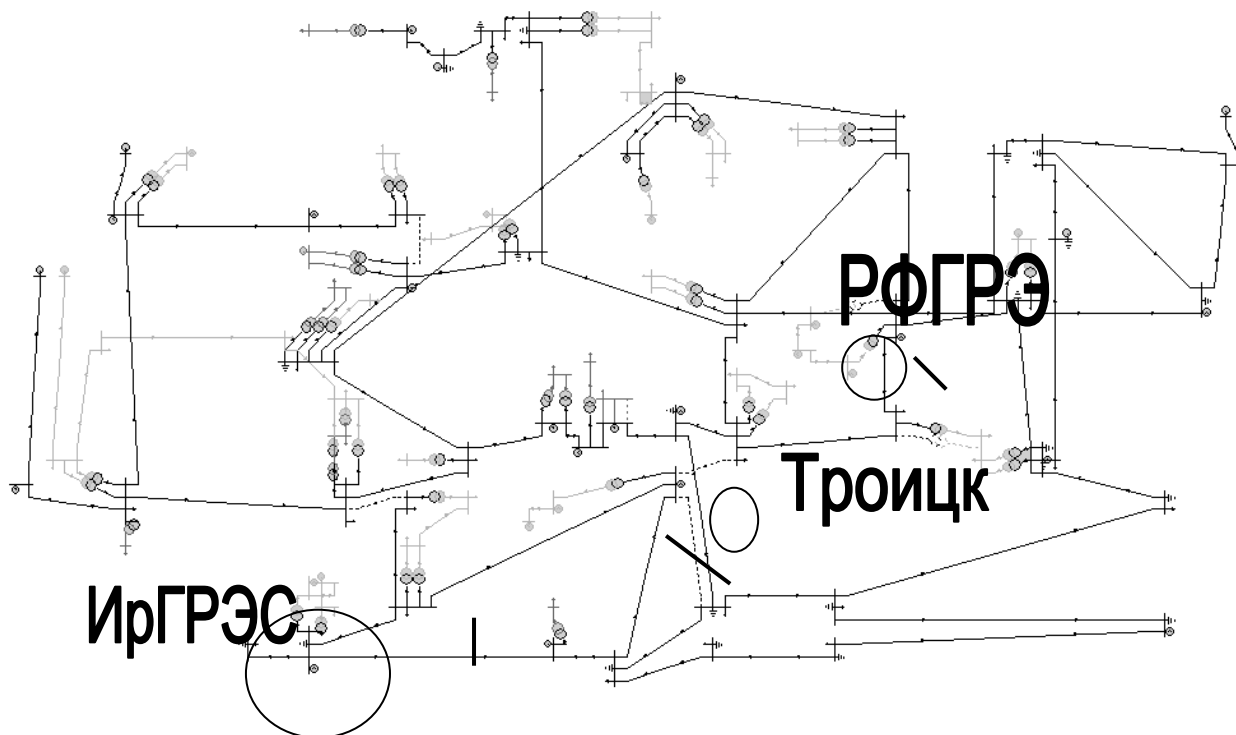
Таблица 4. Отличие схемы 4 от схемы 1

Далее была исследована работа алгоритма на больших схемах. Покажем для примера результат работы на реальной схеме ОДУ Урала.

Случай 1. Возмущение исходного режима:

1. Отключение линии "Бекетово-Смеловск"
2. Отключение линии "Нкама(Удмуртия)-Карманово"
3. Отключение линии "Троицк-Шагал"
4. Увеличение генерации для "Троицк" на 2000МВт
5. Увеличение потребления для "РФГРЭ" на 2000МВт.

В данном примере нарушается устойчивость по линиям, соединяющим основную часть схемы с «Троицк» и «РФГРЭ». Таким образом, получается 3 изолированных подграфа. Понижая одновременно генерацию в «Троицк» и потребление в «РФГРЭ», получаем понижение генерации в «Троицк» на 100МВт и потребления в «РФГРЭ» на 200МВт.



Случай 2. Возмущение исходного режима:

1. Отключение линии "ИрГРЭС-Газова"
2. Отключение линии "ИрГРЭС-Магнитогорск"
3. Отключение линии "ИрГРЭС ИрГРЭС_Б1"
4. Отключение линии "ИрГРЭС-ИрГРЭС_Б2"
5. Увеличение генерации для "ИрГРЭС" до 2700МВт.

В данном примере нарушается устойчивость по линиям, соединяющим основную часть схемы с "ИрГРЭС". Таким образом, получается 2 изолированных подграфа. Восстанавливая устойчивость на соответствующей линии, получаем УВ в "ИрГРЭС" – уменьшение генерации на 1700МВт.

Заключение

В работе был рассмотрен алгоритм поиска УВ для энергосетей. Алгоритм имеет ряд нововведений по сравнению с существующими. В частности, добавлена проверка опасных сечений в процессе поиска и возможность релаксации одновременно нескольких сечений. Также введена оптимизация УВ. Критерии оптимизации могут быть самые разные. В текущей реализации они настроены на уменьшение УВ. Добавить дополнительные критерии в текущую модель достаточно просто.

Алгоритм проверен на наборе схем. Сравнение по каждому из режимов проведено с ПК RastrWin [7]. По предложенным программой векторам улучшить режим в ПК RastrWin уже невозможно, что является некоторым показателем оптимальности результата. Схемы в работе брались произвольные, от 6 до 94 узлов-генераторов.

Следует заметить, что в работе не были учтены такие факторы, к примеру, как запас надежности сети. Ввести их в модель не представляет труда.

Литература

1. Богомолова И.А. Оценка устойчивости режима узловой модели энергосистемы / Сб. науч. тр. НИИПТ. – 1987. – С. 45–59.

2. Кац П.Я., Садовский Ю.Д., Салита Е.П., Теллинен Н.Ю. Приведение расчетной схемы энергосистемы к совокупности узловых моделей для дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики / Сб. науч. тр. НИИПТ. – 1987. – С. 28–35.
3. Гуревич Ю.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических схемах. – Н.: НГТУ, 2002.
5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.Г. Численные методы. 8-е изд. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 624 с.
6. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1977.
7. Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/>

МЕРЫ ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СИГНАЛА

А.А. Орешков, И.С. Волков, Д.А. Камнев

Научный руководитель – д.т.н., профессор В.В. Григорьев

В работе введены и рассмотрены обобщенные меры информационной емкости сигнала, основанные на градациях яркости, рассмотрена их связь с классическими мерами количества информации. Показано применение мер информационной емкости к обработке изображений интерференционной картины.

Введение

При проектировании и расчете системы обработки визуальной информации часто возникает задача оценки информационного содержания одиночного изображения или последовательности изображений (визуального сигнала). Это может быть вызвано различными причинами. Например, причиной экономии технических средств: если информационное содержание изображения небольшое, то его необязательно хранить и передавать в исходном виде. Допустимо преобразовать его, например, сжать, чтобы оно занимало меньше места. Также часто имеет смысл при низкой информационной содержательности изображения сжать его для упрощения дальнейшей обработки. При анализе пространственного сигнала (т.е. последовательного ряда изображений) для повышения быстродействия системы обработки визуальной информации на основе информационной меры можно проанализировать зависимость между исходным и последующим изображением и в зависимости от результата сравнения принимать решения об обработке сигнала.

Классической мерой информации дискретного источника является информационная мера К. Шеннона:

$$H_n(\vec{p}) = -\sum_{k=1}^n p_k \log_2 p_k \quad (1)$$

именуемая энтропией источника. Она была выведена для кодирования и передачи сообщений (информации). Для систем обработки видеоинформации интерес представляет извлечение информации из видеоизображений, что накладывает определенные ограничения и неудобства на ее использование в системах обработки видеоинформации меры К. Шеннона. Таким образом, возникает потребность в нахождении мер количества информации в изображениях, которые бы объективно определяли их информационное содержание, причем отражали бы не только количественные характеристики информации, но также структурные и пространственные закономерности.

Рассмотрим подробнее технические аспекты задачи. Лабораторный исследовательский стенд интерференционного измерителя микроперемещений, созданный на кафедре системы управления и информатики СПбГУ ИТМО, представлен функциональной схемой (рис. 1).

Персональный компьютер осуществляет управление приводом микроперемещений, который, в свою очередь, воздействует на оптическую систему интерферометра. При этом изменяется вид и параметры интерференционной картины. Съём оптической информации осуществляется камерой, подключенной посредством USB-интерфейса к ПК, который производит анализ информации и вычисляет величины перемещений.



Рис. 1. Функциональная схема стенда

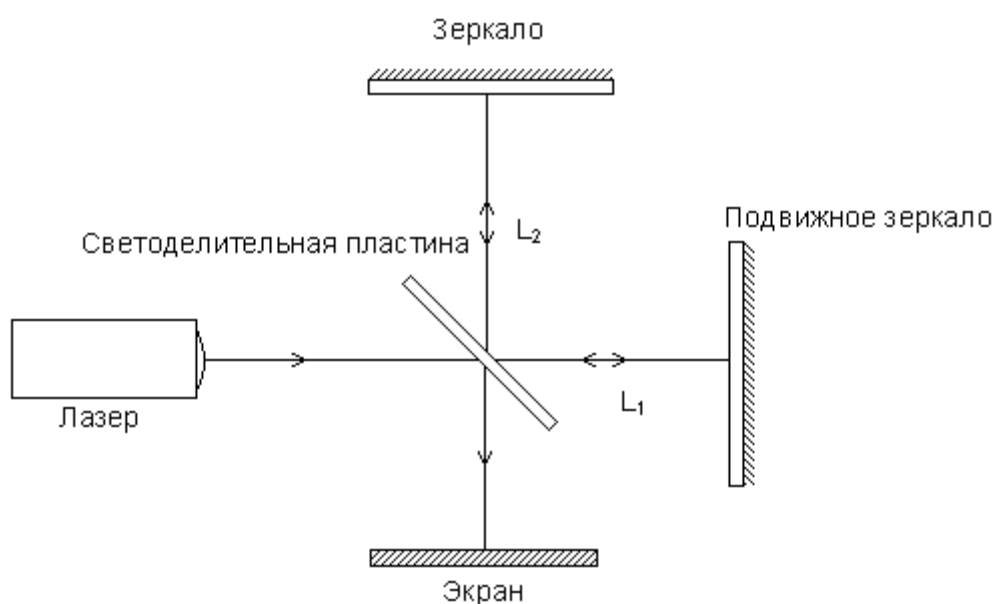


Рис. 2. Оптическая часть измерителя

Оптическая часть стенда построена на основе классической схемы интерферометра Майкельсона. Она состоит из монохроматического лазера с расширителем пучка, светоделительной пластинки, неподвижного зеркала и жестко закрепленного подвижного зеркала на перемещающемся объекте измерений, и экрана, на котором отображается интерферограмма (рис. 2).

С экрана изображение интерферограммы снимается с помощью ПЗС-камеры, и видеоизображение поступает на ПК. Это изображение, представленное в виде отдельных кадров, и обрабатывает с помощью ПК для получения измерительной информации.

Анализ производится по отдельным кадрам. Каждый кадр имеет разрешение до 640 на 480 пикселей. Пиксель представляет собой точку с фиксированными координатами на изображении и с собственным значением яркости, представленным в виде набора трех чисел (яркости трех базисных цветов в случае цветного изображения). В случае монохроматического видеосигнала яркость пикселя представлена одним значением, лежащим в заданном диапазоне.

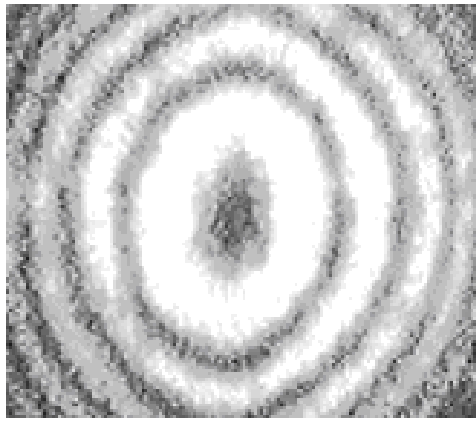


Рис. 3. Пример монохроматического изображения

Яркость пикселя является основной информационной характеристикой, в свою очередь яркость совокупности пикселей является информационной характеристикой изображения. Возникает естественная потребность в введении меры информационного содержания всего изображения, основанной на множестве градаций яркости пикселей картинки.

Рассмотрим изображение S , состоящее из N пикселей. Введем функцию изображения $f(x, y)$, определенную для точки с координатам x, y , принадлежащими S . Функция $f(x, y)$ определена на промежутке

$$\{0, 1, \dots, L-1\}, \text{ или } 0 \leq f(x, y) \leq L-1, \quad (2)$$

где L – число градаций яркости. Мера количества информации, содержащейся в S , базируется в простейшем случае на минимальном числе изменений уровня яркости пикселя, требующемся для приведения исходного изображения в изображение с постоянной (базовой) яркостью.

Гистограмма яркости изображения S имеет вид $h(i)$, где i – значение яркости, а h – число точек яркости i .

$$\sum_{i=0}^{L-1} h(i) = N. \quad (3)$$

Определим меру количества информации следующим образом:

$$I(f) = \sum_{i=0}^{L-1} h(i) - \max_i h(i). \quad (4)$$

Видно, что мера I равна 0 в случае изображения с постоянной яркостью, т.е. когда $f(x, y)$ постоянно для всех $x, y \in S$. Аналогично I максимальна в случае равномерной гистограммы, т.е. в случае $h(i) = const$ при $0 \leq i \leq L-1$. Эти свойства следуют из определения (3). Отсюда же ясно, что изображение наиболее информативно в случае максимального значения меры и наименее информативно в случае, если $I=0$.

В некоторых случаях удобнее пользоваться нормированной мерой информации. Нормированная мера информации имеет следующий вид:

$$I_n(f) = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} h(i) - \max_i h(i)}{N(f)}. \quad (5)$$

Рассмотрим также очевидное свойство меры информации. При разделении изображения на субизображения (непересекающиеся субизображения) суммарная мера информации должна быть не меньше отдельных мер. Для двух сегментов изображения S_1 и S_2 это должно иметь вид (6):

$$I_n\left(\frac{f}{S}\right) \geq I_n\left(\frac{f}{S_1}\right) + I_n\left(\frac{f}{S_2}\right). \quad (6)$$

При анализе сегментированного изображения по субмере информации можно делать вывод о надобности дальнейшей декомпозиции. В случае если I или I_n меньше порога, она нужна, в случае же если I_n стремится к максимуму, то изображение несет максимум информации и не подлежит дальнейшей декомпозиции.

Определим $p(i)$ как отношение количества пикселей данной градации у общему числу пикселей N :

$$p(i) = \frac{h(i)}{N(f)}. \quad (7)$$

Отсюда получим

$$I_n(f) = 1 - \max_i p_i. \quad (8)$$

Более общая мера информации определяется как необходимое число градаций яркости для приведения исходного изображения к изображению, содержащему k градаций яркости (наибольших $h(i)$).

$$I^k(f) = \sum_{i=0}^{L-1} h(i) - \sum_{i=N-k} h(i). \quad (9)$$

Нормированная мера

$$I_n^k(f) = 1 - \sum_{i=N-k} p_i. \quad (10)$$

Приведенная выше мера обладает следующими свойствами.

1. Стабильность – малые изменения частот градации яркости приводят к незначительным изменениям количества информации и соответственно информационной меры.
2. Вогнутость. Это свойство определяется выражением (6) и свидетельствует о том, что при сегментации (ветвлении древа изображений) мера I не возрастает.
3. Расширяемость – при добавлении к изображению неиспользуемых градаций яркости мера I не изменяется:

$$I_n(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) = I_{n+1}(0, p_1, \dots, p_i, \dots, p_n). \quad (11)$$

4. Чувствительность – при укрупнении градаций мера не возрастает:

$$I_{n-1}(p_1 + p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n) \leq I_n(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n). \quad (12)$$

5. Максимальность и определенность – максимальность меры при равномерной гистограмме и минимальность (нулевая мера) при постоянной яркости.

Определение меры (10) может быть расширено с использованием информационной меры Лоренца. Рассмотрим упорядоченный вектор частот градации яркости (упорядоченный по убыванию частоты) $\vec{p} = \{p_1, \dots, p_n\}$. Нормированная мера $I_n^k(f)$ равна разности 1 и k первых членов \vec{p} , или сумме $n - k$ последних членов ряда \vec{p} . Т.е.:

$$0 = I_n^n(f) \leq I_n^{n-1}(f) \leq \dots \leq I_n^0(f) = 1. \quad (13)$$

Тогда

$$I_n^{n-k}(f) = \sum_{i=0}^{k-1} p_i. \quad (14)$$

Построим кусочно-непрерывный график зависимости $I_n^{n-k}(f)$ от $\frac{k}{n}$ (рис. 4). Этот график называется кривой Лоренца. Отметив на нем соответствующую точку, мы можем определить информативность изображения в зависимости от k . Также из графика можно определить, насколько то или иное изображение информативнее относительно

другого. Это можно интерпретировать как сложность изображения или меру концентрации пикселей относительно градаций яркости.



Рис. 4. График информационной меры

Использование порогового значения меры информации I_n при сегментации и декомпозиции изображения заключается в управлении процессом декомпозиции. Вычисление мер для субизображений позволяет сделать вывод о дальнейшем ходе разложения изображения на фрагменты.

При анализе форм объектов изображения и при задаче сведения изображения к двухградационному для четкого выделения границ мера может служить как для выделения границ объектов, так и для наращивания (придания однородной градации яркости частям объекта) областей [3].

При анализе динамического видеосигнала мера может служить критерием принятия решения о детальном или поверхностном анализе изображения. Также в этом случае полезным оказывается построение и использование информационных кривых Лоренца. В случае потока изображений эти кривые позволяют сравнивать и устанавливать меру подобия между отдельными кадрами видеосигнала по их информационному содержанию. На основании этих выводов производится анализ изображения. Это также справедливо и при анализе двух связанных отдельных изображений.

Заключение

В работе выведена и описана мера определения количества информации в видеосигнале. Приведены свойства этой меры и возможности ее применения при обработке цифровой информации.

Литература

1. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. – Л.: Машиностроение, 1976.
2. Гуров И.П., Джабиев А.Н. Интерферометрические системы дистанционного контроля объектов. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. – 190 с.
3. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд. иностр. лит., 1963. – 830 с.
4. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
5. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Под ред. Т.С. Хуанга. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ТОЛЩИН ЛИНЗ ДЛЯ ОБЪЕКТИВОВ С ВЫНЕСЕННЫМ ЗРАЧКОМ НА ЭТАПЕ ВЫБОРА СТАРТОВОЙ ТОЧКИ

М.А. Пашковский

Научный руководитель – д.т.н., профессор С.К. Стафеев

В работе представлено алгоритм, позволяющий рассчитать толщины линз для объективов с вынесенным зрачком на основании технического задания на оптическую систему и структурной схемы стартовой точки. Алгоритм используется на этапе параметрического синтеза оптической системы.

Введение

На данный момент программное обеспечение (ПО) для проектирования оптических систем (ОС) можно разделить на две группы:

1. ПО для непосредственного проектирования и оптимизации ОС,
2. ПО, осуществляющее поиск аналогов-патентов на ОС на основе заданного технического задания.

К первым относятся такие пакеты, как SUNOPSYS, Zemax, Code V. ПО второй группы представлено пакетом LensView. Помимо этих двух групп, существуют инструменты, заметно облегчающие начальный этап проектирования ОС путем синтеза на основе ТЗ структурной схемы стартовой точки. Это программы GEOS и Struct7, разработанные в СПб ГУ ИТМО. Рассмотрим процесс проектирования ОС с использованием этих инструментов и одного из пакетов из первой группы, например SYNOPSIS. При этом последовательность действий представляется следующим образом:

1. ввод ТЗ в GEOS или Struct7;
2. выбор схемы стартовой точки из предложенных вариантов;
3. ручной расчет параметров поверхностей схемы;
4. ввод схемы в пакет SYNOPSIS;
5. оптимизация схемы средствами последнего.

В этом процессе пункты 1 и 2 – это структурный синтез, 3 – параметрический синтез. Очевидно, что параметрический синтез может быть автоматизирован.

Авторы предлагают алгоритм, производящий параметрический синтез на основании данных, полученных из программ GEOS и Struct7, ТЗ и структурной схемы стартовой точки. Результатом работы алгоритма является файл описания ОС в формате пакета SYNOPSIS, готовый для последующей оптимизации.

Постановка задачи

Разрабатываемый алгоритм должен иметь на входе ТЗ или спецификацию на ОС с указаниями следующих параметров:

- (1) апертурное число;
- (2) фокусное расстояние;
- (3) задний фокальный отрезок;
- (4) спектральный интервал;
- (5) качество изображения выраженное в диаметре кружка Эри;
- (6) угол поля зрения.

Для дальнейшего выполнения алгоритма необходима структурная схема стартовой точки, полученная из программ GEOS или Struct7 в виде строки вида

$E1 + E2 + \dots,$

где $E1, E2$ – элементы системы (линзы). Форма записи линз следующая:

$ET S1S S1T S2T S2S\dots$

Здесь:

- ET – тип элемента, который может принимать следующие значения: Y – элемент для получения широкоугольных ОС; B – базовый (силовой) элемент; K – коррекционный элемент; C – элемент для развития светосилы системы.
- S1S и S2S обозначают знак кривизны первой и второй поверхностей линзы соответственно.
- S1T и S2T обозначают тип первой и второй поверхности линзы соответственно и могут принимать следующие значения: O – плоская поверхность; P – поверхность, концентричная центру входного зрачка (перпендикулярная главному лучу); A – апланатическая поверхность; I – близфокальная поверхность; V – поверхность, концентричная центру предмета.

Данная классификация оптических элементов и поверхностей предложена М.М. Русиновым [1]. Примером записи структурной схемы стартовой точки в таком виде может являться следующая запись:

$$K)PP) + B)AP) + K)IO). \quad (1)$$

Схема описывает объектив с вынесением зрачком, состоящий из 3 линз. Первая линза – коррекционный мениск с поверхностями, концентричными центру входного зрачка. Вторая – силовой элемент, у которой первая поверхность – апланатическая, а вторая концентрична центру входного зрачка. Третья – коррекционный элемент с близфокальной и плоской поверхностями.

Построение алгоритма

Нетрудно заметить, что в предложенной выше структурной схеме стартовой точки ОС радиусы кривизны зависят от толщин линз, расстояний между ними и материала, из которого изготовлена линза. Так, например, радиус кривизны первой поверхности первого элемента равен расстоянию от входного зрачка до этой поверхности. Радиусы кривизны следующей поверхности легко рассчитываются на основании данных трассировки главного или апертурного на текущей поверхности. Таким образом, задачей алгоритма параметрического синтеза для достижения требований ТЗ является выбор наилучших значений расстояний между поверхностями и выбора материалов линз.

Алгоритм параметрического синтеза необходимо разделить на две части: 1 – расчет начальных значений для толщин и начальный выбор материалов линз; 2 – изменение имеющихся параметров для достижения требований ТЗ.

На первом этапе синтеза толщины линз устанавливаются с учетом следующих требований:

- (1) для отрицательных линз толщина по оси должна обеспечивать достаточную жесткость, не допускающую ее деформацию как при изготовлении так и после крепления в оправе;
- (2) для положительных линз толщина по краю не должна быть меньше предельного значения, обеспечивающего предохранение линз от выколов края как при обработке, так и при креплении линзы в оправе.

Зависимость толщин линз от диаметра приведена в табл. 1 и 2. Материалы для линз выбираются, исходя из следующих правил: для коррекционных элементов используются флинты, для остальных – кроны. В качестве изначальных материалов можно использовать флинт F7 по каталогу Schott и крон BK7 из того же каталога. Таким образом, последовательность шагов алгоритма на первом этапе следующая:

- (1) расчет на основании ТЗ высоты апертурного луча и угла наклона главного на входном зрачке;
- (2) расчет высот лучей на следующей поверхности;
- (3) расчет кривизны поверхности;

- (4) расчет расстояния до следующей поверхности;
- (5) выбор материала поверхности в зависимости от типа элемента, к которому первая принадлежит;
- (6) расчет высот и углов преломленных лучей на текущей поверхности;
- (7) переход к следующей поверхности.

Характеристика линзы		Наименьшая толщина линзы по оси			
форма	диаметр D, мм	до 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 2,0	свыше 2,0
Двояковогнутые	до 50	0,15D	0,12D	0,12D	0,10D
	50 – 120	0,12D	0,12D	0,10D	0,08D
	120 – 260	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D
	260 – 500	0,10D	0,08D	0,08D	0,08D
Выпукловогнутые	до 50	0,12D	0,12D	0,10D	0,10D
	50 – 120	0,12D	0,10D	0,08D	0,08D
	120 – 260	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D
	260 – 500	0,10D	0,10D	0,08D	0,08D

Таблица 1. Зависимость толщины отрицательной линзы по оси от ее диаметра

Диаметр линзы D, мм	Наименьшая толщина по краю t, мм	Диаметр линзы D, мм	Наименьшая толщина по краю t, мм
До 6	1,0	80 – 120	3,0
6 – 10	1,2	120 – 180	4,0
10 – 18	1,5	180 – 260	5,0
18 – 30	1,8	260 – 360	6,0
30 – 50	2,0	360 – 500	7,0
50 – 80	2,5		

Таблица 2. Зависимость толщина положительной линзы по краю от ее диаметра

На следующем этапе происходит варьирование толщин базовых элементов для получения необходимого заднего фокусного отрезка. На этом этапе определяется вторая производная функции зависимости заднего фокального отрезка от толщины текущего элемента, и на основе этих данных происходит предсказание необходимого значения толщины [2]. Таким же образом реализовано варьирование толщин коррекционных элементов для достижения минимального значения поперечных абераций.

Результаты тестирования алгоритма

Первая фаза алгоритма тестировалась на простых и среднесложных системах (индексы сложности 2 и 8 по классификации М.М. Русинова [1], соответственно). Алгоритм обнаружил устойчивость работы и определения всех необходимых параметров элементов системы. Также, благодаря тестированию, были выявлены структурные схемы стартовых точек генерируемых программами GEOS и Struct7, реализация которых невозможна.

Во время тестирования на системе с индексом сложности 2, ТЗ, представленным в табл. 3, и структурной схемой 1 была получена система, представленная на рис. 1. Далее система была сохранена в файл формата пакета SYNOPSIS, в котором была прове-

дена окончательная правка. Полученная система удовлетворяет требованиям ТЗ. Значения аббераций ОС представлены в табл. 4.

Параметр	Значение
Угол поля зрения	15 °
Спектральный интервал	25 нм
Задний фокальный отрезок	15 мм
Фокусное расстояние	30 мм
Апертурное число	2.8

Таблица 3. Техническое задание

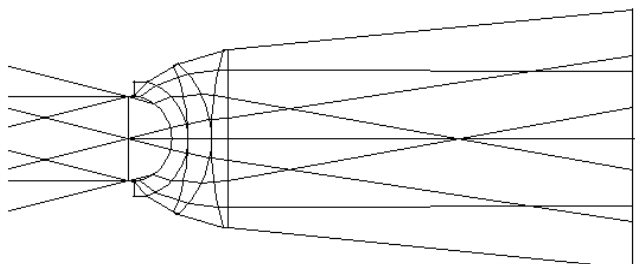


Рис. 1. ОС после первой фазы синтеза

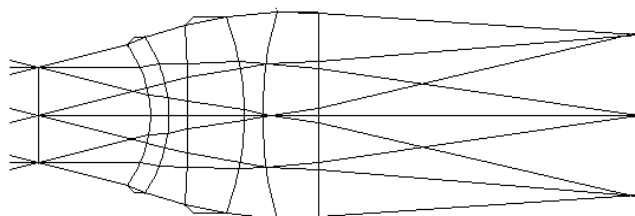


Рис. 2. ОС после правки в пакете SYNOPSIS

Тип	Значение
Сферическая	-0.00057
Кома	0.03213
Астигматизм тангенсальный	-0.05427
Саггитальный астигматизм	-0.04496
Дисторсия	-0.03513

Таблица 4. Абберации ОС

Заключение

Авторами разработан алгоритм, позволяющий значительно сократить время затрачиваемое проектировщиком на этап первоначального параметрического синтеза ОС. Алгоритм может быть использован совместно с ПО GEOS и Struct7. Алгоритм реализован для класса ОС типа фотообъектив с вынесенным зрачком, но в будущем будет доработан и может быть использован для параметрического синтеза других классов фотообъективов.

Литература

1. Русинов М.М. Техническая оптика: Учебное пособие для вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 488 с. ил.
2. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 270 с. ил.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА И РАСЧЕТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ю.В. Романенко (Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета), А.М. Рачеева
Научный руководитель – к.т.н., доцент Г.В. Разумовский

Описывается методика оценки надежности отдельных операторов при выполнении технологического процесса и вероятности успешного выполнения всего технологического процесса расчетом операторов.

Введение

На надежность системы «человек-машина» влияют три фактора: надежность аппаратуры (вероятность безотказной работы аппаратуры), надежность программного обеспечения (вероятность, что программная компонента произведет правильные результаты) и надежность оператора (вероятность, что оператор системы не допустит ошибок и выполнит операцию в заданное время). Последняя составляющая имеет больший вес, поскольку по статистике более 60% аварий происходит по вине человека. Исследования показывают, что при однократном резервировании технических устройств квалифицированным оператором надежность системы оказывается выше, чем при использовании четырехкратного технического резервирования. С другой стороны, отсутствие у оператора должной подготовки может свести к нулю даже самый высокий уровень надежности технических устройств. Это обстоятельство, а также сложная структура систем и комплексов, опасность выполняемых операций, неизбежная потеря практических навыков работы операторов в периоды ожидания между реальными процессами требуют периодического контроля готовности операторов к выполнению поставленных задач. Для объективной оценки текущего состояния готовности операторов к выполнению операций технологических процессов, предупреждения возникновения аварий и нештатных ситуаций вследствие неверных или несвоевременных действий человека необходимы математическая модель, методы и средства оценки надежности работы каждого оператора в отдельности и боевых расчетов в целом.

В настоящее время отсутствует единый концептуальный подход к исследованию вопросов оценки надежности операторов. Отдельные исследовательские работы носят теоретический характер и не имеют широкого практического применения [1–6]. Кроме того, в работах отсутствуют методики, позволяющие применять на практике показатели надежности работы оператора для прогнозирования вероятности успешного выполнения технологического процесса. Актуальной представляется задача разработки комплексной методики оценки надежности отдельных операторов при выполнении технологического процесса и расчета операторов в целом (оценки успешности выполнения процесса).

Цикл деятельности оператора представляет собой чередование двух фаз: фаза работы (выполнение действий в реальном процессе на реальном оборудовании) и фазы ожидания, когда оператор не участвует в реальном технологическом процессе. Если фаза ожидания невелика, то надежность оператора будет определяться только качеством его работы в реальном процессе. Если фаза ожидания существенна (она может продолжаться несколько месяцев), то происходит потеря квалификации, и необходима аттестация, которая позволит скорректировать прогноз надежности оператора за прошедший период. Аттестация является средством проверки подготовленности оператора к практической работе. Она может проводиться на реальных макетах либо с использованием средств моделирования работы операторов в технологических процессах. В большинстве случаев построить реальные макеты технологического оборудования невозможно, на них трудно смоделировать нештатную ситуацию, и они требуют больших

затрат, поэтому аттестацию операторов целесообразно проводить на моделях, построенных на основе современных информационных технологий.

Оценка надежности выполнения оператором операции технологического процесса

В предлагаемой модели надежность выполнения оператором одной операции технологического процесса определяется двумя факторами: своевременность (выполнение операции в установленные сроки) и безошибочность (недопущение ошибок при выполнении операции). Поэтому число допущенных ошибок и время выполнения операции в реальных работах и при аттестации являются основными исходными данными для вычисления надежности работы оператора.

Оценка надежности оператора выполняется перед проведением очередной реальной работы. При этом используются статистические данные, накопленные по всем предыдущим реальным работам, и результаты аттестаций, проведенных после последней реальной работы. Число выполнения операции в реальных работах и аттестациях после последней реальной работы должно быть не менее двух.

Оценка надежности выполнения оператором операции технологического процесса выполняется по следующей методике.

1. Расчет вероятности своевременного выполнения оператором одной операции технологического процесса на основе статистики его работы в реальных процессах:

$$P_{\text{св}}^{\text{практ}}(O, \tau) = \int_0^{\tau} \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_r)^2}{2\sigma_r^2}} dx, \quad (1)$$

$$\mu_r = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} t_i^r, \quad (2)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} (t_i^r - \mu_r)^2}, \quad (3)$$

где τ – предельное (заданное) время выполнения операции; n_r – число выполнения операции в реальных процессах; t_i^r – время выполнения операции при выполнении в i -ой реальной работе. При выводе формулы (1) были сделаны следующие допущения:

- в качестве предельного закона распределения времени выполнения операции принято нормальное распределение;
- условия выполнения одной и той же операции одинаковы;
- фактическое время выполнения операции не зависит от времени предыдущих выполнений.

Приведенная методика расчета вероятности своевременного выполнения оператором отдельной операции технологического процесса позволяет учесть стабильность работы оператора за весь период наблюдения. Чем больше разброс времени выполнения оператором одной операции (при условии, что предельное заданное время и условия выполнения операции были одинаковыми), тем меньше вероятность своевременного выполнения операции.

2. Расчет вероятности безошибочного выполнения оператором операции технологического процесса на основе статистики его работы в реальных процессах:

$$P_{\text{б/о}}^{\text{практ}}(O) = e^{-\frac{\sum_{i=1}^{n_r} N_i^r}{n_r}}, \quad (4)$$

где n_r – число выполнения операции в реальных процессах; N_i^r – число допущенных ошибок при выполнении i -ой реальной работы.

3. Расчет надежности выполнения оператором операции по статистике его работы в реальных процессах.

Надежность выполнения оператором операции технологического процесса является интегрированным показателем, который может быть представлен как разложение вектора \vec{d} по базису $(\vec{d}_{св}, \vec{d}_{б/о})$, задающему двумерное пространство D ,

$$\vec{d} = a_1 \vec{d}_{св} + a_2 \vec{d}_{б/о},$$

где a_1, a_2 – координаты вектора \vec{d} в пространстве D . Интерпретация значений координат вектора надежности оператора заключается в том, что они определяют своевременность и безошибочность его работы при выполнении операции: a_1 – своевременность выполнения операции O , рассчитанная по формуле (1), a_2 – безошибочность выполнения операции O , рассчитанная по формуле (4).

Численным выражением значения надежности выполнения оператором операции O является нормированная длина вектора \vec{d} :

$$|\vec{d}| = \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2}{2}}.$$

Представление надежности выполнения оператором операции технологического процесса в виде вектора в двумерном пространстве позволяет:

- разложить обобщенный показатель надежности выполнения операции оператором на составляющие и оценить каждую из них в отдельности;
- оценить изменение надежности оператора в целом и каждой ее составляющей в отдельности в процессе подготовки, реальной работы оператора или ожидания между реальными работами;
- сравнить двух операторов, имеющих одинаковую надежность выполнения операции, которые при этом могут существенно различаться в своевременности и безошибочности работы;
- более точно определить направления подготовки и повышения квалификации оператора при уменьшении его общей надежности;
- расширить, при необходимости, размерность пространства и ввести дополнительные характеристики, влияющие на надежность оператора.

Таким образом, надежность выполнения оператором операции O технологического процесса в заданное время τ по данным его реальной работы может быть вычислена следующим образом:

$$P^{\text{практ}}(O, \tau) = \sqrt{\frac{P_{св}^{\text{практ}}(O, \tau)^2 + P_{б/о}^{\text{практ}}(O)^2}{2}}.$$

4. Расчет вероятностей своевременного и безошибочного выполнения операции, а также надежности работы оператора по данным, полученным в аттестациях, выполняется аналогичным образом по следующим формулам:

$$P_{св}^{\text{атт}}(O, \tau) = \int_0^{\tau} \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_a)^2}{2\sigma_a^2}} dx,$$

$$\mu_a = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} t_i^a, \quad (5)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} (t_i^a - \mu_a)^2}, \quad (6)$$

$$P_{\text{б/о}}^{\text{атт}}(O) = e^{-\frac{\sum_{i=1}^{n_a} N_i^a}{n_a}}.$$

Здесь n_a – число выполнения операции в аттестациях после последней боевой работы; t_i^a – время выполнения операции при выполнении i -ой аттестации после последней боевой работы; N_i^a – число допущенных ошибок при выполнении i -ой аттестации после последней боевой работы.

$$P^{\text{атт}}(O, \tau) = \sqrt{\frac{P_{\text{св}}^{\text{атт}}(O, \tau)^2 + P_{\text{б/о}}^{\text{атт}}(O)^2}{2}}.$$

5. Расчет общей надежности выполнения оператором операции технологического процесса за время τ выполняется следующим образом:

$$P(O, \tau) = \frac{P^{\text{практ}}(O, \tau) + P^{\text{атт}}(O, \tau)}{2}. \quad (7)$$

При этом предполагается, что оценки надежности выполнения оператором операции технологического процесса, полученные по результатам реальной работы и по результатам аттестации, независимы и равнозначны.

Оценка надежности расчета при выполнении технологического процесса

Методика оценки надежности расчета при выполнении технологического процесса в штатном режиме базируется на представлении технологического процесса в виде сетевого графика (рис. 1).

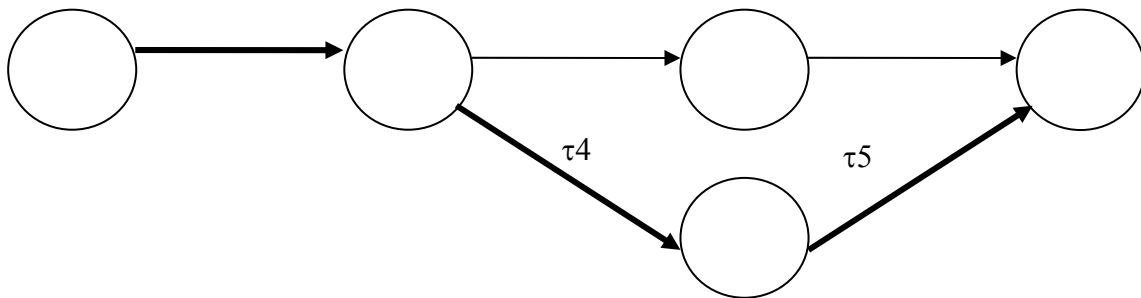


Рис. 1. Сетевой график технологического процесса

Каждая дуга сетевого графика описывает выполнение некоторой операции технологического процесса одним оператором и характеризуется предельным заданным временем ее выполнения. Критическим путем называется последовательность операций (дуг на сетевом графике), несвоевременное выполнение хотя бы одной из которых приводит к несвоевременному выполнению технологического процесса в целом. На сетевом графике критический путь обозначен жирными линиями. Под успешным выполнением технологического процесса заданным составом операторов будем понимать своевременное выполнение операций критического пути при безошибочном выполнении всех операций технологического графика. Расчет вероятности успешного выполнения технологического процесса выполняется по следующей методике.

1. Расчет вероятности своевременного выполнения технологического процесса расчетом операторов на основе статистики их работы в предыдущих реальных процессах:

$$P_{\text{св}}^{\text{практ}}(P, T) = \int_0^T \frac{1}{\sigma_r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M_r)^2}{2\sigma_r^2}} dx,$$

$$M_r = \sum_{j=1}^N \mu_j^r, \quad \sigma_r = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sigma_j^r}.$$

Здесь T – предельное время выполнения всего технологического процесса; N – число операций технологического графика, входящих в критический путь; M_r – математическое ожидание времени выполнения технологического процесса данным расчетом по результатам выполнения реальных процессов; σ_r – среднее квадратичное отклонение времени выполнения технологического процесса данным расчетом по результатам реальных процессов; μ_j^r – математическое ожидание времени выполнения j -ой операции технологического процесса, принадлежащей критическому пути, отдельным оператором по результатам выполнения реальных процессов (рассчитывается по формуле 2); σ_j^r – среднее квадратичное отклонение времени выполнения j -ой операции технологического процесса, принадлежащей критическому пути, отдельным оператором по результатам выполнения реальных процессов (рассчитывается по формуле 3).

2. Расчет вероятности безошибочного выполнения технологического процесса расчетом операторов на основе статистики их работы в предыдущих реальных процессах:

$$P_{\text{б/о}}^{\text{практ}}(P) = e^{-\sum_{j=1}^L \eta_j^r}, \quad (8)$$

где L – число всех операций технологического графика; η_j^r – среднее число ошибок при выполнении j -ой операции технологического процесса отдельным оператором в реальных процессах. Формула (8) получена в предположении, что операторы при выполнении операций работают независимо (допускают ошибки независимо друг от друга или, как говорят применительно к надежности, операторы «независимы по отказам»).

3. Расчет надежности расчета при выполнении технологического процесса на основе статистики их работы в предыдущих реальных процессах:

$$P^{\text{практ}}(P, T) = \sqrt{\frac{P_{\text{св}}^{\text{практ}}(P, T)^2 + P_{\text{б/о}}^{\text{практ}}(P)^2}{2}}.$$

4. Расчет вероятностей своевременного и безошибочного выполнения технологического процесса расчетом, а также надежности расчета по данным, полученным в аттестациях, проведенных после последней реальной работы, выполняется аналогичным образом по следующим формулам:

$$P_{\text{св}}^{\text{атт}}(P, T) = \int_0^T \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-M_a)^2}{2\sigma_a^2}} dx,$$

$$M_a = \sum_{j=1}^N \mu_j^a, \quad \sigma_a = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sigma_j^a},$$

$$P_{\delta/o}^{att}(P) = e^{-\sum_{j=1}^L \eta_j^a},$$

$$P^{att}(P, T) = \sqrt{\frac{P_{св}^{att}(P, T)^2 + P_{\delta/o}^{att}(P)^2}{2}}.$$

Здесь T – предельное время выполнения всего технологического процесса; N – число операций технологического графика, входящих в критический путь; L – число всех операций технологического графика; M_a – математическое ожидание времени выполнения технологического процесса данным расчетом по результатам аттестаций, проведенных после последнего реального процесса; σ_a – среднее квадратичное отклонение времени выполнения технологического процесса данным расчетом по результатам аттестаций, проведенных после последнего реального процесса; μ_j^a – математическое ожидание времени выполнения j -ой операции технологического процесса, принадлежащей критическому пути, отдельным оператором по результатам аттестаций, проведенных после последнего реального процесса (рассчитывается по формуле 5); σ_j^a – среднее квадратичное отклонение времени выполнения j -ой операции технологического процесса, принадлежащей критическому пути, отдельным оператором по результатам аттестаций, проведенных после последнего реального процесса (рассчитывается по формуле 6); η_j^a – среднее число ошибок при выполнении j -ой операции технологического процесса отдельным оператором по результатам аттестаций, проведенных после последнего реального процесса.

5. Расчет общей надежности расчета при выполнении технологического процесса за время T выполняется следующим образом:

$$P(P, T) = \frac{P^{п\text{ракт}}(P, T) + P^{att}(P, T)}{2}. \quad (9)$$

Применение методики

Рассмотрим пример использования описанной методики на практике.

Пусть технологический процесс P (рис. 2) состоит из четырех операций: O_1 , O_2 , O_3 , O_4 . Каждую операцию выполняет отдельный оператор. Операции O_2 , O_3 , O_4 принадлежат критическому пути. Плановое время (предельно допустимое) выполнения операции O_1 – 2 часа, операции O_2 – 4 часа, операции O_3 – 3 часа, операции O_4 – 3 часа, длина критического пути – 10 часов. По представленной ниже статистике выполнения операций операторами в реальных процессах и аттестациях необходимо рассчитать надежность отдельного оператора при выполнении технологического процесса и надежность расчета при выполнении технологического процесса.

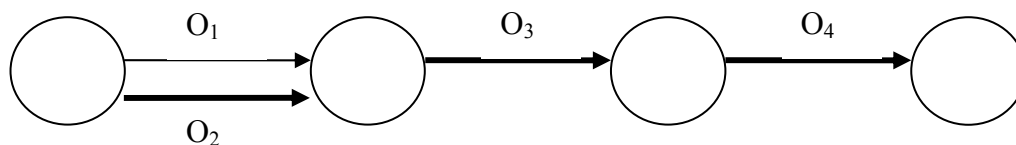


Рис. 2. Сетевой график технологического процесса

$T1A=(1.9 \ 2.2 \ 2.3)$ – время выполнения оператором операции O_1 по результатам трех аттестаций;

$N1A=(1 \ 2 \ 0)$ – количество допущенных ошибок при выполнении оператором операции O_1 по результатам трех аттестаций;

$T1B=(1.9 \ 2.2 \ 2.2 \ 1.9 \ 1.9)$ – время выполнения оператором операции O_1 при выполнении в пяти реальных процессах;

$N1B=(1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_1 в пяти реальных процессах;

$T2A=(4 \ 4.1 \ 3.8 \ 3.8 \ 3.9)$ – время выполнения операции O_2 по результатам пяти аттестаций;

$N2A=(1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_2 по результатам пяти аттестаций;

$T2B=(4 \ 3.9 \ 4.2)$ – время выполнения оператором операции O_2 при выполнении в трех реальных процессах;

$N2B=(1 \ 0 \ 1)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_2 в трех реальных процессах;

$T3A=(2.9 \ 2.8 \ 3 \ 2.8)$ – время выполнения операции O_3 по результатам четырех аттестаций;

$N3A=(1 \ 2 \ 0 \ 1)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_3 по результатам четырех аттестаций;

$T3B=(2.8 \ 2.9)$ – время выполнения оператором операции O_3 при выполнении в двух реальных процессах;

$N3B=(2 \ 1)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_3 в двух реальных процессах;

$T4A=(2.8 \ 2.7 \ 2.8)$ – время выполнения операции O_4 по результатам четырех аттестаций;

$N4A=(1 \ 0 \ 0)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_4 по результатам трех аттестаций;

$T4B=(2.7 \ 2.8 \ 2.8)$ – время выполнения оператором операции O_4 при выполнении в трех реальных процессах;

$N4B=(0 \ 0 \ 0)$ – количество допущенных ошибок при выполнении операции O_4 в трех реальных процессах.

Рассчитывая надежность операторов при выполнении технологического графика по формуле (7), получаем: $P(O_1,2) = 0.4$, $P(O_2,4) = 0.622$, $P(O_3,3) = 0.715$, $P(O_4,3) = 0.932$. Надежность расчета при выполнении технологического процесса, рассчитанная по формуле (9), равна $P(P,10) = 0.59$.

Заключение

Описанная методика формализует процесс оценки надежности операторов и расчета в целом при выполнении технологического процесса на основе статистики, полученной в реальных работах и по результатам аттестаций. По полученным оценкам на-

дежностей оператора можно определить, выполнение каких операций вызывает у оператора наибольшие трудности. С помощью оценки надежности расчета можно сформировать наиболее надежный расчет для следующего выполнения технологического процесса в реальной работе. Для практической апробации методики разработан программный комплекс, который используется для оценки надежности работы операторов и расчета при выполнении технологических процессов подготовки и пуска ракетносителей на космодроме.

Литература

1. Смагин В.А. Техническая синергетика. Вероятностные модели сложных систем. – СПб, 2004. – 171 с.
2. Том И.Э., Красько О.В. Моделирование алгоритмов деятельности оператора в нестандартных ситуациях // Вестник национальной академии наук Белоруссии, сер. физ.-техн. науки. – Минск, 2000. – №1. – С.112–116.
3. Ложкин Г.В., Повякель Н.И. Практическая психология в системах «человек–техника». – М.: МГУПП, 2003. – 296 с.
4. Деревянкин А.А. Исследование, разработка и применение методов оценки надежности персонала при проведении вероятностного анализа безопасности атомных станций: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. – 250 с.
5. Гурдзибеев А.Р. Исследование и разработка методов и алгоритмов имитационного моделирования для тренажеров операторов сложных объектов: Дис. ... канд. техн. наук. Владикавказ, 2004. – 188 с.
6. Павлов И.В. Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний. – М.: Радио и связь, 1982. – 168 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТРИЧНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТЕНЗОР ИНЕРЦИИ ЧЕРЕЗ ОСЕВЫЕ МОМЕНТЫ ИНЕРЦИИ

С.Н. Шаховал

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Г.И. Мельников

Рассматриваются вопросы экспериментального определения тензора инерции тела произвольной формы через систему шести осевых моментов инерции на исполнительных управляемых устройствах. Исследуется проблема влияния расположения пучка осей на точность определения тензора инерции. Определяются оптимальные направления осей с позиции хорошей обусловленности системы линейных алгебраических уравнений и простоты конструкции исполнительного устройства.

Введение

Проблема определения тензора инерции твердого тела в его точке была изучена в работе [1] и в настоящее время развивается в направлении оптимального выбора осей, удовлетворяющих условию хорошей обусловленности системы получаемых алгебраических уравнений и дающих возможность упрощения конструкции исполнительного устройства. Плохая обусловленность определяющих уравнений приводит к большим погрешностям при расчете элементов матрицы инерции – осевых и центробежных моментов инерции. Разрабатываются устройства, удовлетворяющие этим требованиям [2, 3]. В работе рассматриваются способы расположения осей с точки зрения упрощения перевода вращения тела от одной оси к другой, представлены варианты, которые целесообразно применить при проектировании исполнительных робототехнических устройств. Исследована зависимость величины определителя матрицы линейной алгебраической системы от двух либо одного углового параметра, определено оптимальное расположение осей посредством нахождения максимального значения определителя системы уравнений. Исследованы варианты расположения пяти осей на одном конусе с шестой осью, либо направленной вдоль его оси симметрии, либо перпендикулярной к ней. Кроме того, исследован случай, когда оси равномерно распределены по поверхностям двух несовпадающих конусов. Как частный случай (при совпадении конусов) показана плохая обусловленность системы. В результате в каждом из случаев найдено оптимальное расположение пучка осей.

Постановка задачи

Рассматриваются вопросы обусловленности расчетной линейной алгебраической системы уравнений, возникающие в проблеме параметрической идентификации тензора инерции на робототехнических устройствах. Требуется найти оптимальное расположение шести осей, проходящих через заданный центр тестируемого тела, при котором система алгебраических уравнений, связывающих между собой осевые и центробежные моменты инерции относительно декартовых осей с моментами инерции относительно выбранных шести осей, хорошо обусловлена. Для этого определитель матрицы этой системы как функция одного или двух угловых параметров должен быть исследован на экстремум.

Общие формулы, необходимые для решения поставленной задачи

Введем декартову систему координат Oxy с началом O в точке твердого тела. Пусть шесть осей, относительно которых экспериментально определяются моменты инерции, заданы ортами: $\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_6$, $\bar{e}_i = (e_{ix}, e_{iy}, e_{iz})$ ($i=1, \dots, 6$). Выразим моменты

инерции J_{e_1}, \dots, J_{e_6} относительно этих осей через осевые J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} и центробежные J_{xy}, J_{yz}, J_{xz} по формуле [4]:

$$J_{e_i} = J_{xx}e_{ix}^2 + J_{yy}e_{iy}^2 + J_{zz}e_{iz}^2 + 2J_{xy}e_{ix}e_{iy} + 2J_{yz}e_{iy}e_{iz} + 2J_{xz}e_{ix}e_{iz}. \quad (1)$$

В (1) центробежные моменты инерции J_{xy}, J_{yz}, J_{xz} введены по следующим формулам:

$$J_{xy} = -\int_V \rho xy dV, \quad J_{yz} = -\int_V \rho yz dV, \quad J_{xz} = -\int_V \rho xz dV, \quad \text{где } \rho = \rho(x, y, z) \text{ – плотность тела в}$$

точке с координатами (x, y, z) .

Перепишем (1) в матричном виде:

$$I = AJ, \quad (2)$$

где $I = (J_1, \dots, J_6)^T$, $J_i = J_{e_i}$ ($i=1, 2, \dots, 6$), $J = (J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}, J_{xy}, J_{yz}, J_{xz})^T$.

Для дальнейших исследований нам требуется знать определитель матрицы A системы (2) как функцию одной или нескольких переменных. Обозначим:

$$D(\cdot) = \det(A). \quad (3)$$

Для функции (3) выпишем необходимые и достаточные условия экстремума в случаях одной и двух переменных, предполагая ее дифференцируемой достаточное число раз. Пусть $D = D(\alpha)$ является функцией одной переменной. Тогда, если α_0 – точка экстремума, то

$$D'(\alpha_0) = 0. \quad (4)$$

Если выполнено условие

$$D''(\alpha_0) < 0, \quad (5)$$

то эта точка является точкой максимума функции. Если же выполнено условие

$$D''(\alpha_0) > 0, \quad (6)$$

тогда α_0 является точкой минимума функции. Пусть $D = D(\alpha, \beta)$ – функция двух переменных. Тогда, если (α_0, β_0) – точка локального экстремума функции D , то

$$\frac{\partial D}{\partial \alpha}(\alpha_0, \beta_0) = 0, \quad \frac{\partial D}{\partial \beta}(\alpha_0, \beta_0) = 0. \quad (7)$$

Прежде чем выписать достаточные условия локального экстремума функции двух переменных, введем обозначения:

$$E = \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha^2}(\alpha_0, \beta_0), \quad F = \frac{\partial^2 D}{\partial \beta^2}(\alpha_0, \beta_0), \quad G = \frac{\partial^2 D}{\partial \alpha \partial \beta}(\alpha_0, \beta_0), \quad H = EF - G^2.$$

Если $H > 0$, $E > 0$, то (α_0, β_0) – точка минимума. (8)

Если $H > 0$, $E < 0$, то (α_0, β_0) – точка максимума. (9)

Если $H < 0$, то экстремума в этой точке нет. Если $H = 0$, необходимы дополнительные исследования.

Исследование частных случаев расположения осей

Изучим теперь четыре случая расположения пучка шести осей, используя формулы (3)–(9). Будем рассматривать только значения углов между образующими конусов и плоскостью Oxy α и β из интервала: $\alpha, \beta \in (0; \frac{\pi}{2})$.

Случай 1. Одна ось направлена вдоль Ox , а пять осей лежат на круговом конусе. Матрица A системы (2) в этом случае имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha & 0 & \sin^2 \alpha & 0 & 0 & \sin 2\alpha \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{2\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{2\pi}{5} & \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha \sin \frac{\pi}{5} & \sin 2\alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \cos \frac{2\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{\pi}{5} & \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \sin \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \cos \frac{2\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{\pi}{5} & \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha \sin \frac{2\pi}{5} & -\sin 2\alpha \sin \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \cos \frac{\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{2\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{2\pi}{5} & \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha \sin^2 \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \cos \frac{2\pi}{5} \end{pmatrix}.$$

Здесь α – угол между образующими конуса и плоскостью Oxy , подлежащий определению. С учетом обозначения (3) выпишем определитель этой матрицы:

$$D(\alpha) = \frac{25}{2} \sqrt{5} \cos^6 \alpha \sin^4 \alpha.$$

Необходимое условие экстремума (4) в данном случае выражается уравнением

$$D'(\alpha) = \frac{25}{2} \sqrt{5} \cos^5 \alpha \sin^3 \alpha (5 \cos 2\alpha - 1) = 0,$$

откуда находим подозрительную на экстремум точку $\alpha_0 = \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{5}$. Это значение является точкой максимума функции $D(\alpha)$, так как удовлетворяет условию (5). Таким образом, максимальное значение определителя матрицы A достигается при $\alpha_0 = \frac{1}{2} \arccos \frac{1}{5}$: $D_{\max} = D(\alpha_0) = D(\frac{1}{2} \arccos \frac{1}{5}) \approx 0,965981$. Численное значение матрицы A при данном значении параметра

$$A(\alpha_0) = \begin{pmatrix} 0,6 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0,979796 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0572949 & 0,542705 & 0,4 & 0,352671 & 0,931841 & 0,302774 \\ 0,392705 & 0,207295 & 0,4 & -0,570634 & 0,57591 & -0,792672 \\ 0,392705 & 0,207295 & 0,4 & 0,570634 & -0,57591 & -0,792672 \\ 0,0572949 & 0,542705 & 0,4 & -0,352671 & -0,931841 & 0,302774 \end{pmatrix}.$$

Достаточно хорошо обусловленной системой будем считать ту, для которой выполнено условие:

$$|\det(A)| \geq 0,5. \quad (10)$$

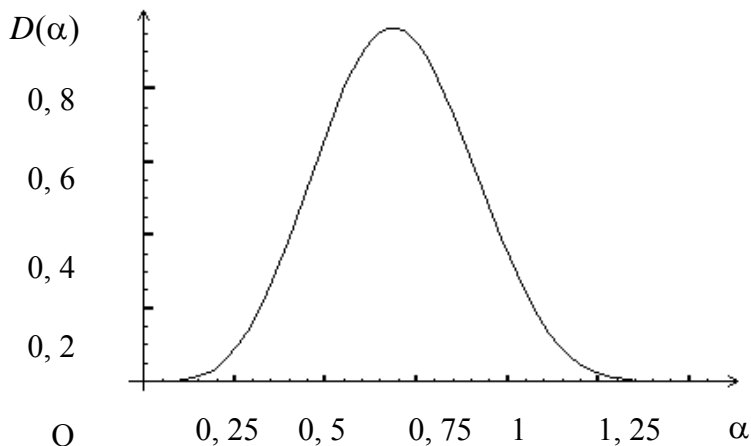


Рис. 1. Зависимость определителя от угла наклона осей

По этому условию определим интервал приемлемых значений угла α . На графике (рис. 1) видно, что допустимы значения $\alpha \in (0, 44; 0, 94)$. В этом случае систему можно считать хорошо обусловленной.

Случай 2. Одна ось направлена вдоль оси симметрии кругового конуса, совпадающей с Oz, а пять осей лежат на нем. В этом случае, очевидно, определитель не равен нулю. Выпишем матрицу A системы уравнений (2) для данного случая и вычислим определитель, а также, учтя (4) и (5), найдем значение угла α между осями и плоскостью Oxy, при котором величина определителя будет максимальной:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{2\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{2\pi}{5} & \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha \sin \frac{\pi}{5} & \sin 2\alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \cos \frac{2\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{\pi}{5} & \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \sin \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \cos \frac{\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{\pi}{5} & \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha \sin \frac{2\pi}{5} & -\sin 2\alpha \sin \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \cos \frac{\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha \cos^2 \frac{2\pi}{5} & \cos^2 \alpha \sin^2 \frac{2\pi}{5} & \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha \sin \frac{\pi}{5} & -\sin 2\alpha \sin \frac{2\pi}{5} & \sin 2\alpha \cos \frac{2\pi}{5} \\ \cos^2 \alpha & 0 & \sin^2 \alpha & 0 & 0 & \sin 2\alpha \end{pmatrix},$$

$$D(\alpha) = \det(A) = \frac{25\sqrt{5}}{2} \cos^8 \alpha \sin^2 \alpha,$$

$$D'(\alpha) = \frac{25\sqrt{5}}{4} \cos^7 \alpha (5 \sin 3\alpha - 11 \sin \alpha) = 0,$$

$$\alpha_0 = \arctg \frac{1}{2},$$

$$D_{\max} = D(\alpha_0) = D(\arctg \frac{1}{2}) = \frac{128}{25\sqrt{5}} \approx 2,2897.$$

Принимая во внимание (10), найдем допустимый интервал значений параметра α . На графике функции $D(\alpha) = \frac{25\sqrt{5}}{2} \cos^8 \alpha \sin^2 \alpha$, приведенном на рис. 2, видно, что $\alpha \in (0, 14; 0, 87)$. При таких значениях угла система является хорошо обусловленной.

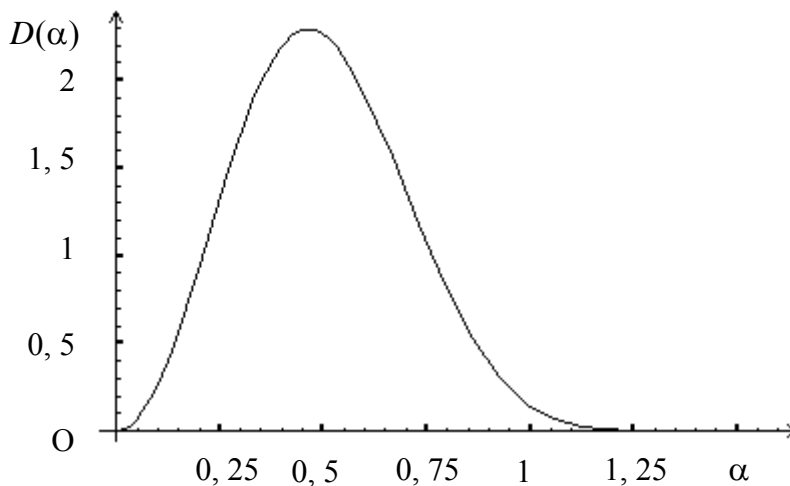


Рис. 2. Зависимость величины определителя от углового параметра

Таким образом, имеем достаточно большой диапазон допустимых значений параметра α , что позволяет выбрать нужное значение с точки зрения простоты конструкции.

Случай 3. Все оси распределены равномерно по поверхностям двух конусов.

Пусть оси, лежащие на первом конусе, образуют с плоскостью Oxy угол α , а на втором – угол β . Будем предполагать, что $\alpha \neq \beta$. Уравнения по-прежнему выражаются в общем виде формулой (2). Матрица A в этом случае выписана ниже:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\cos^2 \alpha}{4} & 0 & \sin^2 \alpha & 0 & 0 & \frac{\sin 2\alpha}{2} \\ \frac{\cos^2 \beta}{4} & \frac{3\cos^2 \beta}{4} & \sin^2 \beta & \frac{\sqrt{3}\cos^2 \beta}{2} & \frac{\sqrt{3}\sin 2\beta}{2} & \frac{\sin 2\beta}{2} \\ \frac{\cos^2 \alpha}{4} & \frac{3\cos^2 \alpha}{4} & \sin^2 \alpha & -\frac{\sqrt{3}\cos^2 \alpha}{2} & \frac{\sqrt{3}\sin 2\alpha}{2} & -\frac{\sin 2\alpha}{2} \\ \frac{\cos^2 \beta}{4} & 0 & \sin^2 \beta & 0 & 0 & \sin 2\beta \\ \frac{\cos^2 \alpha}{4} & \frac{3\cos^2 \alpha}{4} & \sin^2 \alpha & \frac{\sqrt{3}\cos^2 \alpha}{2} & -\frac{\sqrt{3}\sin 2\alpha}{2} & -\frac{\sin 2\alpha}{2} \\ \frac{\cos^2 \beta}{4} & \frac{3\cos^2 \beta}{4} & \sin^2 \beta & -\frac{\sqrt{3}\cos^2 \beta}{2} & \frac{\sqrt{3}\sin 2\beta}{2} & \frac{\sin 2\beta}{2} \end{pmatrix}.$$

Определитель данной матрицы является функцией двух переменных:

$$D(\alpha, \beta) = \det(A) = \frac{27}{2} \cos^2 \alpha \cos^2 \beta \sin(\alpha - \beta) \sin^3(\alpha + \beta).$$

Находим оптимальные значения углов и определителя (как функции двух переменных α и β), используя (7) и (9) и учитывая, что конусы не совпадают ($\alpha \neq \beta$):

$$\alpha_0 = \arccos\left(\sqrt{\frac{2}{15}(5 - \sqrt{5})}\right),$$

$$\beta_0 = \arccos\left(\sqrt{\frac{2}{15}(5 + \sqrt{5})}\right),$$

$$D_{\max} = D(\alpha_0, \beta_0) = \frac{128}{25\sqrt{5}} \approx 2,2897.$$

На рис. 3 показан трехмерный график функции двух переменных $D(\alpha, \beta)$:

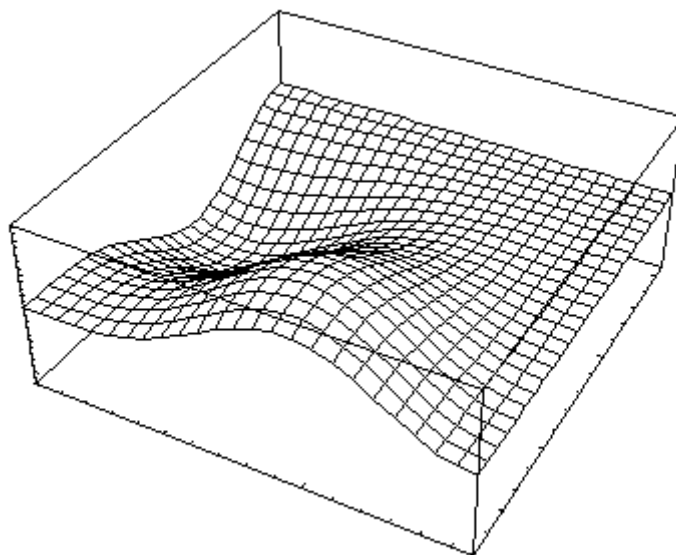


Рис. 3. Определитель в случае двух угловых параметров

Зафиксируем один из углов в оптимальном значении и рассмотрим определитель как функцию одной переменной. Пусть первый параметр:

$\alpha = \alpha_0 = \arccos\left(\sqrt{\frac{2}{15}}(5 - \sqrt{5})\right)$. Тогда получим функцию угла β :

$\tilde{D}(\beta) = D(\alpha_0, \beta) = \det(A) = \frac{27}{2} \cos^2 \alpha_0 \cos^2 \beta \sin(\alpha_0 - \beta) \sin^3(\alpha_0 + \beta)$. Ниже представлен ее график (рис. 4), по которому виден интервал допустимых значений параметра β при фиксированном $\alpha = \alpha_0$: $\beta \in (0; 0,73)$.

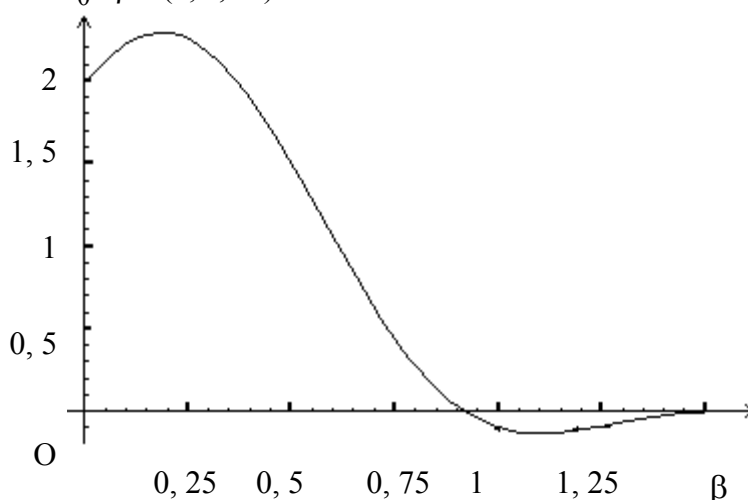


Рис. 4. Определитель в случае, когда один угол фиксирован в точке экстремума

Случай 4. Все оси лежат на поверхности кругового конуса. Теперь рассмотрим случай, когда оси лежат на поверхности конуса, имеющего вершину в начале координат и ось симметрии, совпадающую с осью Oz. Его можно считать частным случаем предыдущего, когда $\alpha = \beta$. Система уравнений имеет общий вид (2). После несложных вычислений получим значение определителя, равное нулю, а значит, случай расположения всех шести осей на одном конусе недопустим.

Заключение

В работе рассмотрены четыре варианта расположения пучков осей, определяемых несколькими варьируемыми в определенных интервалах угловыми параметрами. Изучены вопросы достаточно хорошей определенности расчетных формул для конструкций, рекомендованных к применению. Показано, что случай пучка шести осей, расположенных на одном конусе, не приемлем для применения, поскольку алгебраическая система имеет равный нулю определитель (система плохо обусловлена). В связи с этим и рассматривается расположение осей на двух конусах с различными углами раствора и другие случаи, удобные для технической реализации.

Литература

1. Гернет М.М., Ратобыльский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969.
2. Пат. 2115904 РФ. Способ определения осевого момента инерции тела и устройство для его осуществления / В.Г. Мельников, Г.И. Мельников // Б. И. 1998. № 20.
3. Пат. 2200940 РФ. Способ определения тензора инерции тела и устройство для его осуществления / В.Г. Мельников // Б. И. 2003. № 8.

4. Мельников В.Г., Иванов С.Е., Мельников Г.И. Компьютерные технологии в механике приборных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.

СТАТИСТИКА ПОМЕХ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПРИ ПОМОЩИ МАТРИЦЫ ПЗС-ЭЛЕМЕНТОВ

В.А. Таюрский

Научный руководитель – к.т.н., доцент В.И. Бойков

Рассматриваются типы помех, присутствующих в изображении, полученном при помощи ПЗС-матрицы. Обсуждаются физические и аналитические способы их погашения. В ходе статьи проводится анализ типов помех, обозначается задача помехоподавления и испытывается механизм гауссового размытия на тестовом изображении.

Введение

Во многих технологических и научных процессах требуется средство визуального контроля. В современных условиях использование видеоконфигураторов или пленочных фотопроекторов становится неэффективным. Изображение, формируемое аналоговой видеокамерой, не дает необходимого разрешения для целого спектра задач, а пленочные формираторы изображения приносят большие временные задержки между точкой съемки и получением готовой картинке после проявки. Поэтому для задач микроскопии, а также для исследования других физических процессов, требующих оперативной компьютерной обработки, необходимо использовать цифровые формираторы изображений. Одним из вариантов светочувствительного датчика такого устройства является матрица ПЗС-элементов, состоящая из миллионов пикселей. В данной статье рассматривается классификация ПЗС-матриц, принципы их работы, разбираются проблемы появления помех (шумов) в полученном изображении, а также проводится анализ монохромной интерференционной картины.

Принцип формирования изображения в матрице ПЗС-элементов

В приборах с зарядовой связью преобразование фотона в электрон производится в результате внутреннего фотоэффекта: поглощения светового кванта кристаллической решеткой полупроводника с выделением носителей заряда. Это может быть либо пара «электрон + дырка», либо единичный носитель заряда (последнее происходит при использовании донорных либо акцепторных примесей в полупроводнике).

Основной материал ПЗС-матрицы – кремниевая подложка р-типа - оснащается каналами из полупроводника n-типа, над которыми из поликристаллического кремния изготавливаются прозрачные для фотонов электроды. После подачи на такой электрод электрического потенциала в обедненной зоне под каналом n-типа создается потенциальная яма, назначение которой – хранить заряд, «добываемый» посредством внутреннего фотоэффекта. Количество фотонов, упавших на ПЗС-элемент (пиксель), пропорционально заряду, накопленному ямой.

Считывание заряда (фототока) производится последовательным регистром сдвига, подключенным к самой крайней строке матрицы. Данный регистр представляет собой строку из ПЗС-элементов, заряды которой считываются поочередно. Для этого используются электроды переноса, расположенные в промежутке между ПЗС-элементами. На эти электроды подаются потенциалы, «выманивающие» заряд из одной потенциальной ямы и передающие его в другую.

При синхронной подаче потенциала на электроды переноса обеспечивается одно-временный перенос всех зарядов строки справа налево (или слева направо) за один рабочий цикл. Оказавшийся «лишним» заряд поступает на выход ПЗС-матрицы. Последовательный регистр сдвига преобразует заряды, поступающие на его вход в виде параллельных «цепочек», в последовательность электрических импульсов разной величин-

ны на выходе. Чтобы подать эти параллельные «цепочки» на вход последовательного регистра, опять-таки используется регистр сдвига, но на этот раз параллельный.

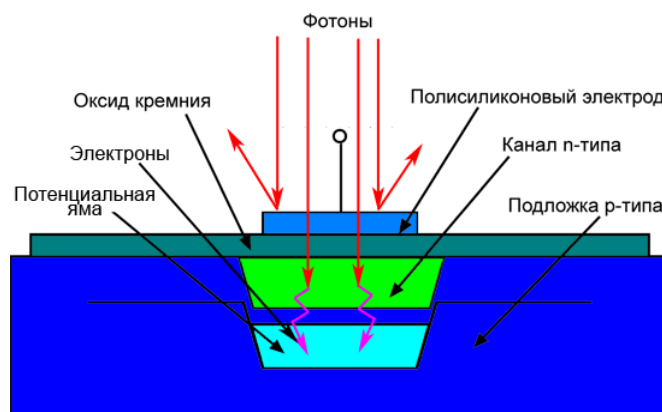


Рис. 1. Пиксель матрицы в разрезе

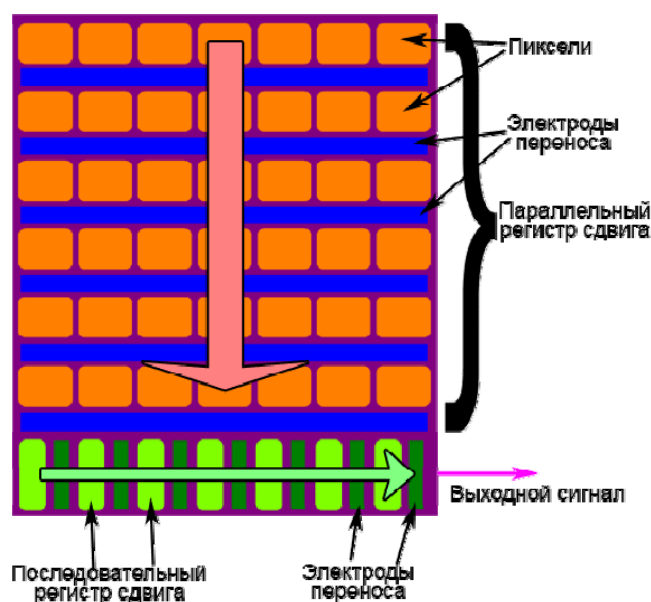


Рис. 2. Принцип формирования изображения в полнокадровой матрице

Матрица представляет собой множество последовательных регистров, называемых столбцами и синхронизированных между собой. В результате за рабочий цикл происходит синхронное «сползание» фототоков вниз, а оказавшиеся «лишними» заряды нижней строки матрицы поступают на вход последовательного регистра.

Указанная выше схема справедлива для полнокадровой ПЗС-матрицы, ее режим работы накладывает ограничение на конструкцию: если в процессе считывания фототоков экспонирование не прекращается, «лишний» заряд «размазывается» по кадру. Необходим в механический затвор, который перекрывает поступление света к сенсору на время, необходимое для считывания зарядов всех пикселей. Такая схема считывания фототоков не позволяет формировать видеопоток на выходе с матрицы, поэтому применяется она только в устройствах, допускающих длительное экспонирование и не требующих вывод видеопотока.

ПЗС-матрицы, используемые для формирования видеозаписи, обеспечивают непрерывный поток импульсов на своем выходе, при этом перекрытие оптического тракта не происходит. Чтобы при этом не происходило «смазывание» изображения, исполь-

зуются ПЗС-матрицы с буферизацией столбцов. В таких сенсорах рядом с каждым столбцом располагается буферный столбец, состоящий из ПЗС-элементов, покрытых непрозрачными полосками (чаще металлическими). Совокупность буферных столбцов составляет буферный параллельный регистр, причем столбцы данного регистра «перемешаны» с регистрирующими свет столбцами.

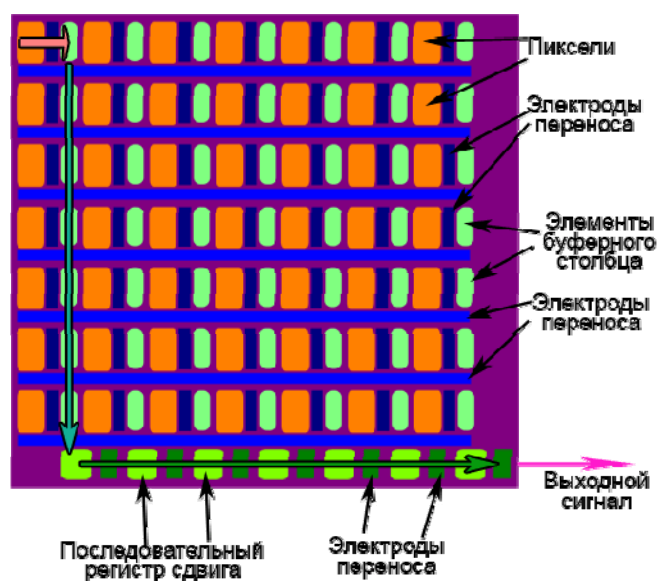


Рис. 3. Принцип формирования изображения в буферизированной матрице

За один рабочий цикл светочувствительный параллельный регистр сдвига отдает все свои фототоки буферному параллельному регистру посредством «сдвига по горизонтали» зарядов, после чего светочувствительная часть снова готова к экспонированию. Затем идет построчный «сдвиг по вертикали» зарядов буферного параллельного регистра, нижняя строка которого является входом последовательного регистра сдвига матрицы.

Очевидно, что перенос заряда матрицы в буферный параллельный регистр сдвига занимает малый интервал времени и перекрывать световой поток механическим затвором нет необходимости – ямы не успеют переполниться. С другой стороны, необходимое время экспонирования, как правило, сравнимо со временем считывания всего буферного параллельного регистра. За счет этого интервал между экспонированием можно довести до минимума – в результате видеосигнал в современных видеокамерах формируется с частотой от 30 кадров в секунду и выше. К примеру, видеокамера фирмы Casio способна записывать видео с частотой 1200 к/с.

Основной минус такой схемы заключается в том, что буферные регистры перекрывают светочувствительную часть площади матрицы, в результате каждому пикселю достается лишь 30% от его общей поверхности. У пикселя полнокадровой матрицы эта область составляет 70%. Для компенсации этого недостатка производители используют микролинзы, располагающиеся над каждым элементом матрицы и фокусирующие весь достающийся пикселю световой поток на сравнительно малую светочувствительную область.

Чувствительность собственно ПЗС-элемента можно разделить на две составляющие. Первая – интегральная чувствительность, представляющая собой отношение величины фототока (в миллиамперах) к световому потоку (в люменах), обеспечиваемому источником излучения. При этом спектральный состав излучения, используемого при измерении интегральной чувствительности, такой же, как и у вольфрамовой лампы накаливания, а сам параметр служит для оценки суммарной (по всему спектру видимого

света) чувствительности пикселя. Второй характеристикой способности ПЗС-элемента реагировать на свет является монохроматическая чувствительность, представляющая собой отношение величины фототока (в миллиамперах) к величине световой энергии излучения (в миллиэлектронвольтах), имеющего строго определенную длину волны. Функция, описывающая зависимость чувствительности от длины волны, то есть способность пикселя фиксировать различные цветовые оттенки, именуется спектральной чувствительностью и представляет собой совокупность всех значений монохроматической чувствительности для данной области спектра.

Таким образом, как интегральная, так и спектральная чувствительность определяется фототоком ПЗС-элемента. Характеристика, описывающая емкость ямы, называется глубиной потенциальной ямы, и именно ею определяется динамический диапазон ПЗС-матрицы. Чем больше площадь светочувствительной области ПЗС-элемента, тем выше доля фотонов, которые могут быть поглощены с созданием носителей заряда. Для этого размеры обвязки (электродов переноса, дренажа и буферных столбцов) должны уменьшаться пропорционально росту числа пикселей.

Параметр, определяющий эффективность регистрации светового излучения ПЗС-элементом, называется квантовой эффективностью и характеризует отношение количества зарегистрированных носителей заряда к количеству попавших на поверхность светочувствительной области фотонов. Поскольку далеко не все носители заряда попадают в потенциальную яму, квантовая эффективность более точно характеризует чувствительность пикселя.

Классификация шумов, возникающих при формировании цифрового изображения

На отношение сигнал-шум влияют шумы аналоговой электроники («обвязка», усилители, АЦП), но основным источником цифрового шума является фотосенсор. Цифровой шум в фотосенсоре классифицируется следующим образом:

- блюминг,
- теневой ток,
- тепловой шум,
- черный дефект,
- стохастический шум,
- шум от «битых» пикселей,
- помехи от гамма-коррекции.

Блюминг проявляется при больших выдержках. Избыточный заряд накапливается в потенциальной яме и стремится «растечься» по соседним пикселям, что на снимке отображается в виде белых пятен, размер которых связан с величиной переполнения. Борьба с блюмингом осуществляется посредством электронного дренажа – отвода из потенциальной ямы избыточного заряда. Существует два основных вида дренажа: вертикальный и боковой. Для реализации вертикального дренажа на подложку ЭОП подается потенциал, который при переполнении глубины потенциальной ямы обеспечивает истечение избыточных электронов сквозь подложку. Минус такой схемы – уменьшение глубины потенциальной ямы, в результате чего сужается динамический диапазон.

Боковой дренаж (рис. 4) осуществляется при помощи специальных «дренажных канавок», в которые «стекают» избыточные электроны. Для формирования этих канавок прокладываются специальные электроды, на которые подается потенциал, формирующий дренажную систему. Другие электроды создают барьер, препятствующий преждевременному «бегству» электронов из потенциальной ямы. При боковом дренаже глубина потенциальной ямы не уменьшается, однако при этом урезается площадь светочувствительной области пикселя. Тем не менее, без дренажа обойтись нельзя, так как блюминг искажает снимок больше, чем все остальные виды помех.

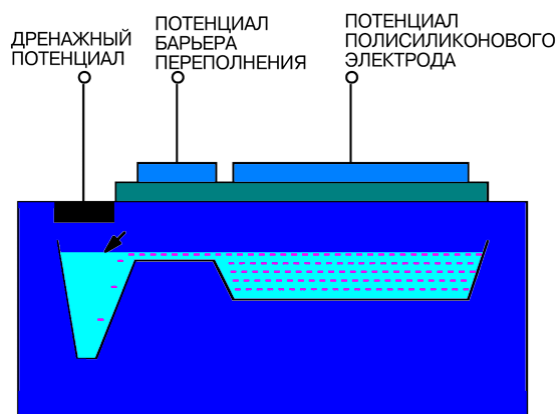


Рис. 4. Антиблуминговый боковой дренаж

Теневой ток оказывает негативное влияние на порог чувствительности, возникающий в ПЗС-элементе в момент подачи потенциала на электрод, под которым создается потенциальная яма. Название «теневой» или «темновой» обусловлено тем, что данный паразитный заряд образуется «просочившимися» в яму электронами, созданными не внутренним фотоэффектом, а термоэлектронной эмиссией, и при его накоплении световые лучи не падали на поверхность сенсора. Если же интенсивность светового потока низка, то генерируемый им фототок может оказаться слабее темнового тока. При этом уровень темнового тока сильно зависит от температуры и возрастает вдвое при нагревании на 9°C . Чтобы определить уровень темнового тока и исключить его величину при считывании фототоков пикселей, расположенные по краям столбцы и строки матрицы покрываются непрозрачным материалом. Составляющие их пиксели называются пикселями темнового тока, и, поскольку генерируемый ими заряд создан термоэлектронной эмиссией, он используется в качестве «отметки черного цвета» для остальных пикселей матрицы.

Тепловой шум также оказывает влияние на порог чувствительности. Данное явление обусловлено хаотичным движением носителей заряда в толще полупроводника, которое не прекращается и при отключении потенциала, подаваемого на электрод. Блуждая в материале матрицы, электроны либо дырки в конце концов притягиваются потенциальной ямой и оседают в ней. Поскольку перед началом экспонирования потенциальная яма «опустошается», количество захваченных ею в процессе съемки «паразитов» тем больше, чем продолжительнее выдержка.

Дефекты (примеси и др.) потенциального барьера вызывают утечку заряда сгенерированного за время экспозиции – так называемый черный дефект. Такие дефекты видны на светлом фоне в виде темных точек.

Из-за шума, возникающего вследствие стохастической природы взаимодействия фотонов света с атомами материала фотодиодов сенсора, при движении фотона внутри кристаллической решетки кремния вероятно, что фотон, «попав» в атом кремния, выбьет из него электрон, родив пару электрон-дырка, но сказать точно, сколько фотонов родит пары, а сколько пропадет с какими-то другими эффектами, нельзя. Электрический сигнал, снимаемый с сенсора, будет соответствовать количеству рожденных пар. Снимаемый сигнал с сенсора при заданных выдержке и диафрагме (интенсивности света) будет определять квантовая эффективность – среднее число рождаемых пар электрон-дырка. Подавление цифрового стохастического шума проводится усреднением (интегрированием по множеству или апертуре для каждого пикселя). Например, одной из распространенных апертурных методик подавления шума является так называемая свертка.

Из-за несовершенства технологии при производстве фотосенсоров возникают дефектные пиксели, которые всегда находятся в одном и том же месте. Для устранения их негативного влияния используются математические методы интерполяции, когда вместо дефектного «подставляется» либо просто соседний элемент, либо среднее по прилегающим элементам, либо значение, вычисленное более сложным способом. Естественно, что вычисленное значение отличается от фактического и ухудшает резкость конечного изображения. Этот же дефект вносит интерполяция, корректирующая конечное изображение, при использовании фильтра Байера.

Гамма-коррекция может осуществляться в электронном тракте или в процессоре. Человеческий глаз имеет логарифмическую чувствительность к свету, а фотосенсоры – линейную, поэтому слабые сигналы усиливаются больше, чем сильные, чтобы изображение имело привычный для человека вид. Часто для этого (и для некоторых других целей) используют таблицы перекодировки, определяющие соответствие входного и выходного сигналов.

При подавлении шума усреднением несколько ухудшается резкость на конечном цифровом изображении.

В дальнейшем сосредоточим внимание на работе с стохастическим шумом, а также различными типами дефектов, так как остальные типы шумов с успехом гасятся известными методами [4].

Подавление шума на интерференционной монохромной картине методом гауссового размытия

В качестве образца возьмем интерференционную картину, полученную при помощи веб-камеры с ПЗС матрицей. Для упрощения будем работать с монохроматизированной картиной (см. рис. 5).

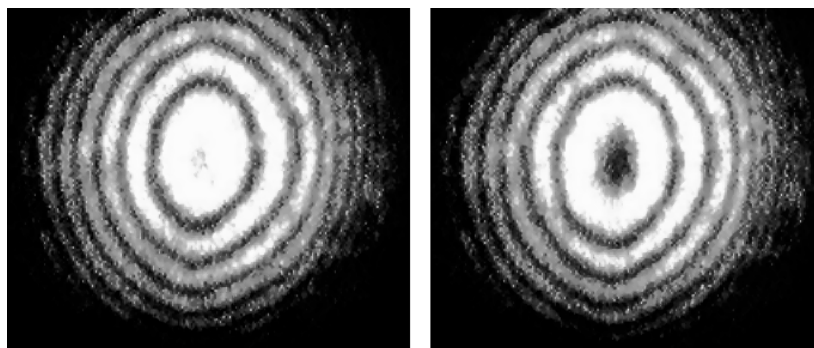


Рис. 5. Образец изображения

Интерференционная картина, возникающая при отражении света от двух поверхностей воздушного зазора между плоской стеклянной пластинкой и наложенной на нее плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны, называется кольцами Ньютона. Радиусы колец Ньютона зависят от длины волны λ падающего света и радиуса кривизны R выпуклой поверхности линзы. В центре картины всегда наблюдается темное пятно. Радиус r_m m -го темного кольца равен

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} = r_1 \sqrt{m}, \quad (1)$$

где r_1 – радиус первого темного кольца. Измеряя на опыте радиусы темных колец, можно определить радиус кривизны R поверхности линзы по известному значению длины волны λ . Спроецируем левую часть рис. 5 на плоскую поверхность и, в зависимости от освещенности, присвоим к каждой точке поверхности соответствующее значение высо-

ты. Получим трехмерную картину, где по осям X и Y располагается изображение образца, а по Z – значения освещенности (см. рис. 7).

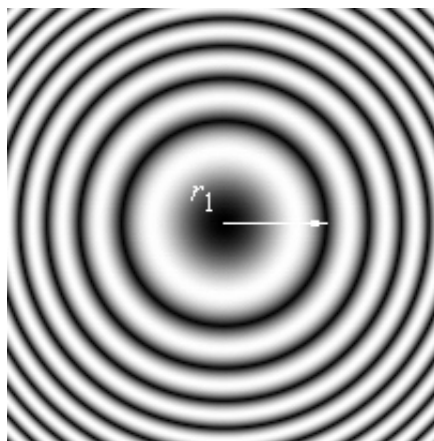


Рис. 6. Теоретическая интерференционная картина

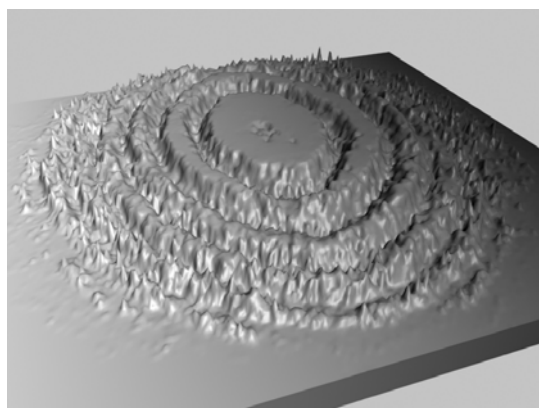


Рис. 7. Распределение точек поверхности по яркости изображения

В отличие от идеальной картины колец, на реальном полученном изображении видны неровности каждого из колец, и мелкие «резкие» всплески. Это стохастические помехи. Избавиться от них можно при помощи алгоритма Гаусса. Применение размытия Гаусса к изображению – то же, что и свертка изображения с гауссовым или нормальным распределением. Так как фурье-преобразование гауссиана есть другой гауссиан, то применение размытия Гаусса дает эффект отсечения высокочастотных компонент изображения, т.е. помех. Размытие по Гауссу – это характерный процесс размытия изображения, который использует нормальное распределение (также называемое Гауссовым распределением, отсюда название) для вычисления преобразования, применяемого к каждому пикселю изображения. Уравнение распределения Гаусса в N измерениях имеет вид:

$$G(r) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} e^{-r^2/(2\sigma^2)}, \quad (2)$$

или, в частном случае, для двух измерений:

$$G(r) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)} e^{-(u^2+v^2)/(2\sigma^2)}, \quad (3)$$

где r – это радиус размытия (вычисляется как $r^2 = u^2 + v^2$), σ – стандартное отклонение распределения Гаусса. В случае двух измерений эта формула задает поверхность,

имеющую вид концентрических окружностей с распределением Гаусса от центральной точки. Пиксели, где распределение отлично от нуля, используются для построения матрицы свертки, которая применяется к исходному изображению. Значение каждого пикселя становится средневзвешенным для окрестности. Исходное значение пикселя принимает наибольший вес (имеет наивысшее гауссово значение), и соседние пиксели принимают меньшие веса, в зависимости от расстояния до них. Как результат, фильтр сохраняет контуры лучше, чем более однородные размывающие фильтры: например, реализация пространственного масштабирования.

Применяем данный фильтр при $r=2,8$ и вычитаем полученное изображение из образцового. Результат – картина отсеянных помех (рис. 8).

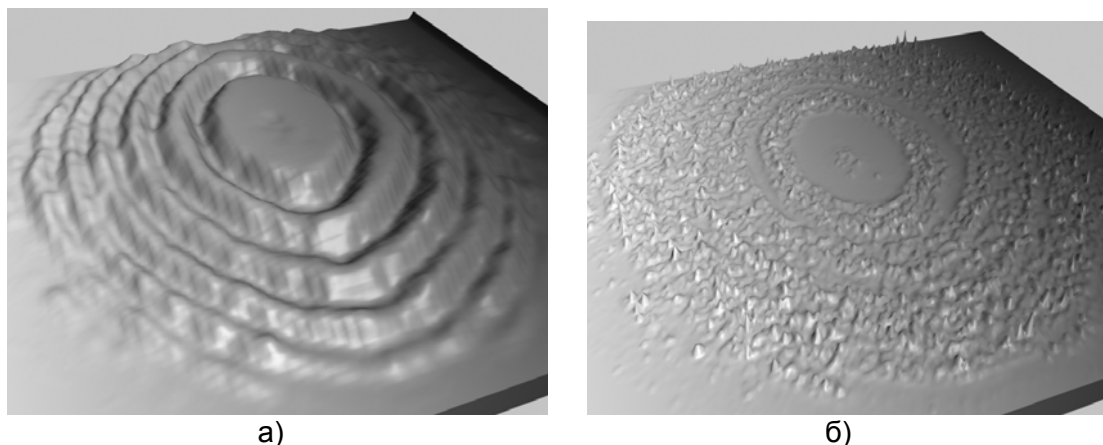


Рис. 8. Результаты применения фильтра Гаусса: а) – сглаженное отфильтрованное изображение; б) – изображение помех, отфильтрованных размывом Гаусса

В результате применения данного фильтра исчезли высокочастотные составляющие помех, однако готовое изображение потеряло резкость. Использование противозащитного фильтра приводит к тому, что изображение приобретает характерные для цифровых фильтров искажения – теряются оттенки на переходах яркости, снижается насыщенность тона, становится видна структура раstra и пр.

Заключение

В статье рассмотрены физические принципы формирования изображения матрицей ПЗС-элементов. Были рассмотрены типы возникающих помех и проведена практическая работа по фильтрации образцового изображения с помощью фильтра Гаусса. В итоге выявилась недостаточность данного метода фильтрации, так как вследствие него наблюдается падение резкости изображения, а также исчезают мелкие детали изображения, отфильтровывающиеся в качестве помех.

Литература

1. Spring K.R., Fellers T.J., Davidson M.W. Introduction to Charge Coupled Devices (CCDs). – Режим доступа: <http://www.microscopyu.com>, 2003.
2. Ландсберг Г.С. Элементарный учебник физики, М., 1970, гл. 3.
3. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. – М.: Мир, 1989.
4. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы). – М.: МГУ, 2002.

НАШИ АВТОРЫ

Арановский Станислав Владимирович – аспирант кафедры систем управления и информатики

Балканова Ольга Германовна – студент кафедры высшей математики

Венгерович Николай Григорьевич – студент Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова

Волков Игорь Сергеевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Воробьёв Андрей Владимирович – аспирант Уфимского государственного авиационного технического университета

Дёмин Сергей Анатольевич – научный сотрудник Казанского государственного университета

Дударев Максим Николаевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Зинатуллин Эмиль Маратович – аспирант Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета

Игнатъев Александр Николаевич – аспирант Новосибирского государственного технического университета

Исаков Алексей Сергеевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Камнев Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Кесслер Юлия Владимировна – Институт Биоорганической химии имени академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН

Кокорев Павел Александрович – студент кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии

Корсун Мария Михайловна – аспирант Новосибирского государственного технического университета

Куликов Игорь Михайлович – аспирант Новосибирского государственного технического университета

Лочехин Алексей Владимирович – аспирант информационно-навигационных систем

Макин Дмитрий Николаевич – аспирант кафедры физики и техники оптической связи

Маслобоев Андрей Владимирович – старший преподаватель Петрозаводского государственного университета (Кольский филиал)

Мокрова Дарья Всеволодовна – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета

Морозов Иван Игоревич – студент Московского физико-технического института

Носкова Юлия Олеговна – аспирант Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН

Орешков Андрей Александрович – аспирант кафедры систем управления и информатики

Охотников Сергей Александрович – студент Уральского государственного университета имени А.М. Горького

Панищев Олег Юрьевич – Татарский государственный гуманитарно-педагогический университет

Пашковский Матвей Александрович – аспирант кафедры физики

Правдин Константин Владимирович – студент кафедры высшей математики

Райский Андрей Петрович – аспирант Белорусского государственного технологического университета

Рачеева Анастасия Михайловна – студент кафедры высшей математики

Римских Мария Владимировна – аспирант кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии

Романенко Юлия Владимировна – Научно-инженерный центр Санкт-Петербургского электротехнического университета

Серегин Александр Николаевич – аспирант кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии

Таюрский Валентин Алексеевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Тепкеева Инна Ивановна аспирант Института биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН

Терещенко Евгения Николаевна – аспирант кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии

Тихонова Наталья Геннадьевна – аспирант кафедры лазерные технологии и экологическое приборостроение

Федоров Евгений Андреевич – аспирант кафедры систем управления и информатики

Чаадаева Александра Владимировна – аспирант Института биоорганической химии имени академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН

Шаховал Сергей Николаевич – аспирант кафедры теоретической и прикладной механики.

Яценко Александр Викторович – аспирант Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета

ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ, БИМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТОМОГРАФИЯ.....	3
Воробьев А.В. Методика цифровой фильтрации сигнала при мониторинге параметров магнитосферы земли в реальном времени	3
Зинатуллин Э.М., Дёмин С.А., Яценко А.В., Панищев О.Ю. Корреляционные и релаксационные особенности нервно-мышечной системы человека при старении	8
Мокрова Д.В. О некоторых особенностях динамики оксигенации кровенаполненных тканей при лазерном воздействии.....	19
Тепкеева И.И., Кесслер Ю.В. Пептидные экстракты из лекарственного растительного сырья и первичные испытания <i>in vivo</i> на мышинной модели рака молочной железы	28
Терещенко Е.Н. Позитронно-эмиссионное изображение как средство определения коэффициента диффузии	37
Римских М.В. Методы преобразования Фурье и квадратур с регуляризацией для восстановления смазанных изображений в MATLAB'e	39
Тихонова Н.Г. Биологические методы, используемые для оценки загрязнения окружающей урбанизированной среды	52
Носкова Ю.О., Чаадаева А.В. Исследование эффективности ИЛ-2 при неполном удалении спонтанного рака молочных желез мышей	57
Охотников С.А. Моделирование динамики нелинейного сокращения саркомера	67
Макин Д.Н., Венгерович Н.Г. Применение фуллеренов в биоактивных раневых покрытиях	78
Кокорев П.А. Анализ артефактов изображений в компьютерной томографии.....	84
Серегин А.Н. Система управления учебным ЯМР-томографом.....	88
Райский А.П. Идентификация распространенных в Беларуси бактериофагов лактококков.....	92
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	97
Арановский С.В. Идентификация частоты смещенного синусоидального сигнала.....	97
Балканова О.Г., Правдин К.В. Уравнение Пелля и системы уравнений второй степени с параметрами.....	105
Дударев М.Н. Анализ процессов в динамической цепи с преобразованием сигнала типа «модуляция-демодуляция-фильтрация»	113
Федоров Е.А. Исследование информационных характеристик асинхронного электропривода.....	119
Исаков А.С. Адаптивный наблюдатель состояний асинхронного двигателя в бездатчиковой системе векторного управления.....	126
Корсун М.М., Игнатьев А.Н. Применение технологии выделения поля при конечноэлементном моделировании квадрупольной линзы	132
Куликов И.М. Трехмерное моделирование самогравитирующего газа.....	142
Лочехин А.В. Проблемы построения корабельных интегрированных систем ориентации и навигации	151
Маслобоев А.В. Автоматизированная система поиска потенциальных бизнес-партнеров в виртуальной среде.....	161

Морозов И.И. Моделирование режимов глобальных электрических энергосетей	170
Орешков А.А., Волков И.С., Камнев Д.А. Меры оценки количества информации пространственного сигнала	179
Пашковский М.А. Алгоритм поиска толщин линз для объективов с вынесенным зрачком на этапе выбора стартовой точки	184
Рачеева А.М., Романенко Ю.В. Методика оценки надежности работы оператора и расчета при выполнении технологического процесса.....	188
Шаховал С.Н. Исследование матричных алгебраических уравнений, определяющих тензор инерции через осевые моменты инерции	196
Таюрский В.А. Статистика помех изображения, полученного при помощи матрицы ПЗС-элементов	202
НАШИ АВТОРЫ	210

**Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 47.
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ /**
Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО,
2008. – 214 с.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО
Выпуск 47**

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Главный редактор
доктор технических наук, профессор
В.О. Никифоров
Дизайн обложки В.А. Петров, А.А. Колокольников
Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.
Подписано в печать 10.04.08.
Заказ 1187. Тираж 100 экз.