

Ю.В. Бабенко, А.И. Михалёв, Р.В. Кирия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ КОНВЕЙЕРНОГО ПОДЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА С БУНКЕРАМИ

Аннотация. Разработана имитационная модель функционирования системы подземного транспорта древовидной структуры с аккумулятивными бункерами. Данная имитационная модель предоставляет возможность проводить моделирование работы систем подземного транспорта при различных входных параметрах, что позволяет детальнее исследовать процесс ее работы. Проведено сравнение основных показателей имитационной модели, полученных в результате имитационного моделирования, с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: системы конвейерного транспорта, аккумулятивный бункер, имитационная модель, функционирование, пропускная способность, самоподобная структура.

Введение

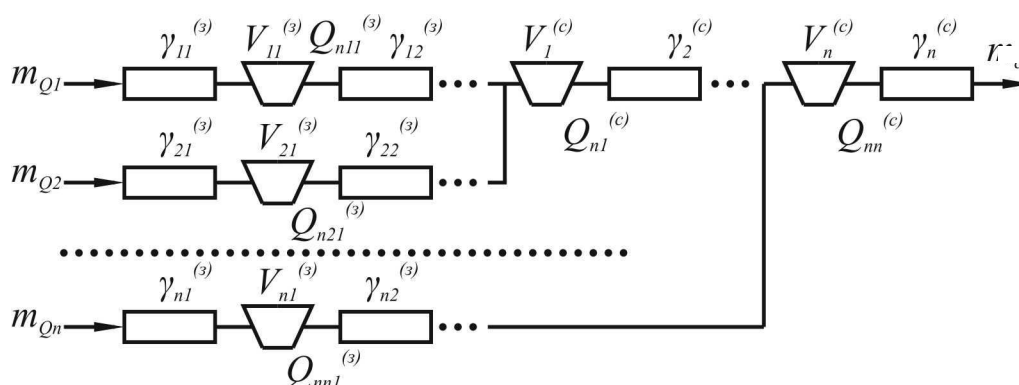
Сложная система подземного конвейерного транспорта, состоящего из большого количества конвейерных линий, бункеров и различных узлов перегрузки, приводит к невозможности проведения натуральных экспериментов. Это связано, прежде всего, с тем, что остановка системы подземного конвейерного транспорта (СПКТ) даже на короткое время ведет к большим убыткам.

В настоящее время разработаны математические модели функционирования систем конвейерного транспорта без бункеров, применяемые, в основном, на открытых разработках полезного ископаемого [3, 4]. Вопросами моделирования функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами занимались многие исследователи [1, 5 - 7]. При этом полученные математические модели функционирования системы конвейерного транспорта, в основном, касались системы с простой структурой «конвейер – бункер – конвейер».

Существующие математические модели СПКТ не всегда возможно применять на практике. Это связано с отсутствием необходимого программного обеспечения, которое позволило бы не только сле-

Целью данной работы является разработка имитационной модели функционирования СПКТ, которая позволит не только промоделировать поведение СПКТ в различных, в том числе и аварийных, условиях, но и исследовать влияние параметров отдельных элементов СПКТ на ее работу.

Древовидную структуру подземного конвейерного транспорта угольных шахт можно объяснить цикличностью технологии добычи угля: проходка – добыча – проходка. В результате каждый новый участок конвейерного транспорта подсоединяется к уже существующей системе, образованной в результате множества циклов добычи угля. На рисунке 1 представлена система конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами.



ISSN 1562-9945

Для этой системы получены рекуррентные соотношения, определяющие среднюю пропускную способность системы при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$, где m_{Q_i} – средняя производительность, Q_{n_1} – производительность питателя:

$$m_{c_i} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{2i} \gamma_{V_i}^{(c)}})}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)} e^{A_{2i} \gamma_{V_i}^{(c)}} + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{2i} \gamma_{V_i}^{(c)}})} \right] m_i^{(s)}, \quad (1)$$

где $A_{2i} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{i+1}^{(c)}) - Q_{n_i}^{(c)}]}{m_i^{(s)}(Q_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})}$, $(\mu_c = \mu_i; i = 1, n)$, ,

$$\bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}}, \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(s)}}$$

Здесь эффективные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами определяются по формулам:

$$\gamma_{\partial_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(s)}} - 1, \quad (\gamma_{\partial_1}^{(c)} = \gamma_{\partial_1}^{(s)}, i = 1, n), \quad (2)$$

где $m_{c_i}^{(s)}$ – средняя пропускная способности i -го забойного пути системы конвейерного транспорта с бункерами.

На основании полученных аналитических выражений были проведены расчеты пропускной способности систем конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (рис. 1). Система проектировалась со следующими параметрами:

1. $m_{Q_i} = 5,6 \text{ т / мин}$;
2. $Q_{n_1}^{(c)} = 12 \text{ т / мин}$, $Q_{n_2}^{(c)} = 18 \text{ т / мин}$, $Q_{n_3}^{(c)} = 24 \text{ т / мин}$;
3. $Q_{n_i}^{(s)} = 6 \text{ т / мин}$;
4. $\gamma_i^{(c)} = 0,037$, $\gamma_{ij}^{(s)} = 0,193$, $\mu_i = 0,054$;
5. $V_1^{(c)} = 200 \text{ м}$, $V_2^{(c)} = 300 \text{ м}$, $V_3^{(c)} = 400 \text{ м}$, $V_{ij}^{(s)} = 100 \text{ м}$.

При таких параметрах системы теоретические расчеты показывают, что $m_c \approx 15,65 \text{ т / мин}$.

Построение имитационной модели

Используя аналитические формулы, полученные выше, в пакете построения имитационных моделей Anylogic была создана имитационная модель СПКТ древовидной структуры, представленная на рисунке 2.

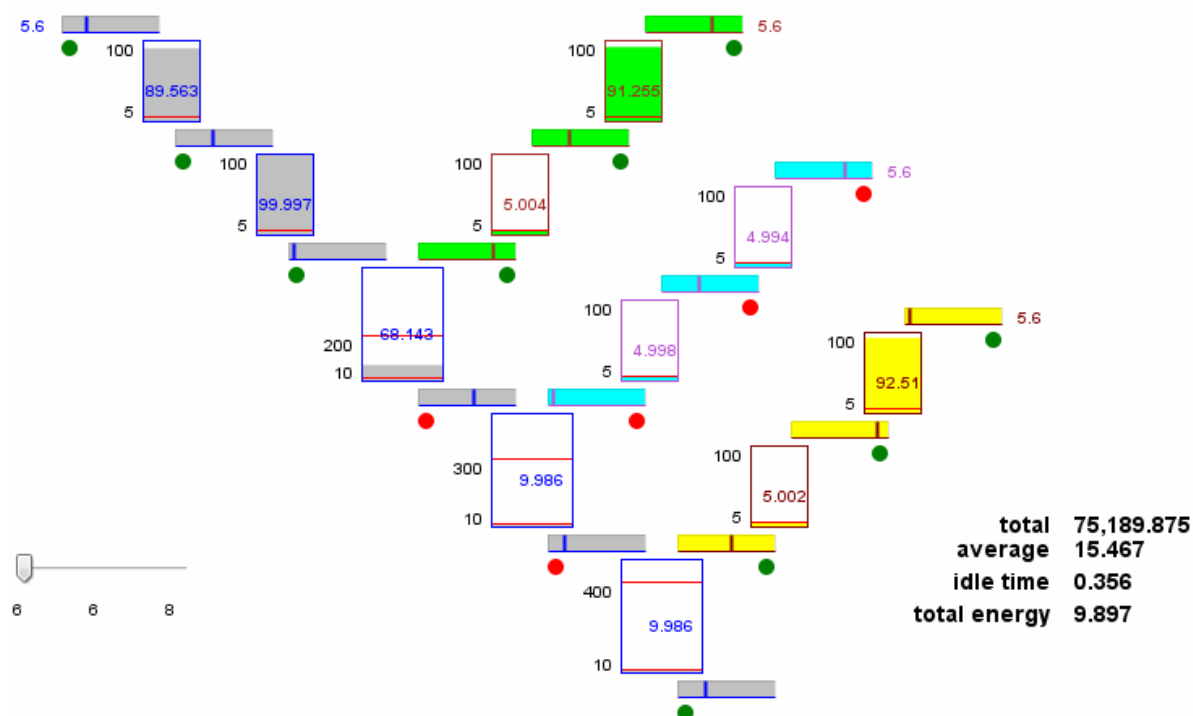


Рисунок 2 - Имитационная модель СПКТ древовидной структуры

Рассмотрим подробнее, что представляет данная модель. Она состоит из стволового пути, содержащего 6 конвейерных линий и 5 аккумулирующих бункеров, и трёх забойных путей, каждый из которых состоит из 3 конвейерных линий и 2 аккумулирующих бункеров. Разработанная модель также показывает, в каком состоянии находится каждая конвейерная линия (красный кружок – линия не работает, зеленый – работает). Так как имитационная модель является моделью реального времени, то имеется возможность отслеживать некоторые параметры СПКТ:

- объем груза в каждом бункере;
- общий объем транспортируемого груза (total);
- средний объем транспортируемого груза (average);
- среднее время простоя СПКТ из-за остановок конвейеров или переполнения бункеров;

- средние энергозатраты СПКТ.

У пользователя имеется возможность варьирования скоростей питателей путем движения ползунка слайдера.

Разработанная имитационная модель также позволяет просматривать следующие графики:

1. Среднее время простоя системы из-за поломки последней конвейерной линии или отсутствия груза в последнем бункере системы.

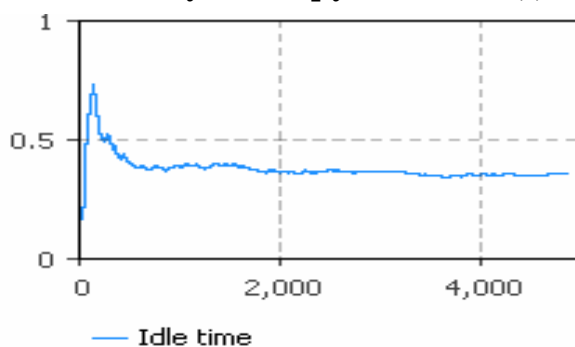


Рисунок 3 - График среднего времени простоя системы

2. Средний транспортируемый объем груза.

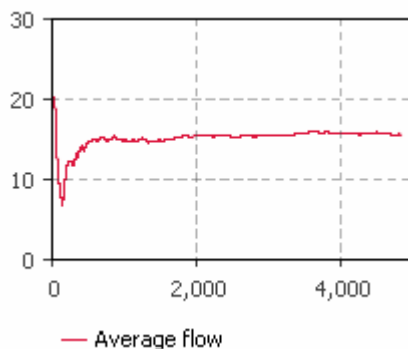


Рисунок 4 - График среднего транспортируемого объема груза

3. Средние энергозатраты транспортировки груза.

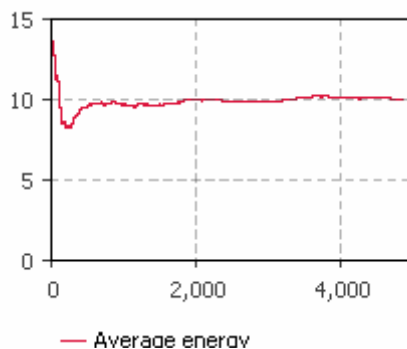


Рисунок 5 - График средних энергозатрат

Из приведенных выше графиков, можно сделать следующие выводы:

1. Во время старта работы модели СПКТ среднее время простоя системы выше 50%, так как бункер, который находится в самом конце стволового пути пустой и необходимо время на транспортировку груза до него. Когда же груз поступает в последний бункер, то этот показатель уравнивается до 25-30% и остается стабильным во время всей работы имитационной модели.

2. Средний грузопоток в начале работы системы не превышает 10 т/мин, однако, при накоплении последнего бункера и бесперебойной работе всей модели, данный показатель устанавливается на уровне 15-16 т/мин. При этом стоит отметить, что при возникновении аварийных ситуаций, средний грузопоток не падает моментально, а держится на среднем уровне до тех пор пока не опустошится последний бункер.

В результате моделирования модели СПКТ в пакете Anylogic было получено, что результаты имитационного моделирования хорошо согласуются с теоретическими расчетами полученными ранее.

Выводы

Разработанная имитационная модель позволяет следить за работой всей СПКТ одновременно, вести учет количества транспортируемого груза и энергозатрат на его транспортировку, среднего грузопотока в единицу времени. У пользователя имеется возможность идентифицировать причину остановки конвейерной линии (поломка конвейерной линии или переполнение бункера), варьировать скорость отгружаемого грузопотока. Благодаря разработанной имитационной модели появилась возможность детальнее исследовать процесс функционирования СПКТ без значительных материальных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В. А. Пономаренко, Е. Л. Креймер, Г. А. Дунаев [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 309 с.
2. Бабенко Ю. В. Имитационное моделирование процесса функционирования систем конвейерного подземного транспорта / Ю. В. Бабенко, Р. В. Кирия, А. И. Михалёв, – Тези доповідей ХІ міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2014)». – Дніпропетровськ, 2014. – с. 21-22.с.
3. Кирия Р. В. Применение фракталов к определению пропускной способности систем конвейерного транспорта горных предприятий / Р. В. Кирия // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Випуск 2(67). – С. 167–174.
4. Спиваковский А. О. Карьерный конвейерный транспорт / А. О. Спиваковский, М. Г. Потапов, Г. В. Приседский. – М.: Недра, 1979. – 264 с.
5. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах / Р. В. Кирия, Ю. В. Бабенко, Т. Ф. Мищенко // Сучасні проблеми металургії: Науковий вісник. – Дніпропетровськ, 2012. – Випуск 15. – С. 85–96.
6. Степанов П. Б. Надежность многобункерных конвейерных линий / П. Б. Степанов, Л. М. Алотин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – № 1. – С. 94-99.
7. Климов Б. Г. Оценка эффективности функционирования шахтных транспортных систем с бункерами / Б. Г. Климов, В. Я. Богуславский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1976. – № 5. – С. 93–96.

И.М. Гвоздева, В.В. Демиров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ОДНОГО ИЗ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Аннотация. В работе исследованы динамические процессы в автономной электроэнергетической системе, которые возникают при переходе одного из параллельно работающих генераторов в асинхронный режим в результате потери питания обмотки возбуждения. Для создания математических моделей процессов в синхронных генераторах использованы известные уравнения Парка-Горева. Решена задача имитационного моделирования динамических процессов в электроэнергетической системе контейнеровоза MSC Jaran, получены временные зависимости токов статоров, активных и реактивных мощностей синхронных генераторов. Предложены меры по устранению нежелательных последствий рассмотренной аварийной ситуации.

Ключевые слова: асинхронный режим, автономная электроэнергетическая система, синхронный генератор, имитационное моделирование, динамический процесс.

Введение. Основным источником электроэнергии в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) являются синхронные генераторы (СГ). Одним из аварийных режимов параллельной работы генераторов в составе АЭЭС является переход одного из них в асинхронный режим работы. Информация о физических величинах, характеризующих динамические процессы при переходе СГ в асинхронный режим, необходима для диагностики аварийного состояния АЭЭС и выполнения необходимых действий по его устранению.

Асинхронный режим работы СГ возникает в случае потери питания обмотки возбуждения в результате каких-либо неисправностей в системе возбуждения либо в результате коротких замыканий в сети. Переход СГ в асинхронный режим вызывает колебания активной и реактивной мощностей, при которых ток статора в несколько раз превышает номинальный, за счет чего при продолжительном асин-

хронном режиме происходит повышенный нагрев статора и ротора, что может привести к аварийной ситуации. Поэтому исследование динамических процессов в АЭЭС при переходе одного из генераторов в асинхронный режим имеет существенное теоретическое и практическое значение.

Основная часть. Предметом исследования являются математические и компьютерные модели динамических процессов в автономной электроэнергетической системе в условиях асинхронного режима работы одного из синхронных генераторов.

Особенности асинхронного режима работы СГ в составе наземной электроэнергетической системы, его характеристики, причины возникновения, способы выявления рассмотрены в [1,2]. Работы [3,4] посвящены особенностям эксплуатации судовых электроэнергетических систем (СЭЭС), в том числе автоматизированных, и их элементов. В [5] рассмотрены причины опасности асинхронного режима СГ. Работы [6,7] посвящены построению компьютерных моделей, позволяющих исследовать переходные процессы в СЭЭС с параллельно работающими генераторами. Несмотря на достаточно большое количество работ, посвященных рассмотрению асинхронного режима работы СГ в составе наземных, в том числе тепловых, электроэнергетических систем, проблема распознавания и предотвращения указанного режима в автономных, в том числе судовых электроэнергетических системах, еще далека от полного решения. Поэтому задача моделирования динамических процессов в СЭЭС при выпадении одного из СГ из синхронизма с учетом конфигурации конкретной СЭЭС является актуальной.

Целью настоящей работы является исследование динамических процессов, возникающих при асинхронном режиме работы одного из синхронных генераторов в составе судовой электроэнергетической системы.

Асинхронный режим в СЭЭС является одним из самых сложных аварийных режимов, при котором возможно повреждение оборудования, нарушение электроснабжения потребителей и нежелательное развитие аварийного процесса с возможными тяжелыми последствиями для электроэнергетических объектов [8].

Процесс перехода СГ в асинхронный режим происходит в следующей последовательности: при исчезновении или значительном

уменьшении тока в обмотке возбуждения генератора уменьшаются магнитный поток возбуждения и соответствующий ему синхронный электромагнитный момент на валу генератора. При некотором значении тока возбуждения значение синхронного электромагнитного момента становится меньше вращающего момента дизеля и генератор, продолжая оставаться в сети, выпадает из синхронизма. Для поддержания магнитного поля генератор начинает потреблять намагничивающий ток из сети. Вследствие нарушения равновесия между вращающим моментом дизеля и электромагнитным (тормозным) моментом генератора начинает увеличиваться частота вращения агрегата выше синхронной. Увеличение частоты вращения агрегата приводит к тому, что ротор генератора вращается быстрее, чем магнитное поле статора, и в роторных контурах возникают переменные токи, имеющие частоту скольжения s_f . Взаимодействие наведенных в контурах ротора токов с основным потоком статора создает асинхронный электромагнитный момент на валу генератора, тормозящий ротор [3].

Математическое моделирование динамических процессов, возникающих при параллельной работе синхронных генераторов в составе СЭЭС осуществляется на основе уравнений Парка-Горева (УПГ) следующего вида [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p\psi_d = u_d + (1 + s) \cdot \psi_q - R_s \cdot i_d \\ p\psi_q = u_q + (1 + s) \cdot \psi_d - R_s \cdot i_q \\ p\psi_f = u_f - R_f \cdot i_f \\ p\psi_{Dd} = -R_{Dd} \cdot i_{Dd} \\ p\psi_{Dq} = -R_{Dq} \cdot i_{Dq} \\ ps = [M_{ДИЗ} - (i_d \cdot \psi_q - i_q \cdot \psi_d)] / T_j \\ p\theta = s \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_d и u_q – напряжения статора; $(i_d \cdot \psi_q - i_q \cdot \psi_d) = M_{СГ}$ – электромагнитный момент синхронного генератора, создающий сопротивление вращению; T_j – механическая постоянная времени системы “СГ + приводной двигатель”; $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$ – потокосцепления обмоток модельного СГ, которые определяются выражениями:

$$\begin{cases} \psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\ \psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{Dq}, \\ \psi_f = x_d i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\ \psi_{Dd} = x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{Dd} i_{Dd}, \\ \psi_{Dq} = x_{aq} i_q + x_{Dq} i_{Dq}, \end{cases} \quad (2)$$

где x_{ad} – сопротивление взаимной индукции СГ по продольной оси d;
 x_{aq} – сопротивление взаимной индукции СГ по поперечной оси q;
 x_s – индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора;
 x_f – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения;
 x_{Dd} , x_{Dq} – индуктивные сопротивления рассеяния демпферных обмоток по осям d и q;

R_s , R_f , R_{Dd} , R_{Dq} – активные сопротивления обмоток СГ.

Полные индуктивные сопротивления обмоток равны сумме индуктивных сопротивлений взаимной индукции и индуктивного сопротивления рассеяния:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_s, & x_q &= x_{aq} + x_s, & x_f &= x_{ad} + x_{\sigma f}, \\ x_{Dd} &= x_{ad} + x_{\sigma Dd}, & x_{Dq} &= x_{aq} + x_{\sigma Dq}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в результате решения УПГ получены, например, токи i_d и i_q , то ток i_A фазы А физического генератора определится выражением

$$i_A = i_d \cos(\gamma_0 + \omega_c t) - i_q \sin(\gamma_0 + \omega_c t), \quad (4)$$

где ω_c – частота тока в сети; t – физическое время;

γ_0 – начальный угол (при $t=0$) между осями d и q.

Вращающий момент дизеля $M_{диз}$ в системе (1) должен быть выражен в относительных единицах

$$M_{диз} = \frac{M_{диз.физ}}{M_{сг.ном}} \quad (5)$$

Из системы (2) токи обмоток выражаются через потокосцепления по формулам

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d = \frac{x_f x_{yd} - x_{ad}^2}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_{\sigma Dd}}{D_d} \psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma f}}{D_d} \psi_{Dd}, \\ i_q = \frac{x_{Dq}}{D_q} \psi_q - \frac{x_{aq}}{D_q} \psi_{Dq}, \\ i_f = \frac{x_d x_{Dd} - x_{ad}^2}{D_d} \psi_f - \frac{x_{ad} x_{\sigma Dd}}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \psi_{Dd}, \\ i_{Dd} = \frac{x_f x_d - x_{ad}^2}{D_d} \psi_{Dd} - \frac{x_{ad} x_{\sigma}}{D_d} \psi_d - \frac{x_{ad} x_s}{D_d} \psi_f, \\ i_{Dq} = \frac{x_q}{D_q} \psi_{Dq} - \frac{x_{aq}}{D_q} \psi_q, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $D_d = x_d x_f x_{Dd} + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2(x_d + x_f + x_{Dd})$, $D_q = x_q x_{Dq} + x_{aq}^2$.

При моделировании процессов в СГ по УПГ (1) в качестве переменных интегрирования используются потокосцепления $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$. Поэтому в (1) все токи должны быть заменены согласно (6). При решении УПГ будут получены значения потокосцеплений $\psi_q, \psi_d, \psi_f, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}$. Пересчет потокосцеплений в токи выполняется по формулам (6).

Для исследования асинхронного режима работы одного из параллельно работающих генераторов, входящих в состав СЭЭС, необходимо привести уравнения Парка-Горева одного генератора к другому [1,3]. Роторы параллельно работающих СГ не имеют между собой жесткого соединения, вращаются с разными частотами и занимают различное положение в пространстве, поэтому оси d_1-q_1 , d_2-q_2 являются несовпадающими. Между осями $d-q$ параллельно работающих СГ существуют углы, которые обозначим как δ . Для объединения УПГ параллельно работающих СГ в одну систему уравнений необходимо их дополнить уравнениями связи, являющимися функциями углов δ . Для ведущего генератора СГ1 моделью является система УПГ (1) и выражения-определения потокосцеплений (2), в которых произведена следующая замена индексов: $d \rightarrow 1d$ и $q \rightarrow 1q$. Токи и напряжения статора в модели имеют обозначения $i_{1d}, i_{1q}, u_{1d}, u_{1q}$. Составляющие напряжения сети u_{Cd} и u_{Cq} принимаются равными составляющим u_{1d} и u_{1q} напряжения СГ1. Под этим напряжением находятся потребители нагрузки электростанции и при известной нагрузке рассчитываются

составляющие i_{Hd}, i_{Hq} ее тока, которые привязаны к осям d_1-q_1 СГ1 (рис.1).

Моделью ведомого генератора СГ2 является система УПГ (1) и выражения-определения потокоцеплений (2), в которых произведена следующая замена индексов: и $q \rightarrow 2q$ и $d \rightarrow 2d$. Токи и напряжения статора в модели имеют обозначения $i_{2d}, i_{2q}, u_{2d}, u_{2q}$. СГ2 подключен к общим с СГ1 шинам главного распределительного щита (ГРЩ) и участвует в создании тока в нагрузке, который обозначим как комплексную величину $\dot{I}_{2H}$. СГ1 также создает в нагрузке ток, который обозначим как комплексную величину $\dot{I}_{1H}$. Полный комплексный ток нагрузки $\dot{I}_H$ является суммой указанных токов: $\dot{I}_H = \dot{I}_{1H} + \dot{I}_{2H}$. Просуммировать комплексные токи можно при условии, что электрические фазы слагаемых токов отсчитаны относительно общих координатных осей. С этой целью необходимо ввести блоки приведения токов i_{2d} и i_{2q} , рассчитанных на модели СГ2 в осях d_2-q_2 , к эквивалентным токам, но в осях d_1-q_1 .

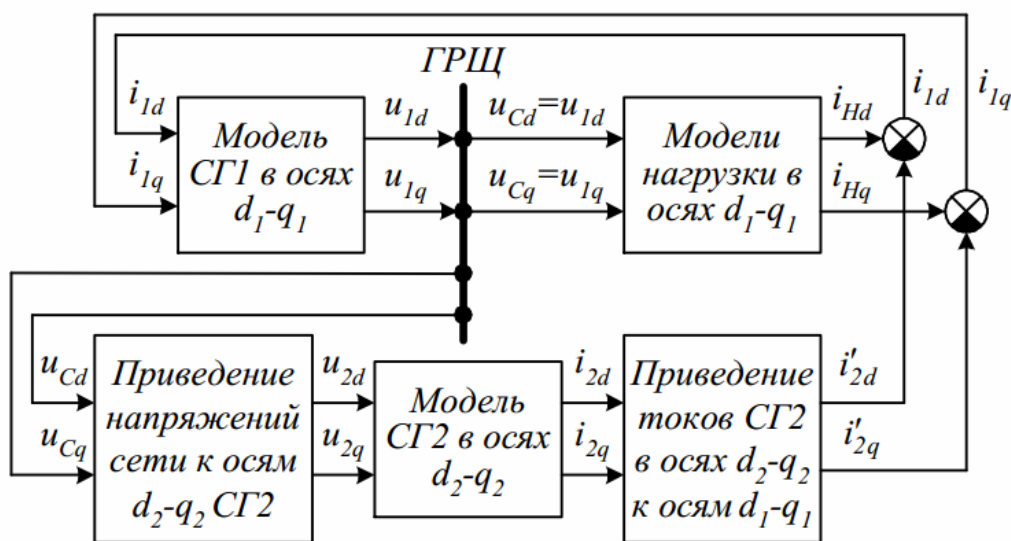


Рисунок 1 - Структурная схема СЭЭС с параллельно работающими СГ

Для вывода формул приведения рассмотрим обобщенный вектор тока $\dot{I}_2$ со стороны пар осей d_1-q_1 и d_2-q_2 (рис.2). Проекциями $\dot{I}_2$ на оси d_2-q_2 будут токи i_{2d} и i_{2q} , которые являются действительными токами, рассчитанными из модели СГ2 в осях d_2-q_2 . Проекциями $\dot{I}_2$ на оси d_1-q_1 будут токи i_{21d} и i_{21q} , которые являются фиктивными то-

ками. У пар токов $i_{2d} - i_{2q}$ и $i_{21d} - i_{21q}$ общим является вектор тока $\dot{I}_2$. Поэтому, пара токов $i_{21d} - i_{21q}$ заменяет пару токов $i_{2d} - i_{2q}$.

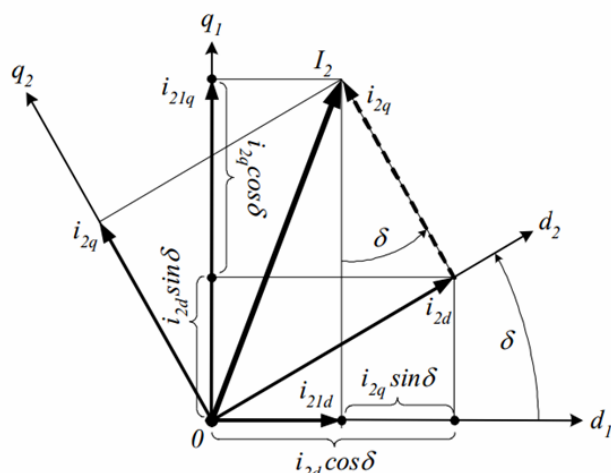


Рисунок 2 - Векторная диаграмма приведения токов СГ2 к СГ1

Ротаторы параллельно работающих генераторов вращаются не-синхронно, следовательно, между осями d_1 - q_1 и d_2 - q_2 имеется угол δ . При найденных из моделей СГ1 и СГ2 значениях скольжений s_1 и s_2 , угол δ может быть найден из выражения:

$$\delta = \int (s_2 - s_1) dt. \quad (7)$$

При компьютерном моделировании вместо (7) используется эквивалентное ему дифференциальное уравнение в нормальной форме:

$$\frac{d\delta}{dt} = s_2 - s_1. \quad (8)$$

Из построений, приведенных на рис.2, следуют формулы приведения токов СГ2, определенных в осях d_2 - q_2 , в токи осей d_1 - q_1 :

$$\begin{cases} i_{21d} = i_{2d} \cos \delta - i_{2q} \sin \delta \\ i_{21q} = i_{2d} \sin \delta + i_{2q} \cos \delta \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} i_{21d} \\ i_{21q} \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Для приведения найденных из модели СГ2 в относительных единицах токов i_{21d} и i_{21q} к токам в относительных единицах модели СГ1, необходимо учесть коэффициент приведения номинальных полных мощностей СГ, равный

$$K_S = \frac{S_{\text{НОМ.СГ1}}}{S_{\text{НОМ.СГ2}}}. \quad (10)$$

Приведенные к СГ1 токи ведомого СГ2 определяются по формулам

$$\begin{cases} i'_{2d} = K_S \cdot i_{21d}, \\ i'_{2q} = K_S \cdot i_{21q}. \end{cases} \quad (11)$$

Теперь могут быть найдены составляющие тока СГ1 в токе нагрузки:

$$i_{1d} = i_{Hd} - i'_{2d}, i_{1q} = i_{Hq} - i'_{2q}. \quad (12)$$

Эти токи подаются на вход модели СГ1. Аналогично токам, требуется также приведение напряжений сети u_{Cd} и u_{Cq} , которые рассчитаны в осях d_1-q_1 , к напряжениям u_{2d} и u_{2q} в осях d_2-q_2 , в которых моделируется СГ2:

$$\begin{vmatrix} u_{2d} \\ u_{2q} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} u_{Cd} \\ u_{Cq} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Напряжения u_{2d} и u_{2q} являются входными для модели СГ2 и используются в УПГ, описывающих этот генератор.

Для численной реализации математических моделей (1), (2), (12), (13) и моделей ответственных судовых потребителей электроэнергии с помощью средств визуально-ориентированного приложения Simulink системы MATLAB версии R2012b разработана компьютерная модель СЭЭС контейнеровоза MSC Japan (рис. 3). Подсистема Load моделирует работу асинхронных приводов наиболее ответственных судовых потребителей. Компьютерное моделирование динамических процессов проводится в нагруженной СЭЭС, поэтому для адекватного представления реальных явлений проведена предварительная инициализация моделей электрических машин, входящих в состав разработанной модели. В процессе компьютерного моделирования имитировалась потеря питания обмотки возбуждения СГ №2 в момент времени 3 секунды и его восстановление в момент времени 6с. В результате проведенного имитационного моделирования получены осциллограммы относительных значений активной и реактивной мощностей синхронных генераторов (рис. 4 – рис. 7), а также составляющих токов статоров по продольной и поперечной осям.

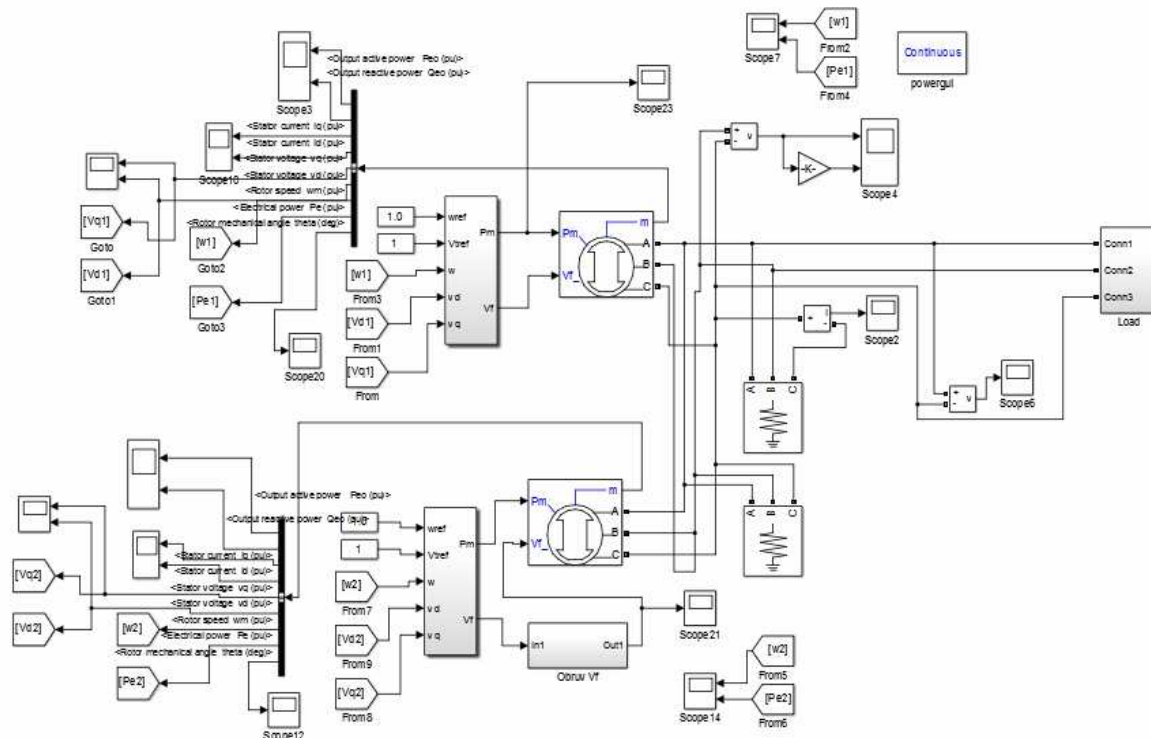


Рисунок 3 - Компьютерная модель для исследования динамических процессов при переходе одного из параллельно работающих СГ в асинхронный режим

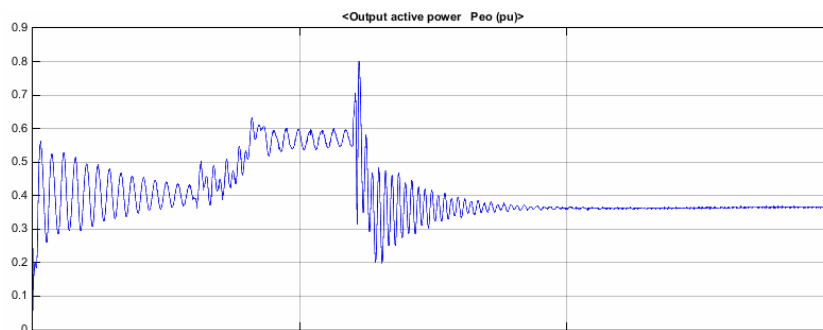


Рисунок 4 - Временная зависимость активной мощности СГ №1

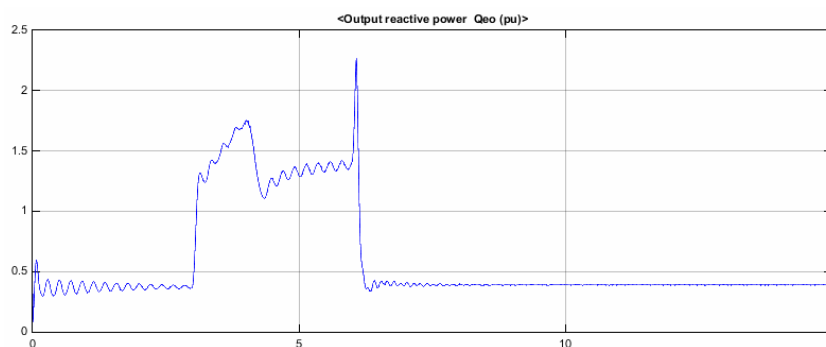


Рисунок 5 - Временная зависимость реактивной мощности СГ №1

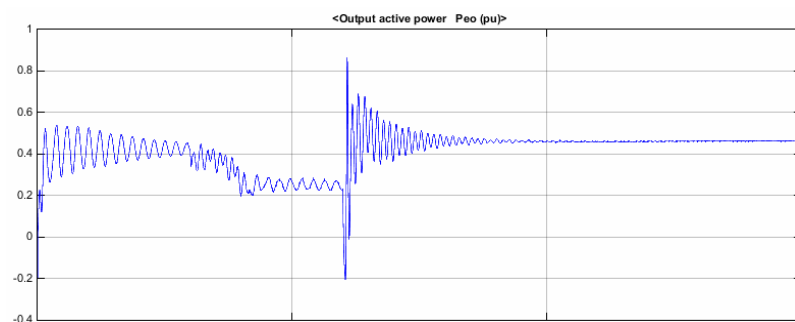


Рисунок 6 - Временная зависимость активной мощности СГ №2

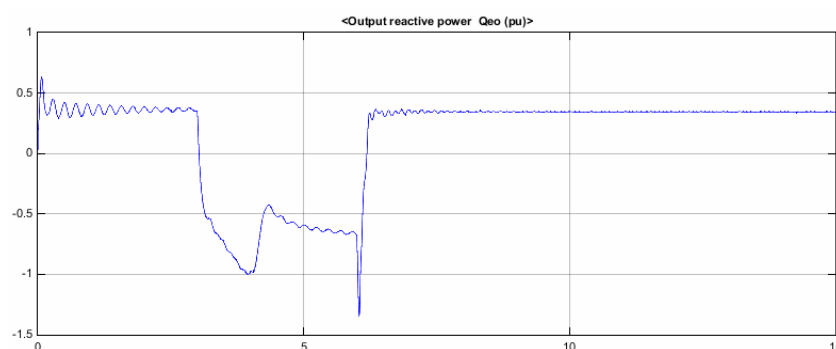


Рисунок 7 - Временная зависимость реактивной мощности СГ №2

Заключение. Полученные результаты компьютерного моделирования динамических процессов в СЭЭС позволяют предложить инженерно-технические решения, направленные на выявление асинхронного режима параллельно работающего СГ в составе СЭЭС и устранение последствий этого режима путем подключения альтернативных источников питания, что, в свою очередь, позволит повысить эксплуатационную надежность СЭЭС. Перспективы дальнейших исследований заключаются в исследовании эксплуатационной надежности автономных электроэнергетических систем различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая часть станций и подстанций / Под. ред. А.А. Васильева. – М.: Энергия, 1980. – 608 с.
2. Мелешкин Г.А. Устойчивость энергосистем. Книга 1 / Г.А. Мелешкин, Г.В. Меркурьев. – СПб, 2006. – 289с.
3. Краснов В.В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем: Моделирование для исследования специальных режимов / В.В. Краснов, П.А. Мещанинов, А.П. Мещанинов. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
4. Эксплуатация электроэнергетических систем морских судов: Справочник / О.П. Хайдуков, А.Н. Дмитриев, Г.Н. Запорожцев. – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.
5. Эксплуатация генераторов и синхронных компенсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.motor-remont.ru/books...
6. Толстов А.А. Параллельная работа синхронных генераторов с возможностью регулирования коэффициента мощности / А.А. Толстов, В.В. Лещенко, Е.С. Логвиненко // Судовые энергетические установки. – Одесса, 2008. – Вып.22. – С. 54–66.
7. Геллер Б.Л. Моделирование параллельной работы судовых синхронных генераторов в пакете VisSim / Б.Л. Геллер, Н.В. Сулименко // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2010. – № 18. – С. 160–166.
8. Совалов С.А. Противоаварийное управление в энергосистемах / С.А. Совалов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 416 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕНДОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В работе предлагается подход к совместному трендовому контролю и анализу временных рядов, образованных параметрами регистрации состояния сложных технических объектов в их длительной эксплуатации. Предлагаемый подход основан на формировании диагностической модели в виде полиномиальной аппроксимации взаимозависимостей измеряемых выходных переменных в установившихся режимах и выделении отклонений от указанной модели. Для полученных многомерных массивов отклонений рассмотрены методы их двумерного анализа а также решается задача на собственные числа и собственные векторы соответствующих корреляционных массивов, что позволяет последовательно использовать известные методы сингулярного спектрального анализа и трендового контроля. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для предлагаемого подхода.

Ключевые слова: диагностика, временные ряды, трендовый контроль и анализ.

Введение

Проблемным вопросом продления жизненного цикла сложных технических объектов (СТО) является достоверная оценка технического состояния по данным регистрации координат состояния и выходных координат в течение эксплуатации.

Переход к более совершенным стратегиям управления ресурсом СТО требует разрешения ряда научных и прикладных задач, важнейшими из которых являются задачи построения адекватных диагностических моделей и методов оценки отклонений параметров СТО в эксплуатации от номинального состояния.

Важнейшей задачей для разрешения указанной проблемы является повышения надежности статистических выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов на основе использования и развития методов трендового контроля и анализа временных рядов,

образуемых регистрируемыми параметрами (измеряемыми переменными состояниями и выходными переменными).

Основная часть

Объектом исследования являются процессы изменения многомерной совокупности координат состояния и выходных координат СТО в долговременной эксплуатации.

Предметом настоящего исследования являются математические модели трендов изменения состояния СТО и методы их определения, исследования зависимостей и прогнозирования [1,2,3].

Изменение состояния СТО определяется по их выходным переменным, ряд из которых (располагаемая мощность, крутящий момент, и др.) являются косвенно измеренными или недоступны для непосредственного измерения в эксплуатационных условиях. Оценки таких переменных могут быть получены только методами математического моделирования, для реализации которых в современных технических средствах контроля и диагностирования состояния необходимы соответствующие математические модели (ММ) [4,5,6]

Известные теоретические математические модели, которые основаны на нелинейных уравнениях сохранения и равновесия, позволяют получить требуемые оценки при обеспечении необходимой точности, однако вычислительная сложность численной реализации таких моделей ограничивает возможность их применения в технических системах диагностирования. Известные феноменологические математические модели, основанные на линеаризации нелинейных уравнений, позволяют получить требуемые оценки, однако для рассматриваемого класса объектов ошибки моделирования при численной реализации таких моделей многократно превышают допустимые.

Известные математические модели не разрешают имеющее место противоречие между необходимой и достижимой (на их основе) точностью оценки косвенно измеренных и недоступных для непосредственного измерения выходных переменных, обеспечивающей реализацию перспективных методов контроля и диагностирования технического состояния СТО, а также противоречие между вычислительной сложностью ММ и

возможностями их реализации в технических средствах диагностирования.

В связи с этим тема исследования имеет важное научное и практическое значения, поскольку она направлена на решение актуальной научно-прикладной задачи, сущность которой заключается в разрешении указанного противоречия путем создания комплекса математических моделей оценки состояния СТО в длительной эксплуатации, предназначенных для компьютерной реализации непосредственно в составе средств контроля состояния и диагностирования СТО, для получения оценок трендов выходных переменных, в том числе, косвенно измеренных и недоступных для непосредственного измерения.

Целью настоящего исследования является обоснование подхода к трендовому анализу многомерной совокупности координат состояния и выходных координат СТО в долговременной эксплуатации, комплексному применению методов трендового анализа и контроля технического состояния путем последовательной реализации этапов установления трендовых компонент многомерных временных рядов, образованного совокупностью отклонений параметров регистрации объектов диагностирования от его СМ, и применения предлагаемых методов многомерного трендового анализа и контроля с установлением уровня статистической значимости – Рис. 1.

Центральной идеей (гипотезой) исследования является предположение, что в процессе эксплуатации сложных энергетических объектов неизбежно присутствует долговременный тренд параметров, однако этот тренд является следствием постепенной и естественной деградации их характеристик (взаимозависимостей переменных состояния) ввиду выработки ресурса [6]. Поэтому только отклонение от таких многомерных взаимозависимостей дает информацию о техническом состоянии объекта. Предлагаемый подход может быть определен как обобщение методов трендового анализа и контроля на многомерные временные ряды отклонений от СМ. Математические модели контроля состояния СТО в длительной эксплуатации рассмотрены в виде статистических моделей порождения данных для выборок данных регистрации технического состояния.

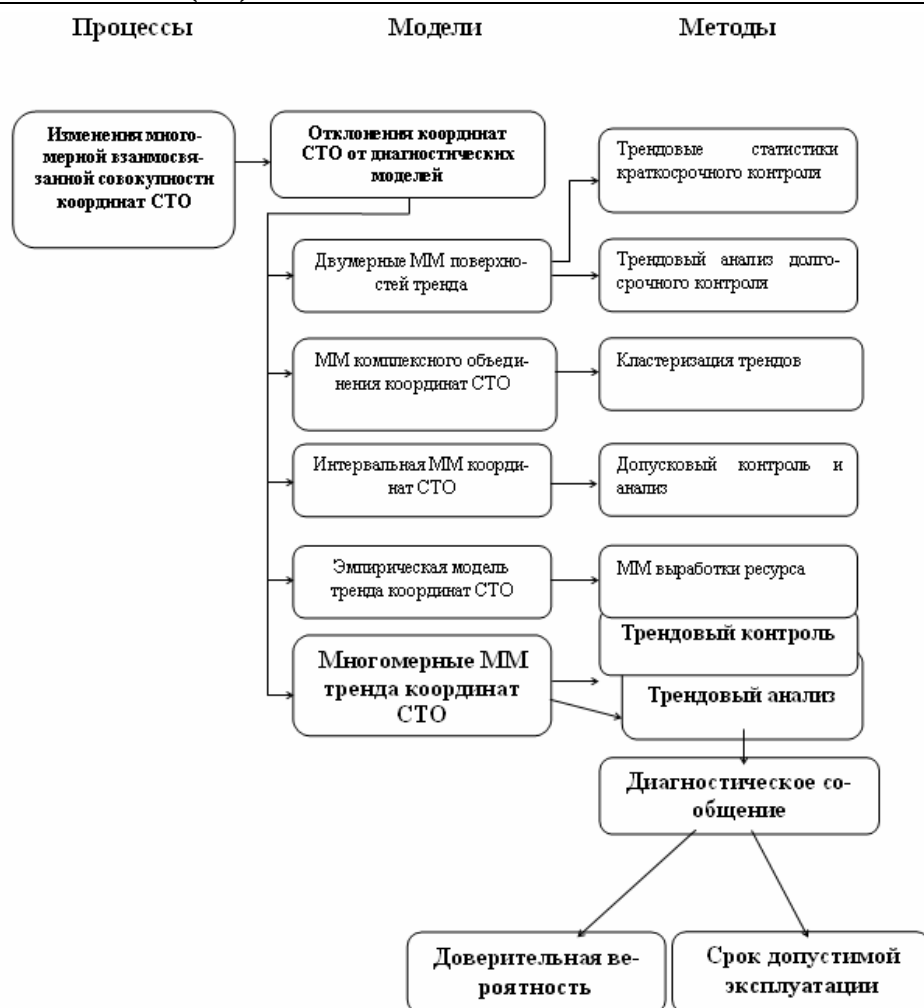


Рисунок 1 - Подход к исследованию многомерных временных рядов данных эксплуатации СТО

Контроль состояния объекта состоит в выявлении таких изменений совокупности его переменных состояния, и изменений взаимосвязей таких переменных, которые могут привести к выходу объекта из нормального работоспособного состояния. Фиксируемые в бортовой и наземной аппаратуре систем контроля и диагностики многомерные массивы характеризуют изменения контролируемых переменных как в переходных, так и в установившихся режимах. Основной информационной компонентой, используемой в СКД, являются данные об установившихся режимах, на основе которых формируются диагностические выводы, в частности, о степени выработки ресурса и вероятном времени эксплуатации до исчерпания такого ресурса. Поскольку параметры СТО в установившихся режимах связаны между собой совокупностью статических

характеристик (СХ), то именно процессы изменения таких характеристик могут характеризовать изменение его технического состояния. Основной этап создания предлагаемой модели контроля состояния заключается в построении статистической модели (СМ) порождения данных в виде отклонений фиксируемых приведенных переменных в установившихся режимах от значений таких переменных, определяемых по его индивидуальной ММ

$$\Delta \vec{y}_{pr} = \vec{y}_{pr} - \vec{y}_{mpr}, \quad (1)$$

где $\Delta \vec{y}_{pr}$ – вектор отклонений, $\vec{y}_{pr}$ – измеренные и приведенные к стандартным условиям испытаний значения анализируемых переменных, $\vec{y}_{mpr}$ – моделируемые значения переменных.

Согласно (1), выполняется преобразование пространства измеренных и приведенных к стандартным условиям испытаний переменных в пространстве отклонений от статической модели. Так как фиксируемые данные образуют временные ряды, то СМ порождения данных предлагается в виде

$$\Delta \vec{y}_{pr}(t_n) = trend[\vec{y}_{pr}(t_n) - \vec{y}_{mpr}(t_n)] + \vec{\xi}(t_n), \quad (2)$$

где $\vec{\xi}(t_n)$ – выборки значений случайного процесса ошибок измерений, $trend(\cdot)$ – неслучайная компонента во временном ряду отклонений.

Статическую модель предлагается получать путем нелинейного регрессионного анализа данных эксплуатации известными методами. Из СМ (2) следуют две задачи: трендового контроля и трендового анализа. Задача трендового контроля состоит в установлении факта наличия тренда в выборке отклонений от статической модели на заданном уровне значимости. Задача трендового анализа состоит в разделении выборки отклонений от статической модели на компоненты: трендовую и помеховую:

$$\Delta \vec{y} = \Delta \vec{y}_{tr} + \Delta \vec{y}_{noise}.$$

Исследуемые многомерные временные ряды отклонений от СМ (Рис.2) группируются в виде матрицы регистрируемых параметров (переменных состояния и выходных переменных) [6,7,8]. Центральной идеей анализа многомерной совокупности признаков является формирование на их основе многомерного массива данных – многомерного параллелепипеда.

Для решения задач трендового анализа предложены методы 2-D анализа комплекснозначного объединения выборок и трендовых поверхностей [9,10,11], а также метод 3-D анализа в виде сингулярного разложения сформированного параллелепипеда.

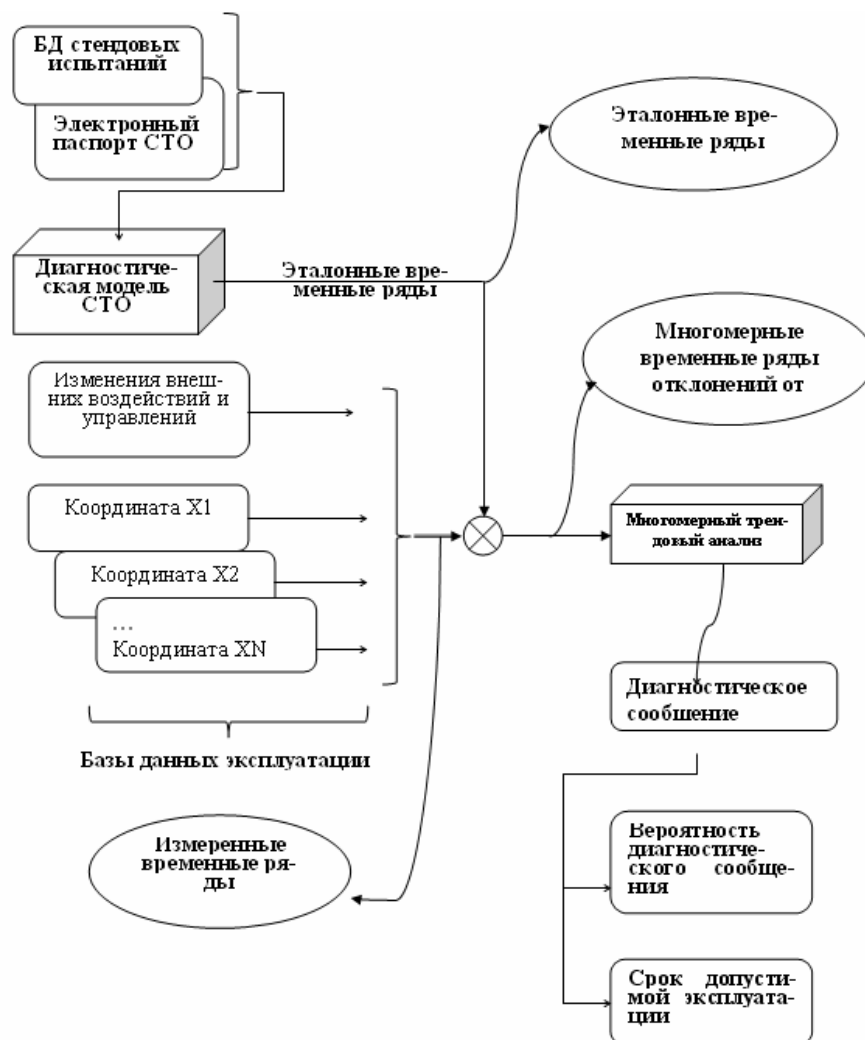


Рисунок 2 - ММ отклонений от диагностических моделей

Заключение

Статистически обоснованный уровень контроля состояния СТО в длительной эксплуатации обеспечивается анализом меры деградации статических характеристик в виде трендов отклонений от исходных характеристик. На этой основе предложен и обоснован подход к построению математических моделей контроля технического состояния, предусматривающий последовательные этапы формирования полиномиальных регрессионных математических моделей статики и многомерных трендовых моделей эксплуатационной динамики для оценки изменений отклонений параметров СТО от установленных регрессионных, что позволяет выявить изменения технического со-

стояния в жизненном цикле. Предложены новые методы 2-D трендового анализа и выполнено усовершенствование известных методов трендового анализа временных рядов данных регистрации технического состояния СТО на основе формирования многомерных массивов из траекторных матриц и их сингулярного разложения, позволяющие разделить выборки на заданном уровне значимости

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов прогноза развития трендов на основе анализа многомерных временных рядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсон – М.: Мир, 1989. – 540 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница” [Текст] / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. – С.-П. ун-т. – 1997.
4. Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. // – К.: Техника, 1998. – 312 с.
5. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С.Л. Марпл мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. Миргород В.Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко, В.М. Кравченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 9(56) – 2008. – С. 192-197.
7. Elsner I.B. Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis [Text] / I.B. Elsner, A.A. Tsonis. – New York, London: Plenum Press, 1996. – 164 p.
8. Perron P. Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Furter Evidence from a New Approach [Text] / P. Perron. – *Journal of Economic Dynamic and Control*. – No. 12. – P. 297-332.
9. Миргород В.Ф. Построение и анализ поверхностей тренда в задачах оценки состояния силовых установок на базе ГТД [Текст] / Миргород В.Ф., Гвоздева И.М., Бурунов Д.С. // *Вісник двигунобудування* – № 2 – 2013. – С.108-110
10. Деренг Е.В. Комбинированный метод ТАТ обработки многомерных временных рядов [Текст] / Деренг Е.В., Гвоздева И.М., Миргород В.Ф. // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ. – 2013. – Вип. 4(87). – С. 21-27
11. Гвоздева И.М. Кластеризация многомерных трендов в задачах оценки технического состояния [Текст] / И.М. Гвоздева, Деренг Е.В., В.Ф. Миргород, // *Вестник Херсонского национального технического университета* . – Херсон. – 2013. – Вип. 2(47). – С. 87-90

А.С. Заспенко, К.Г. Низяев, Л.С. Молчанов, Б.М. Бойченко,

А.Н. Стоянов, Е.В. Синегин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВАННЫ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРОВ МАЛОЙ ЕМКОСТИ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме анализа геометрических параметров рабочего пространства кислородного конвертера в ходе эксплуатации. В ней представлена математическая модель зависимости глубины конвертерной ванны от длительности эксплуатации конвертера. Полученная модель базируется на статистических данных о средней скорости разрушения огнеупорной футеровки в кислородных конвертерах.

Ключевые слова: кислородный конвертер, футеровка, глубина ванны, математическая модель, рабочее пространство.

Постановка проблемы

На современном этапе развития производства стали очень остро становиться вопрос эффективности и согласованности работы всего комплекса технологического оборудования. Особенно усложняется данная ситуация при использовании кислородных конвертеров. При этом производственный цикл всего сталеплавильного передела лимитируется стойкостью огнеупорной футеровки [1, 2]. В сложившейся ситуации, для более эффективной организации производственного цикла (снижения времени простоев основного и вспомогательного технологического оборудования, минимизации преждевременного выхода из строя технологического оборудования) большую ценность представляют сведения позволяющие прогнозировать изменение геометрических параметров рабочего пространства кислородного конвертера.

Анализ публикаций по теме исследования

На современном этапе развития сталеплавильного производства процессы производства стали в кислородных конвертерах являются

достаточно изученными [3 – 5]. При этом основное внимание авторов направленно на изучение физико-химической [4 – 8] и тепловой [9, 10] сторон данного процесса.

Таким образом на современном этапе существует достаточно полная и подробная физико-химическая модель разрушения переклазоуглеродистых огнеупорных материалов в процессе эксплуатации [11 – 13]. В соответствии с ней основной механизм разрушения осуществляется за счет взаимодействия углеродистой связки с оксидами железа шлаковой фазы и окислительной газовой фазой.

Цель и задачи исследований

Динамика изменения геометрических параметров рабочего пространства кислородного конвертера в процессе разрушения огнеупорной футеровки является малоизученной, поэтому целью данного исследования является получение математической модели изменения глубины ванны в процессе эксплуатации футеровки.

Основная часть

В ходе эксплуатации футеровка кислородного конвертера разрушается неравномерно. Так скорость разрушения околоаппенных зон и днища очень розниться. Ввиду этого в производственных условиях учет разрушения футеровки проводят посредством измерения толщины рабочего слоя огнеупорных материалов в указанных зонах. При этом полученные результаты совмещаются с масштабным чертежом рабочего пространства (рисунок 1). Как видно из приведенных на нем данных разрушение футеровки, наиболее значимо влияет на изменение глубины ванны (исходя из постоянства ёмкости металлургического агрегата).

Данные о средней скорости разрушения огнеупорных материалов в рабочем пространстве кислородного конвертера приведены в таблице 1. С целью проведения расчётов, для новой футеровки конвертера, объём ванны был разделен на 4 элементарные цилиндрические участка. Для каждого из которых было установлено фактическое значение. Далее исходя из данных таблицы 1 определяли, на сколько увеличиться диаметр каждого из цилиндров. На дальнейшем этапе рассчитывался текущий объём и, исходя из разницы между ним и объёмом новой футеровки конвертера, определяли изменение глубины конвертерной ванны. Численное значение изменения глуби-

ны конвертерной ванны рассчитывалось по средству платформы «Поиск решения» Microsoft Excel.

Таблица 1

Анализ влияния длительности эксплуатации на скорость износа футеровки (мм / плавку) кислородных конвертеров

№ п/п	Сведения о компании	Длительность кампании, %		
		30	60	100
1	Конвертер 50 т. Дюферко – 1730пл.	0,8	0,75	н/д
2	Конвертер 50 т Далмонд – 2046пл.	0,86	0,58	н/д
3	Конвертер 50 т Hagima – 2075пл.	0,58	0,51	0,48
4	Конвертер 50 т RXI – 2259пл.	0,49	0,39	0,38
5	Конвертер 50 т Далмонд – 2273пл.	н/д	0,37	0,32
Среднее значение		0,6825	0,52	0,3933

н/д – нет данных.

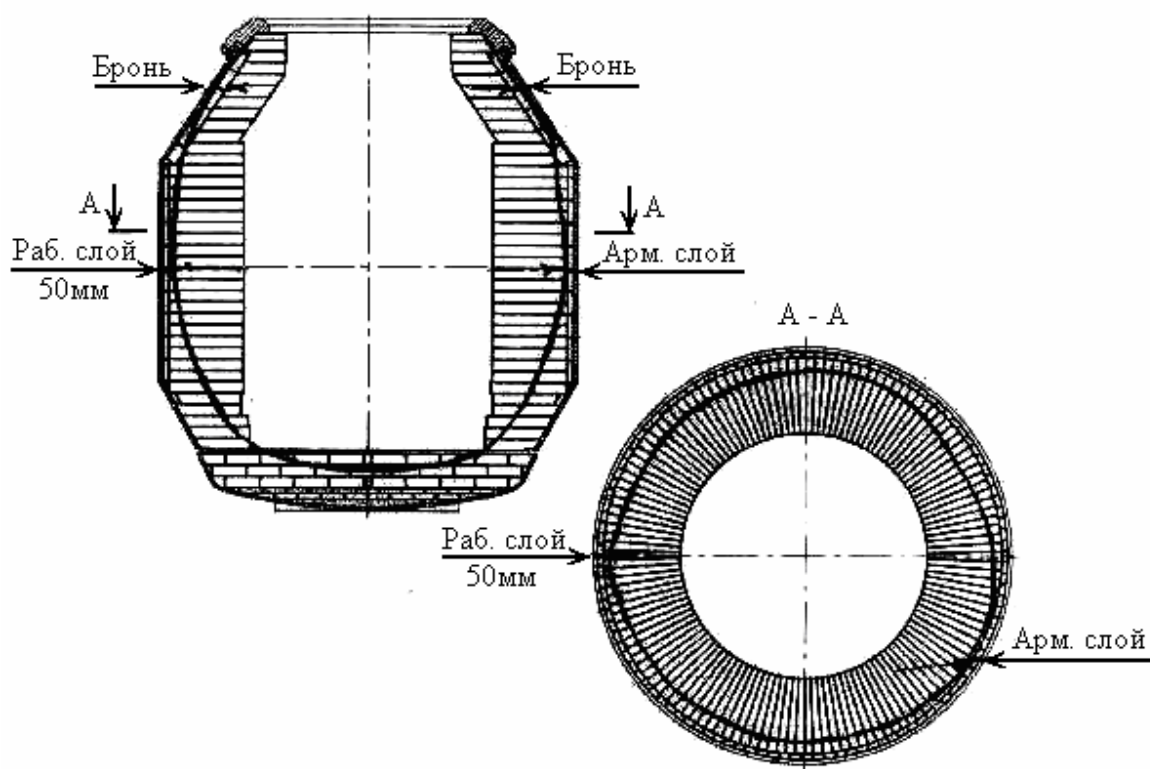


Рисунок 1 – Топография разрушения футеровки «Долмонд» 50 т конвертера, находившегося в процессе эксплуатации в течение 2273 плавов

Кроме того, анализ данных (представленных в таблице 1) показывает что, скорость износа футеровки является неравномерной на протяжении всей кампании конвертера. Наибольший износ претерпевает футеровка в первой трети кампании эксплуатации кислородных конвертеров. С одной стороны это может быть объяснено более интен-

сивным применением операции по раздувке конечного шлака во второй половине кампании конвертера с целью поддержания состояния футеровки в рабочем состоянии. Однако нельзя пренебрегать и характером взаимодействия кислородной струи с жидкой ванной.

Учитывая выше изложенные сведения, была построена модель изменения глубины ванны в процессе эксплуатации конвертера (рисунок 2). Полученные результаты показывают, что по ходу кампании конвертера жидкая ванна углубляется почти на 20 мм. При этом в значительной степени изменяется структура реакционной зоны и характер взаимодействия кислородных струй с жидким металлом.

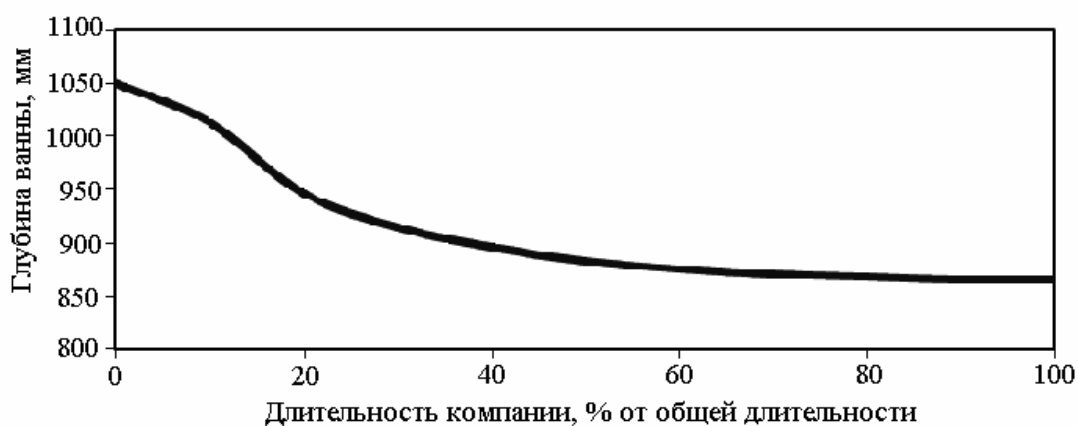


Рисунок 2 – Зависимость глубины ванны кислородного конвертера от длительности эксплуатации

Полученная зависимость изменения глубины ванны кислородного конвертера позволила сделать вывод о необходимости корректировки дутьевого, шлакового и шихтового режимов конвертерной плавки. Проведение корректировочных операций позволяет оптимизировать гидродинамические и тепло- массообменные процессы, протекающие в конвертере в различные периоды его эксплуатации.

Учитывая, что графическая интерпритация полученной зависимости сложна для задействования в АСУ ТП кислородного конвертера, то по средству их аппроксимации было получено следующее математическое уравнение:

$$L_{pz} = 0,000209346 \cdot e^{\frac{\tau}{100000}} + 0,000555 \cdot \tau^2 + 450,3635, \text{ мм}, \quad (1)$$

где L_{pz} - глубина реакционной зоны, мм;

τ - длительность эксплуатации огнеупорной футеровки конвертера, % от общей длительности.

В качестве параметра, определяющего адекватность полученной математической модели, использовался коэффициент детерминации, который составил 0,99993, что свидетельствует о высокой точности полученного уравнения.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. На основании выполненных исследований установлен неравномерный характер динамики разрушения футеровки кислородного конвертера.

2. Расчётным путём, на основании статистических данных, получена зависимость глубины ванны конвертера от длительности эксплуатации футеровки.

3. Полученная математическая зависимость отличается высокой достоверностью и пригодна для прогнозирования глубины ванны 50 т кислородных конвертеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 456с.
2. Баптизманский В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса. — М.: Металлургия, 1975.—375с.
3. Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Устинов В.А., Геращук Ю.Д. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы // Металл и литье Украины. – 2009. - № 1-2. – с.9-15.
4. Шульга В. О. Исследование условий эксплуатации огнеупорной футеровки конвертера // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. - № 6/5. – с.6-8.
5. Датукашвили Д.О., Можжерин А.В., Дука А.П., Мусевич В.А. Опыт эксплуатации рабочей футеровки 350-т конвертера в КЦ-2 ОАО «НЛМК» // Новые огнеупоры. – 2011. - № 11. – с.3-5.
6. Гуденау Х.В., Х. Нефе, Р. Хёффкен, А. Бааске, Р. Бертлинг. Методы исследования характера износа огнеупорных футеровок конвертеров // Черные металлы. – 1997. - №5. – с. 23-29.
7. Валувев А. Г., Говгаленко И. В., Афанасьев И. Г. Опыт эксплуатации периклазоуглеродистой футеровки конвертера из изделий производства РНИ // Новые огнеупоры. – 2011. - №3. - с.103-105.

8. Чиграй И.Д., Нехорошев А.Н., Колпаков С.В., Борисов В.Г. Андрющенко А.Н. Исследование зависимости стойкости футеровки от технологических параметров плавки // Сталь. – 1971. - №9. - с.798-801.
9. Колпаков С.В. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В. - М.: Машиностроение, 1991. – 464с.
10. Величко А.Г., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Стоянов А.Н., Ситало А.А., Молчанов Л.С. Оценка тепловой работы 350-т конвертеров. // Теория и практика металлургии. – 2011. - №5 – 6. – С. 8 – 11.
11. Зражевский А.Д., Альперович Я.Л., Егоров Ю.Г., Охотский В.Б. Анализ причин износа футеровки конвертера // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1996. - №.4. - С. 16-18.
12. Пищида В.И., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Кравец С.Н., Тарнавский М.С., Шибко А.В. Служба периклазоуглеродистых огнеупоров в горловине конвертера // Новые огнеупоры. - 2005. - №2. - с.23-25.
13. Пищида В.И., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Кравец С.Н. Служба периклазоуглеродистых огнеупоров в шлаковом поясе конвертера // Новые огнеупоры. - 2005. - №1. - с. 29-31.

В.П. Иващенко, А.И. Тимошкин

**О НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ
2-ПРОВЕРЯЕМОСТИ ОДНОВЫХОДНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО
КРАТНЫХ КОНСТАНТНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
НА ВХОДАХ И ВЫХОДЕ**

Аннотация. «О необходимых и достаточных условиях 2-проверяемости одновыходных функциональных элементов относительно кратных константных неисправностей на входах и выходе». Ставится проблема существования проверяющего теста длины 2 для функциональных элементов в отношении константных неисправностей их входов и выходов. Проблема рассматривается в отношении одновыходных функциональных элементов. Получены необходимые и достаточные условия существования проверяющего теста длины 2 для одновыходных функциональных элементов относительно кратных константных неисправностей на их входах и выходе.

Ключевые слова: функциональный элемент, кратная константная неисправность, проверяющий тест.

Постановка задачи

На контроль и диагностирование ряда цифровых систем ответственного назначения, например, бортовых систем, выделяются довольно малые временные интервалы (порядка нескольких микросекунд). В связи с этим представляет интерес проблема синтеза коротких проверяющих тестов (или проверяющих тестов заранее фиксированной длины) для компонентов цифровых систем, т.е. для цифровых схем. С этой проблемой тесно связана задача поиска условий существования этих тестов для различных типов цифровых функциональных элементов.

В работах [1-10] рассматриваются условия существования проверяющих тестов минимально возможной длины (длины 2), для функциональных элементов относительно константных неисправностей на их входах и выходах. Данные условия являются достаточными

ми условиями существования проверяющих тестов заданной длины, но не являются необходимыми. Следовательно, эти условия сформулированы для частных случаев.

Очевидно, что всесторонний подход к проблеме разработки математических моделей и методов построения контролепригодных цифровых схем требует поиска более общих условий, а именно необходимых и достаточных условий существования проверяющих тестов определенных (заданных) длин для функциональных элементов, включая длины, близкие к минимально возможной, и минимально возможную длину. Таким образом, актуальной является следующая задача. Задан класс I константных неисправностей на входах и выходах функциональных элементов. Требуется определить необходимые и достаточные условия существования проверяющего теста длины 2 для любого функционального элемента относительно данного класса неисправностей. Функциональный элемент, обладающий проверяющим тестом длины 2 относительно этого класса неисправностей в дальнейшем будем называть 2-проверяемым.

Основное содержание

Рассмотрим поставленную задачу для случая одновыходных функциональных элементов и кратных константных неисправностей на их входах и выходе. Пусть имеется множество J одновыходных функциональных элементов, каждый из которых имеет n входов и реализует некоторую булеву функцию $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ от n различных аргументов. Необходимые и достаточные условия 2-проверяемости функционального элемента F из J относительно константных неисправностей кратности r (где $r \in \{1, 2, \dots, \lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor\}$) на его входе и выходе дает следующая теорема.

Теорема 1. Функциональный элемент F из J обладает проверяющим тестом длины 2 относительно константных неисправностей

кратности $r \in \left\{1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{n-1}{2} \right\rfloor\right\}$ на входах и выходе тогда и только то-

гда, когда существуют входные векторы $b_1 = (\beta_1^1, \dots, \beta_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \dots, \beta_n^2)$, где для каждого $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ $\beta_i^1, \beta_i^2 \in \{0, 1\}$, удовлетворяющие следующим условиям:

$$\begin{aligned}
& \left(\forall r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\} \right) \left(\forall \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \subset \{1, 2, \dots, n\} \right) \\
& \left(\forall \beta_{i_1} \in \{0, 1\} \right) \dots \left(\forall \beta_{i_r} \in \{0, 1\} \right) \left\{ \left| f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i_1-1}^1, \beta_{i_1}^1, \right. \right. \\
& \left. \left. \beta_{i_1+1}^1, \dots, \beta_{i_r-1}^1, \beta_{i_r}^1, \beta_{i_r+1}^1, \dots, \beta_n^1) - f(\beta_1^1, \beta_2^1, \dots, \beta_n^1) \right| \right. \\
& \left. + \left| f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i_1-1}^2, \beta_{i_1}^2, \beta_{i_1+1}^2, \dots, \beta_{i_r-1}^2, \beta_{i_r}^2, \beta_{i_r+1}^2, \dots, \right. \right. \\
& \left. \left. \beta_n^2) - f(\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2) \right| > 0 \right\}
\end{aligned} \tag{1}$$

$$f(b_1) \neq f(b_2) \tag{2}$$

Доказательство. Для обнаружения любой константной неисправности $\beta_{i_1}, \beta_{i_2}, \beta_{i_3}, \dots, \beta_{i_r}$ (где $\forall v \in \{1, 2, \dots, r\} \beta_{i_v} \in \{0, 1\}$) кратности $r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\}$ на входах $i_1, i_2, \dots, i_r$ функционального элемента F из J проверяющим тестом длины 2 необходимо существование пары входных векторов $b_1 = (\beta_1^1, \dots, \beta_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \dots, \beta_n^2)$, где , такой, что

$$\begin{aligned}
& \left(\forall r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\} \right) \left(\forall \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \subset \{1, 2, \dots, n\} \right) \\
& \left(\forall \beta_{i_1} \in \{0, 1\} \right) \dots \left(\forall \beta_{i_r} \in \{0, 1\} \right) \left\{ \left(f_{i_1|\beta_{i_1} \dots i_r|\beta_{i_r}}(\beta_1^1, \dots, \beta_n^1) \neq \right. \right. \\
& \left. \left. f(\beta_1^1, \dots, \beta_n^1) \right) \vee \left(f_{i_1|\beta_{i_1} \dots i_r|\beta_{i_r}}(\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2) \neq f(\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2) \right) \right\}
\end{aligned}$$

Для определенности будем считать, что для любого v из $\{1, 2, \dots, r\}$ входу i_v функционального элемента J соответствует аргумент x_{i_v} функции $f(x_1, \dots, x_n)$. Тогда

$$\begin{aligned}
f_{i_1|\beta_{i_1} \dots i_r|\beta_{i_r}}(\beta_1^1, \beta_2^1, \dots, \beta_n^1) &= f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i_1-1}^1, \beta_{i_1}^1, \beta_{i_1+1}^1, \dots, \beta_{i_r-1}^1, \beta_{i_r}^1, \beta_{i_r+1}^1, \dots, \beta_n^1), \\
f_{i_1|\beta_{i_1} \dots i_r|\beta_{i_r}}(\beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2) &= f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i_1-1}^2, \beta_{i_1}^2, \beta_{i_1+1}^2, \dots, \beta_{i_r-1}^2, \beta_{i_r}^2, \beta_{i_r+1}^2, \dots, \beta_n^2)
\end{aligned}$$

Следовательно, для b_1 и b_2 должно выполняться условие

$$\left(\forall r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\} \right) (\forall \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \subset \{1, 2, \dots, n\})$$

$$(\forall \beta_{i_1} \in \{0, 1\}) \dots (\forall \beta_{i_r} \in \{0, 1\}) \left\{ \left(\left| f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i_1-1}^1, \beta_{i_1}^1, \beta_{i_1+1}^1, \dots, \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \beta_{i_r-1}^1, \beta_{i_r}^1, \beta_{i_r+1}^1, \dots, \beta_n^1) - f(\beta_1^1, \dots, \beta_n^1) \right| > 0 \right) \vee \left| f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i_1-1}^2, \right.$$

$$\left. \beta_{i_1}^2, \beta_{i_1+1}^2, \dots, \beta_{i_r-1}^2, \beta_{i_r}^2, \beta_{i_r+1}^2, \dots, \beta_n^2) - f(\beta_1^2, \dots, \beta_n^2) \right| > 0 \}$$

или условие

$$\left(\forall r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\} \right) (\forall \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \subset \{1, 2, \dots, n\})$$

$$(\forall \beta_{i_1} \in \{0, 1\}) \dots (\forall \beta_{i_r} \in \{0, 1\}) \left\{ \left(\left| f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i_1-1}^1, \beta_{i_1}^1, \beta_{i_1+1}^1, \dots, \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \beta_{i_r-1}^1, \beta_{i_r}^1, \beta_{i_r+1}^1, \dots, \beta_n^1) - f(\beta_1^1, \dots, \beta_n^1) \right| + \left| f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i_1-1}^2, \beta_{i_1}^2, \beta_{i_1+1}^2, \dots, \right. \right.$$

$$\left. \left. \beta_{i_r-1}^2, \beta_{i_r}^2, \beta_{i_r+1}^2, \dots, \beta_n^2) - f(\beta_1^2, \dots, \beta_n^2) \right| > 0 \}$$

Кроме этого, для обнаружения любой константной неисправности $\beta_{i_1}, \beta_{i_2}, \dots, \beta_{i_{r-1}}, \beta_y$ (где $\beta_{i_1}, \dots, \beta_{i_{r-1}}, \beta_y \in \{0, 1\}$) кратности $r \in \left\{ 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil \right\}$ на входах $i_1, i_2, \dots, i_{r-1}$ и на выходе y функционального элемента F тестом из двух рассматриваемых векторов b_1 и b_2 необходимы чтобы

$$f(b_1) \neq f(b_2)$$

Действительно, если предположить противное, т.е. что $f(b_1) = f(b_2)$, то неисправность $\beta = f(b_1) = f(b_2)$ кратностью $r = 1$ на выходе y элемента F не будет обнаруживается тестом, состоящим из векторов b_1 и b_2 . Таким образом, необходимость условий (1)-(2) доказана. Достаточность условий (1)-(2) очевидна. Теорема доказана. При этом очевидно, что все аргументы булевой функции $f(x_1, \dots, x_n)$, которую реализует 2-проверяемый относительно константных неисправностей кратности $r \in \left\{ 1, 2, \dots, \frac{n-1}{2} \right\}$ входов и выхода функциональный элемент J , являются существенными.

Следствие 1. Если функциональный элемент F из J проверяем двумя векторами $b_1 = (\beta_1^1, \dots, \beta_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \dots, \beta_n^2)$ относительно кон-

стантных неисправностей кратности $r \in \left\{1, 2, \dots, \left\lceil \frac{n-1}{2} \right\rceil\right\}$ на входах и выходе, то $\beta_i^1 \neq \beta_i^2$ для $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Доказательство. Пусть имеется противное предположение, т.е. $\exists$ вход i функционального элемента J такой, что для подаваемого на него сигнала x_i на входных векторах b_1 и выполняется равенство:

$$\beta_i^1 = \beta_i^2$$

Тогда, если на входе i имеется константная неисправность β кратности $r = 1$, такая, что $\beta \in \{\beta_i^1, \beta_i^2\}$, то

$$\begin{aligned} & \left| f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i-1}^1, \beta, \beta_{i+1}^1, \dots, \beta_n^1) - f(\beta_1^1, \dots, \beta_{i-1}^1, \beta_i^1, \beta_{i+1}^1, \dots, \beta_n^1) \right| + \\ & \left| f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i-1}^2, \beta, \beta_{i+1}^2, \dots, \beta_n^2) - f(\beta_1^2, \dots, \beta_{i-1}^2, \beta_i^2, \beta_{i+1}^2, \dots, \beta_n^2) \right| = 0 \end{aligned}$$

Следовательно, функциональный элемент F не является проверяемым двумя векторами $b_1 = (\beta_1^1, \dots, \beta_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \dots, \beta_n^2)$. Получено противоречие. Следовательно, противное предположение неверно и $\beta_i^1 \neq \beta_i^2$ для $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$. При этом очевидно, что $\beta_i^1 = \overline{\beta_i^2}$ и $\beta_i^2 = \overline{\beta_i^1}$.

Заключение

На основе сформулированных условий проверяемости одновыходных функциональных элементов двумя векторами относительно кратных константных неисправностей могут быть разработаны различные методы синтеза легко тестируемых схем. Представляют интерес также условия проверяемости двумя векторами функциональных элементов из других классов, а также цифровых схем из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяшко А.П. Некоторые результаты теории синтеза легко тестируемых схем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1982. – №2. – С. 139-150.
2. Варданян В.А. Об одном методе синтеза легко тестируемых схем // Автоматика и телемеханика. – 1987. – №7. – С. 136-139.
3. Шевченко В.И. Синтез схем с минимальной трудоемкостью тестирования // VII Всесоюзная конференция «Проблемы теоретической кибернетики»: тез. докл. Ч. 1, Иркутск, 1985. – С. 202-203.
4. Hayes J.P. On realization of Boolean functions requiring a minimal or near minimal numbers of test // IEEE Transactions on computers. – 1971. – №6. – P. 1506-1513.
5. Lombardi F., Huang W.K. Fault detection and design complexity in C-testable VLSI arrays // IEEE Transactions on computers, v. 39. – 1990. – №12. – P. 1477-1481.
6. Saluja K.K., Reddy S.M. On minimally testable logic networks // IEEE Transactions on computers. – 1974. – №5. – P. 552-554.
7. Huang W.K., Lombardi F. On the constant diagnosability of baseline interconnection networks // IEEE Transactions on computers. – 1990. – №12. – P. 1485-1488.
8. Hayes J.P. On modifying logic networks to improve their diagnosability // IEEE Transactions on computers. – 1974. – №1. – P. 56-63.
9. La Paugh A.S., Lipton R.J. Total fault testing using the bipartite transformation // International Test Conference, 1983. – P. 428-434.
10. Vergis A., Steiglitz K. Testability conditions for bilateral arrays of combinational cells // IEEE Transactions on computers, vol. C-35. – 1986. – №1. – P. 13-22.

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец, В.В. Хоменко
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА
ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С АНИЗОТРОПИЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ПРИ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ**

Аннотация. Разработана методика экспериментального исследования динамических характеристик стенда двухмассовой электромеханической системы с анизотропийными регуляторами в различных режимах работы. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов выполнен на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Приведены примеры сравнения экспериментальных динамических характеристик стенда с синтезированными анизотропийными регуляторами и с типовыми регуляторами.

Ключевые слова: макет двухмассовой электромеханической системы, анизотропийные регуляторы, многокритериальный синтез.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Центральной проблемой современной теории и практики автоматического управления является создание систем, способных обеспечивать высокую точность управления при интенсивных задающих и возмущающих воздействиях широкого спектра частот [1].

Анализ последних достижений и публикаций. К проектируемым динамическим системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах: качество переходных процессов задается временем первого согласования, временем регулирования, перерегулированием, при отработке случайных задающих, либо компенсации случайных возмущающих воздействий задается дисперсия ошибки слежения либо стабилизации и т.д.[2]. Кроме того, синтезированная система должна сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении параметров объекта управления и внешних воздействий, т.е. являться робастной [3-4].

В частности, свойством робастности обладают системы, с помощью которых минимизируется анизотропийная норма системы [5-7]. Существенное повышение точности управления в робастной системе достигается применением комбинированного управления, когда используется вся имеющаяся информация о задающем и возмущающем воздействиях [8-11]. Для решения многокритериальной задачи синтеза динамической системы [12-14] используются мультиагентные методы оптимизации [15-16]. Для отладки алгоритмов управления разрабатываются специальные стенды электромеханических систем [1, 17].

Целью статьи является разработка методики и проведение экспериментальных исследований динамических характеристик стенда двухмассовой электромеханической системы в различных режимах работы при многокритериальном синтезе анизотропийных регуляторов на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роением частиц.

Изложение материала исследования и полученных результатов. Центральная идея синтеза систем стохастического робастного управления связана с синтезом системы, минимизирующей критерий качества по анизотропийной норме управления, но максимизирующей этот же критерий по норме вектора внешних воздействий [7]. При этом, за счет введения в функцию Гамильтона нормы вектора внешних воздействий со знаком минус, синтезируемая система минимизирует чувствительность системы к изменяемым параметрам объекта управления, а, следовательно, обеспечивает робастность системы. Такой подход соответствует игровому подходу к задаче оптимизации, когда первый игрок «управление» минимизирует функцию цели, а второй игрок «неопределенные параметры объекта управления» максимизирует эту же функцию цели. Причем, так как исходная система описывается системой разностных уравнений – матричным уравнением дискретного состояния, а оба игрока используют одну и ту же функцию цели, то такая игра называется дифференциальной игрой с нулевой суммой.

Для нахождения анизотропийных регуляторов полного порядка необходимо решить ряд уравнений [5-6]. Вначале рассмотрим определение входа, максимизирующего анизотропийную норму. Для этого необходимо решить следующие уравнения:

- первое уравнение Риккати

$$\tilde{Y} = A_t^T \tilde{Y} A_t + L_t^T \Pi L_t + Q, \quad (1)$$

где

$$L_t = \Pi^{-1} F_t^T \tilde{Y} A_t, \quad \Pi = \Gamma - F_t^T \tilde{Y} F_t,$$

- второе уравнение Риккати

$$R = A_\omega^T R A_\omega + q C_\omega^T C_\omega + L^T \Sigma^{-1} L, \quad (2)$$

где

$$L = \Sigma (B_\omega^T R A_\omega + q D_\omega^T C_\omega), \quad \Sigma = (I_{m1} - B_\omega^T R B_\omega)^{-1}.$$

Рассмотрим синтез анизотропийных наблюдателей состояния многомассовых электромеханических систем с параметрической неопределенностью, необходимых для реализации анизотропийных регуляторов полного порядка. Для нахождения анизотропийных наблюдателей состояния необходимо решить третье уравнение Риккати

$$S = \tilde{A}_{11} S \tilde{A}_{11}^T + \tilde{B}_1 \tilde{B}_1^T - \Lambda \Theta \Lambda^T, \quad (3)$$

где

$$\Theta = \tilde{C}_{21} S \tilde{C}_{21}^T + \tilde{D} \tilde{D}^T, \quad \Lambda = (\tilde{A}_{11} S \tilde{C}_{21}^T + \tilde{B}_1 \tilde{D}^T) \Theta^{-1}.$$

Для нахождения анизотропийного регулятора, минимизирующего анизотропийную норму системы решается четвертое уравнение Риккати

$$T = A_u^T T A_u + C_u^T C_u - N^T \Psi N, \quad (4)$$

где

$$\Psi = B_u^T T B_u + D_{12}^T D_{12}, \quad N = -\Psi^{-1} (B_u^T T A_u + D_{12}^T C_u).$$

Анизотропийная норма системы определяется выражением специального вида

$$a = -\frac{1}{2} \ln \det \left(\frac{m_1 \Sigma}{\text{Trace}(L P L^T + \Sigma)} \right), \quad (5)$$

где матрица P удовлетворяет уравнению Ляпунова

$$P = (A_\omega + B_\omega L) P (A_\omega + B_\omega L)^T + B_\omega \Sigma B_\omega^T. \quad (6)$$

Таким образом, нахождение анизотропийных регуляторов сводится к решению системы из четырёх связанных уравнений Риккати (2) – (4), уравнения Ляпунова (6) и вычисления анизотропийной нормы системы по выражению специального вида (5). Эти системы уравнений численно решаются с помощью метода гомотопий, включающего векторизацию матриц и итерации по методу Ньютона.

Анизотропийный регулятор формирует управляющее воздействие на вход системы по ее измеряемому выходу и представляет собой динамический блок типа компенсатора, объединяющий анизотропийный наблюдатель и анизотропийный регулятор.

Описание стенда двухмассовой электромеханической системы. Механическая часть стенда выполнена на базе двух одноступенчатых микродвигателей постоянного тока ДПТ-25-Н2 [1]. Валы двигателей соединены упругой передачей. Преобразователем электрической энергии в механическую является один микродвигатель, а второй микродвигатель формирует случайную нагрузку для первого микродвигателя. В режиме стабилизации, когда система замкнута по углу поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя с помощью регулятора положения первого двигателя по сигналу с датчиков положения первого либо второго двигателей. В режиме наведения, когда система замкнута по скорости изменения угла поворота, управление первым двигателем осуществляется от преобразователя с помощью регулятора скорости первого двигателя по сигналу с датчиков скорости первого либо второго двигателей. Скорости вращения двигателей измеряются с помощью тех же импульсных датчиков положения первого и второго двигателей.

С помощью второго двигателя создается случайное изменение момента нагрузки. Для имитации случайного воздействия на вход второго двигателя подается случайный сигнал с выхода формирующего фильтра в виде колебательного звена. На вход формирующего фильтра от генератора случайных сигналов подается сигнал типа белого шума. С помощью такой системы второй двигатель формирует случайное изменение момента нагрузки. Характеристики случайного изменения момента нагрузки определяются параметрами формирующего фильтра и собственно двигателя.

Результаты экспериментальных исследований. Рассмотрим экспериментальные исследования синтезированных анизотропийных регуляторов на стенде двухмассовой электромеханической системы.

Вначале рассмотрим систему стабилизации угла поворота вала двигателя при случайном изменении момента нагрузки. На рис. 1 показаны реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала второго двигателя с типовым регулятором, а на рис. 2 показаны реализации случайных процессов тех же переменных

состояния с анизотропийным регулятором. Как видно из этих рисунков, в системе управления с обратной связью по углу поворота вала двигателя при случайном изменении момента нагрузки применение анизотропийного регулятора позволяет уменьшить ошибку регулирования угла поворота вала второго двигателя более чем в 2 раза.

Были также проведены экспериментальные исследования следящей системы в режиме регулирования скорости. Показано, что применение анизотропийного регулятора в системе регулирования скорости при случайном изменении момента нагрузки позволяет уменьшить ошибку регулирования скорости вращения второго двигателя более чем в 1,5 раза.

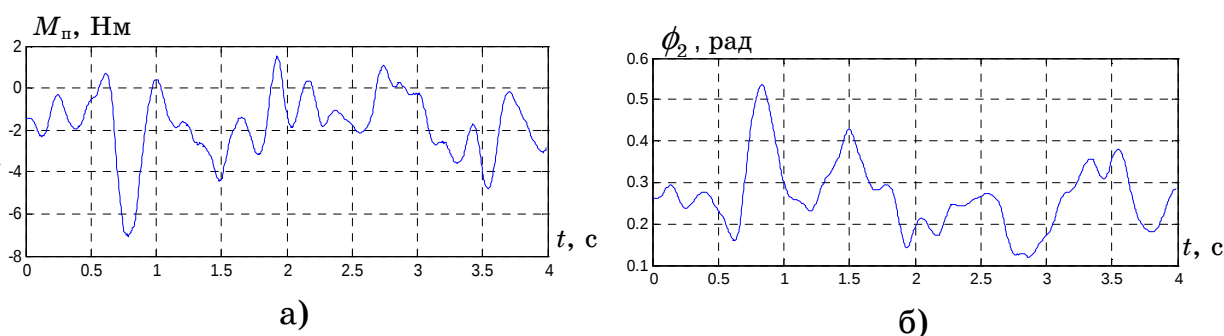


Рисунок 1 – Реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала двигателя с типовым регулятором

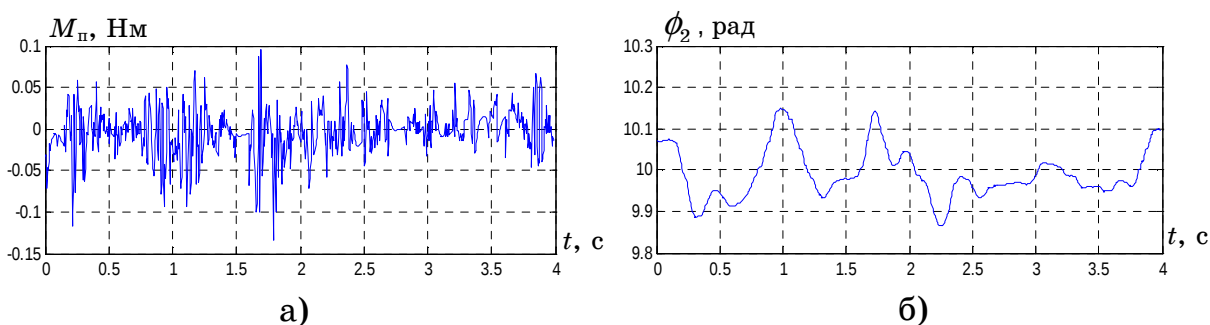


Рисунок 2 – Реализации случайных процессов: а) момента упругости и б) угла поворота вала двигателя с анизотропийным регулятором

Проведем теперь экспериментальные исследования по выявлению возможностей повышения точности управления двухмассовой системой с помощью анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами. Для уменьшения влияния сил трения выполним экспериментальные исследования переходных процессов в

системе из некоторой начальной ненулевой скорости вращения. При этом величину увеличения скорости выберем из условия, чтобы необходимые напряжения и токи якорной цепи исполнительного двигателя не превосходили допустимых значений. На рис. 3 показаны переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с П регулятором, а на рис. 4 показаны переходные процессы тех же переменных состояния в системе регулирования скорости с анизотропийным регулятором.

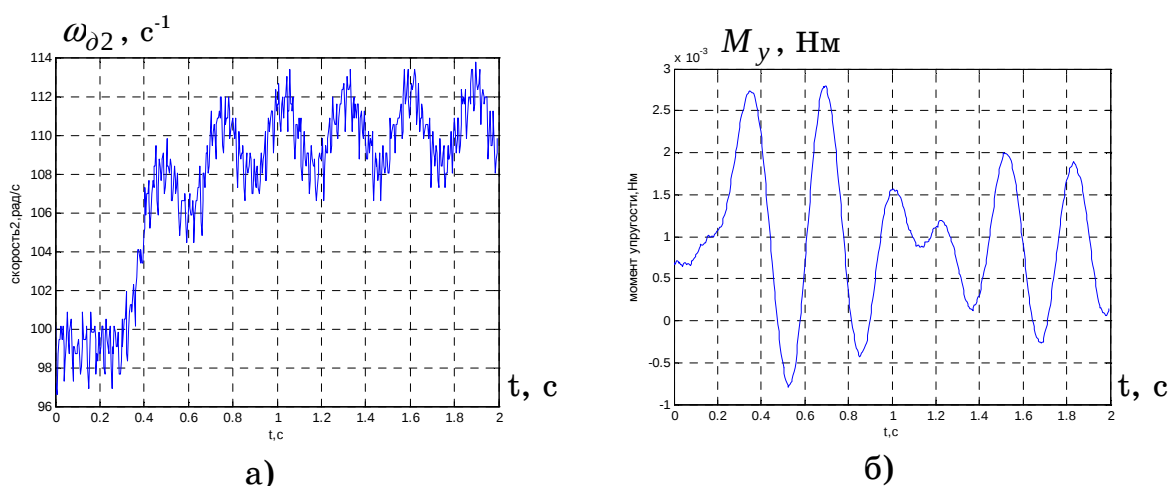
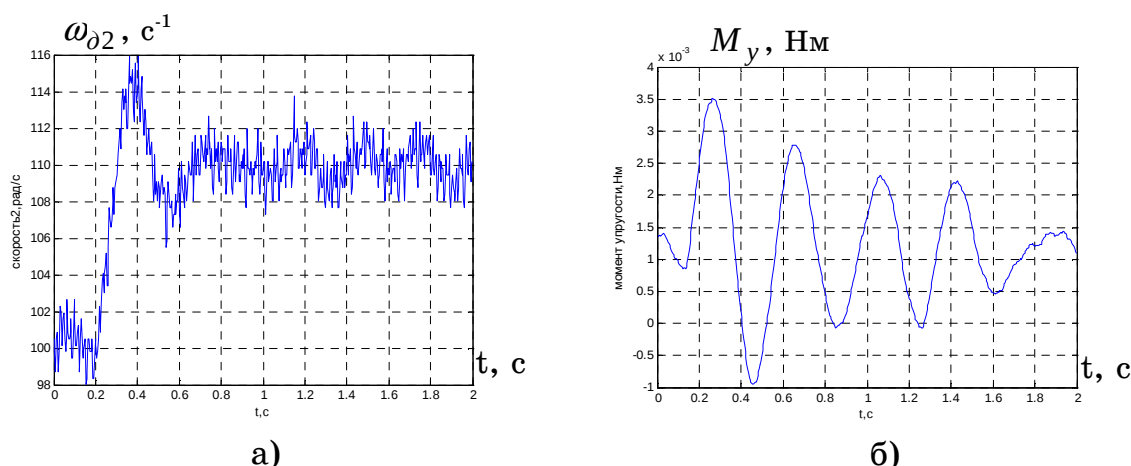


Рисунок 3 – Переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с П регулятором

Таким образом, применение анизотропийных регуляторов позволило повысить быстродействие системы в 5 раз за счет сокращения времени первого согласования с 0,5 с системы с типовым П регулятором до 0,1 с системы с робастным регулятором.

Кроме того, синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.



а)

б)

Рисунок 4 – Переходные процессы: а) скорости вращения второго двигателя и б) момента упругости в системе регулирования скорости с анизотропийным регулятором

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана методика экспериментального исследования синтезированных систем с анизотропийными регуляторами на стенде двухмассовой электромеханической системы. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов выполнен на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Экспериментально подтверждена адекватность разработанных математических моделей и правильность результатов теоретических исследований метода синтеза анизотропийных регуляторов на стенде двухмассовой электромеханической системы с упругой связью между исполнительным двигателем и рабочим органом. Установлено, что с помощью анизотропийных регуляторов скорости удалось повысить быстродействие экспериментальной установки и уменьшить ошибку регулирования при случайном изменении момента нагрузки по сравнению с системой регулирования скорости с типовыми регуляторами. Для управления объектами с изменяющимися параметрами можно использовать анизотропийный регулятор и анизотропийный наблюдатель, синтезированные только для одного центрального объекта управления, что подтверждает их слабую чувствительность к изменению параметров объекта управления. Показано, что с помощью синтезированных систем удастся уменьшить чувствительность синтезированной системы по сравнению с оптимальными системами, в частности, изменение момента инерции объекта управления в широком диапазоне не приводит к существенному изменению динамических

характеристик синтезированных систем, замкнутых анизотропийными регуляторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами / Т.Б. Никитина. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с.
2. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
3. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации/В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
4. Кунцевич В.М. От проблем управления одним объектом – к проблемам управления классами объектов /В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 1994. - № 1-2. – С. 3-15.
5. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42.
6. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R, Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – Pp. 427 – 432.
7. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ –optimization // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – Pp 2249 – 2250.
8. Hoyle D., Hyde R., Limebeer D.J.N. An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design / Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. – Brighton: 1991. – P. 1581-1585.
9. Limebeer D.J.N., Kasenally E.M., Perkins J.D. On the design of robust two degree of freedom controllers / Automatica. – 1993. – №29. – P. 157 – 161.
10. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления /В.М. Кунцевич // Труды научного семинара «70 – лет теории инвариантности». Москва, 2 июня 2008 г. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 61 – 90.
11. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления /В.М. Кунцевич // Праці міжнародної конференції «50 років інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України». Україна, Київ, 24-26 грудня 2007 р. – Київ: інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – С. 61-74.
12. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
13. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / [под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
14. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.
15. Clerc. M. Particle Swarm Optimization.–London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.
16. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.
17. Кузнецов Б.И. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, В.В. Коломиец. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с.

М.А. Поляков, Т.Ю. Ларионова

**ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ УДАЛЕННОЙ
ЛАБОРАТОРИИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЮ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Аннотация. Удаленная лаборатория рассматривается как система интегрирующая частные системы, которые реализуют отдельные аспекты педагогических сценариев удаленного обучения проектированию. Эти системы детализированы до уровня объекта управления, управляющего блока, их связей между собой и с внешней средой. Показана иерархичность частных систем.

Ключевые слова: удаленная лаборатория, теоретико-множественная модель, интегрированная система, педагогический сценарий обучения.

Постановка проблемы

Сфера применения удаленных лабораторий (англ.- remote laboratory (RL)) [1,2] в процессе инженерного образования непрерывно расширяется. Наряду с дисциплинами, изучающими принципы работы и методы расчета технических устройств, перспективно использовать RL в дисциплинах изучающих принципы проектирования этих устройств и систем на их основе, включая синтез структуры этих систем. При этом в RL для обучения проектированию используются специфичные педагогические сценарии, реализация которых усложняет структуру и увеличивает трудоемкость создания этих лабораторий. Отсутствие в доступной авторам литературе моделей типовой функциональной структуры RL затрудняет ее декомпозицию на подсистемы для упрощения процесса проектирования лаборатории. Поэтому разработка моделей функциональной структуры RL представляет актуальную научно-техническую задачу.

Анализ последних достижений и публикаций

В настоящей работе для решения этой задачи предлагается использовать теоретико-множественную модель интегрированной контроллерной системы управления [3,4]. В соответствии с этой моделью исходная проектируемая система (DS0) содержащая объект управления (англ. - control object (CO)) и управляющее устройство (англ. - control unit (CU)) декомпозируется на n подсистем включающие как части CO, так и части CU исходной системы $DS0=\{DS11, DS12,..DS1n\}$. При этом возможна ситуация, когда часть CU исходной системы не входит ни в одну из этих подсистем и образует новые системы следующего уровня. Как правило, в области перекрытия двух систем относящихся к различным уровням находятся CU системы более низкого уровня, которые являются CO системы более высокого уровня. Процесс декомпозиции продолжается до тех пор, пока множество элементов CU не входящее ни в одну из систем не окажется пустым. В частном случае, на каждом уровне декомпозиции может находиться одна система.

Модель становится более содержательной, если ввести в нее множество внешних связей систем входящих в интегрированную систему. Тогда j -я подсистема i -го уровня описывается $S_{ij}=\{X_{ij}, Y_{ij}\}$, где X_{ij} -входы, а Y_{ij} -выходы системы. Обозначив через X множество входов ($X=\bigcap X_{ij}$), а через Y -множество выходов всех систем ($Y=\bigcap Y_{ij}$), получим множество связей C как отображение $C:X*Y$. Выделим в этом множестве входные C_i , выходные C_o связи системы с внешней средой и внутренние связи C_o между входами и выходами элементов. При этом выполняется $C=C_i \cap C_o \cap C_c$.

Дальнейшая детализация модели связана с выделением в локальных системах CO и CU, декомпозицией CU_{ij} на управляющие (CM_{ij}) и операционные (OM_{ij}) автоматы с детализацией соединений между введенными элементами, разделением OM_{ij} на входные (OM_{iij}), выходные (OMO_{ij}) автоматы, заданием CM_{ij} кортежем его входов (CMX_{ij}), выходов (CMY_{ij}), состояний (S_{ij}), включая начальное состояние (S_{ij0}), функций выходов (μ_{ij}) и переходов (λ_{ij}):

$$DS_{ij}=\{CO_{ij}, CU_{ij}, C_{iij}, C_{oij}, C_{cij}\}, \quad (1)$$

$$CU_{ij}=\{CM_{ij}, OM_{ij}\}, \quad (2)$$

$$OM_{ij}=\{OM_{iij}, OMO_{ij}\}, \quad (3)$$

$$CM_{ij}=\{CMX_{ij}, CMY_{ij}, S_{ij}, S_{ij0}, \mu_{ij}, \lambda_{ij}\}. \quad (4)$$

Совокупность моделей (1)-(4) для всех возможных j будет описывать проектируемую систему на i -м уровне декомпозиции.

Изложение основного материала

Выделим локальные системы в удаленной лаборатории предназначенной для изучения систем управления электромеханическими устройствами основываясь на цели применения RL, педагогических сценариях и применяемых моделях СО.

Цель - дистанционно научить проектированию программно реализуемых алгоритмов управления для систем с электромеханическими устройствами. Педагогические сценарии предусматривают постепенное усложнение задач проектирования: переход от проектирования фрагментов алгоритма управления к проектированию всего алгоритма. При этом постепенно усложняется СО - от исправного, работающего в нормальном режиме сценарии предлагают проектирование алгоритма управления СО с развивающимися неисправностями, учитывающего в реальном времени более интенсивный поток событий управления СО, динамические изменения параметров внешних воздействий на систему и стохастический характер поведения СО.

Исходя из сценария использования, RL должна содержать модели следующих видов: физические, виртуальные и визуальные.

Физическая модель СО содержит электромеханику по функциям схожую с реальным объектом, но отличающуюся по параметрам. Например, реальный лифт имеет грузоподъемность полтонны, а модель - полкилограмма. Соответственно отличаются и параметры электромеханики.

Виртуальные модели содержат арифметические и (или) логические выражения описывающие поведение СО как конечного автомата, логического узла, системы содержащей блоки с передаточными функциями и др.

Визуальная модель представляет собой видеоизображение СО или набор графических элементов на экране дисплея, атрибуты, расположение и внешний вид которых отображают состояние и поведение физической и(или) виртуальной модели СО. Только визуальные модели доступны для наблюдения студенту в удаленном браузере. Пример визуальной модели бака с жидкостью - графический объект контура бака, степень (уровень) заливки которого пропорциональна

значению соответствующего программного счетчика из виртуальной модели.

При таком определении виртуальные модели являются СУ для визуальных моделей, и каждая такая пара образует локальную систему. Такие СУ могут быть реализованы программно в среде операционной системы (ОС) персонального компьютера. Физическая модель СО требует физического СУ, например, в виде промышленного контроллера или платы управления, содержащей микропроцессор и периферию сопряжения с физической моделью СО. Визуальная модель физического СО образует систему с реальными аппаратными средствами - WEB камерой и электромеханикой ее перемещения.

На основании введенных определений декомпозируем проектируемую RL на следующие системы:

1. **Физического СО** $DS_1=\{CO_1, CU_1\}$, где CO_1 - физическая модель объекта управления, CU_1 –устройство управления электромеханикой физической модели объекта управления. С точки зрения CU_1 , объект CO_1 представляет собой набор датчиков и исполнительных механизмов. Выходы датчиков O_{CO1} CO_1 являются входами I_{1CU1} , а входы I_{CO1} исполнительных механизмов соединены с выходами O_{1CU1} . Так как RL эксплуатируется, как правило, только в удаленном режиме, то среди выходов $CO1$ могут отсутствовать сигналы кнопок и других органов управления, которые используются во время эксплуатации реального объекта. Кроме того, в составе электромеханики модели CO_1 отсутствуют элементы, предназначенные для использования в аварийном, нештатном режиме реального объекта. Они могут моделироваться в виртуальных моделях других систем. Электромеханика физической модели проектируемого объекта это объект управления со стороны RL, но одновременно - устройство управления со стороны механической части этого объекта.

Устройство CU_1 обрабатывает информацию I_{1CU1} , теги событий управления студента I_{2CU3} и формирует сигналы управления O_{1CU1} физической моделью CO_1 , теги датчиков и состояний физической модели O_{2CU1} для использования другими системами.

2. **Видеоизображения СО** $DS_2=\{CO_2, CU_2\}$, где: CO_2 - средства видеонаблюдения; CU_2 – устройство управления средствами видеонаблюдения. В средствах CO_2 выделим источник видеоизображения и устройство изменения точки, ракурса съемки и освещенности объек-

та. Не смотря на то, что сложность этих устройств соизмерима или даже превышает сложность проектируемой системы, в RL используются стандартные технические решения. Поэтому, в данной работе система DS_2 не детализируется. Внешние связи DS_2 : O_{CU2} - выход видеоизображения WEB - камеры, который поступает на вход I_{CO3} системы DS_3 ; I_{CU2} - входы управления точкой, ракурсом съемки и освещенностью объекта, которые поступают с выходов O_{1CU3} системы DS_3 .

3. Визуального исправного СО $DS_3 = \{ CO_3, CU_3 \}$, где - CO_3 - визуальная модель исправного; CU_3 - виртуальная модель визуального исправного СО. Модель CO_3 представляет собой один или несколько графических экранов, каждый из которых соответствует определенному взгляду на проектируемую систему, например вид спереди, вид изнутри и т.п. Экраны содержат видеоизображение физического СО или графические объекты (ГО) и виртуальные органы управления (ВОУ) проектируемым объектом и видеоизображением физической модели объекта.

Как уже отмечалось, видеоизображение формируется сигналом со входа I_{1CO3} . Выходы O_{1CO3} - это значения сигналов от ВОУ. Они поступают на входы I_{2CU3} , где трансформируются в теги событий управления студента O_{3CU3} для воздействий на работу спроектированной им системы. Выходы O_{2CO3} - это значения сигналов от ВОУ видеоизображением. Они поступают на входы I_{3CU3} где трансформируются в теги событий управления студента O_{1CU3} видеоизображением физической модели ОУ.

ГО соответствуют видимым частям физической модели. Атрибуты ГО, такие как координаты на экране, угол поворота, цвет, ширина, процент заливки фигуры и другие, изменяются в зависимости от значений тегов управления, поступающих на входы I_{2CO3} с выходов O_{2CU3} .

В системе DS_3 модель CU_3 выступает в качестве управляющего блока для модели CO_3 . В функции CU_3 входит формирование значений тегов управления ГО CO_3 в функции времени, событий управления студента, значений тегов датчиков и состояний физической модели СО.

4. Визуального скрытого СО $DS_4 = \{ CO_4, CU_4 \}$, где CO_4 - визуальная модель скрытого СО; CU_4 - виртуальная модель визуального скрытого СО. По своей структуре модель CO_4 повторяет модель CO_3 ,

отличия заключаются в ее ГО, которые соответствуют скрытым элементам объекта управления, т. е. элементам, которые активны в нештатных, аварийных или вспомогательных режимах работы объекта управления. Примером таких элементов может служить тормоз пассажирского лифта, который должен сработать при обрыве троса.

Модель CO_4 имеет только входы тегов управления ГО I_{CO4} , которые поступают с выходов O_{1CO4} блока CU_4 . Блок CU_4 формирует значения этих тегов в зависимости от значений тегов исполнительных механизмов скрытой части виртуального объекта управления.

5. Визуализации внешних факторов СО $DS_5=\{CO_5, CU_5\}$, где CO_5 - визуальная модель внешних факторов СО; CU_5 - виртуальная модель визуализации внешних факторов СО. Элементы модели CO_5 представляют собой ГО, которые отображают текущие значения или динамику изменения во времени (тренды) тегов внешних факторов. Например, параметров сети питания, температуры окружающей среды, тока нагрузки и другие. Элементы модели CU_5 представляют расчетно-графическую модель динамики внешних факторов СО. Входами этой модели являются теги параметров внешних факторов, а выходами - теги управления ГО модели CO_5 , теги потока сгенерированных событий управления. Например, при исследовании пропускной способности системы пассажирского лифта может быть сгенерирован поток событий вызовов лифта.

6. Визуализации технического состояния СО $DS_6=\{CO_6, CU_6\}$, где CO_6 - визуальная модель технического состояния СО; CU_6 - виртуальная модель визуализации технического состояния СО. Если в качестве модели технического состояния принята автоматная модель, то элементами CO_6 будут ГО графа, который визуализирует текущее состояние этого автомата - его вершины, действия и дуги. Теги управления ГО CO_6 формируются расчетно-графической моделью CU_6 , которая, в свою очередь, управляется тегами сценариев изменения технического состояния СО.

На втором уровне декомпозиции виртуальные модели систем DS_3 - DS_6 дополняются устройствами управления и образуют системы DS_7 - DS_{10} :

1. Виртуальная модель исправного СО $DS_7=\{CO_7, CU_7\}$, где объектом CO_7 управления системы DS_7 является устройство CU_3 управления системы DS_3 . ($CO_7=CU_3$), а CU_7 - устройство управления вирту-

альной моделью исправной (функционирующей в штатном режиме) проектируемой системы. Модель CU_7 представляет собой управляющий автомат, который формирует теги исполнительных механизмов виртуального СО исходя из значений тегов состояний физической и визуальной моделей СО, тегов событий управления СО, тегов управления режимами моделирования виртуального СО. Примерами тегов управления режимами могут служить масштаб модельного времени, синхронизация поведения физической и виртуальной моделей, учет событий скрытой части СО и выбор источника событий управления. Структура автомата CU_7 определяется студентом путем разработки и ввода описания алгоритма управления СО.

2. Виртуальная модель скрытого СО $DS_8=\{CO_8, CU_8\}$, где объект управления $CO_8=CU_4$; CU_8 - устройство управления виртуальной моделью скрытой части проектируемой системы. Модель CU_8 представляет собой управляющий автомат аналогичный модели CU_7 .

3. Виртуальная модель внешних факторов СО $DS_9=\{CO_9, CU_9\}$, где объект управления $CO_9=CU_5$; CU_9 - устройство управления виртуальной моделью внешних факторов проектируемой системы. Модель CU_9 - автомат управляющий сценариями изменения внешних факторов СО путем формирования значений тегов параметров внешних факторов. Например сценариями изменения нагрузки СО, интенсивности использования СО.

4. Виртуальная модель технического состояния СО $DS_{10}=\{CO_{10}, CU_{10}\}$, где объект управления $CO_{10}=CU_6$; CU_{10} - устройство управления виртуальной моделью технического состояния проектируемой системы. Модель CU_{10} - автомат, который инициирует события возникновения дефектов в СО и изменяет интенсивность их развития. Например, событие параметрического отказа системы охлаждения изменяет техническое состояние СО.

На третьем уровне декомпозиции CU системы DS_1 - DS_{10} образуют **систему управления режимами RL** $DS_{11}=\{CO_{11}, CU_{11}\}$, где объект управления CO_{11} логически объединяет несколько устройств управления систем второго уровня декомпозиции $CO_{11}=CU_1 \cap CU_2 \cap CU_7 \cap CU_8 \cap CU_9 \cap CU_{10}$; CU_{11} - устройство управления режимами RL. Модель CU_{11} - автомат, который управляет запуском и остановкой автоматов входящих в CO_{11} , изменяет состав их состояний, входов и выходов и тем

самым реализует различные педагогические сценарии использования RL.

Проведенная декомпозиция системы RL позволяет определить состав и внешние связи ее элементов и создает предпосылки для их раздельного проектирования.

Выводы

1. Функциональная структура удаленной лаборатории для обучения проектированию систем управления существенно сложнее структуры систем управления в той предметной области, в которой происходит обучение. Кроме задач управления объектом, эта лаборатория решает задачи проектирования алгоритмов управления, реализации различных моделей объектов управления, педагогических сценариев обучения, обмена в режиме реального времени информацией с удаленным исполнителем лабораторной работы, управления режимами работы лаборатории и другие.

2. Рассмотрение функциональных элементов удаленной лаборатории в координатах "объект управления - управляющее устройство" показало, что отдельные элементы выполняют функции объекта управления в одной локальной системе и управляющего устройства в другой. Теоретико-множественные модели локальных систем описывают удаленную лабораторию как интегрированную систему управления.

3. Предложенные теоретико-множественные модели позволяют специфицировать внешние и внутренние связи проектируемых функциональных элементов. Их предполагается использовать при проектировании удаленной лаборатории в Запорожском национальном техническом университете в рамках работ по международной программы "Темпус" по созданию обучающих курсов для дистанционного инженерного образования по направлению «Электромеханика» базирующихся на удаленной инженерии и виртуальных инструментариях.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Henke and H.-D. Wuttke: "Web-based educational tool access", IASTED International Conference Computers and Advanced Technology in Education – CATE 2003, Rhodes, Greece, June 30 - July 2, 2003.
2. K. Henke, St. Ostendorff and H.-D. Wuttke: "A Flexible and Scalable Infrastructure for Remote Laboratories - Robustness in Remote Engineering Laboratories", The Impact of Virtual, Remote and Real Logistics Labs - ImViReLL2012, Bremen, February 28 – March 02, 2012.
3. Поляков М.А. Теоретико - множественная модель интегрированной контроллерной системы управления /М.А. Поляков// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 4.- Дніпропетровськ, 2009.-С. 131-137.
4. Поляков М.А. Теоретико- множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления /М.А. Поляков // Системні технології.- Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.- Випуск 2 .- Дніпропетровськ, 2012. - С. 75-81.

І.С. Дмитрієва, Д.О. Левченко

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТУ

Анотація: Робота присвячена дослідженню побудові кінематичної моделі маніпуляційного робота. Розглядаючи систему маніпулятора робота, за допомогою процедури Денавіта-Хартенберга, записані кінематичні рівняння.

Ключові слова: рівняння кінематики, маніпуляційний робот, Денавіт-Хартенберг.

Вступ. Застосування робототехнічних систем у виробництві, науці та побуті знаменує собою вихід людської цивілізації на принципово новий технологічний рівень. Серед роботів (тобто технічних систем, які у своїх діях імітують рухові й інтелектуальні функції людини) виділяються маніпуляційні роботи, головна властивість яких - відтворення функцій людських рук в процесі трудової діяльності.

Проектування маніпуляційного робота є складною задачею в першу чергу тому, що для її вирішення треба володіти теоретичними знаннями в декількох різних областях та практичними навичками роботи з різноманітними засобами.

Мета. На першому етапі проектування маніпуляційної системи необхідно розглянути його кінематику, тобто знайти просторове положення ланок, як функції часу, а також зміни його швидкості і прискорень, які повинні відповідати вимогам технічного процесу.

Пряма задача кінематики маніпуляційного робота.

Виконавчим пристроєм маніпуляційного робота є маніпулятор. Це - багатоланковий механізм з багатьма ступенями рухливості.

Залежно від характеру кожної з ступенів рухливості (поступальної або обертальної), їх послідовності і взаємної орієнтації в просторі формується та чи інша базова система координат маніпулятора зі своїми особливостями і формою просторової фігури [1]. Таким чином, вид базової системи координат маніпулятора визначає його конструк-

тивне виконання, рівень складності системи управління і труднощі програмування виконавчих рухів.

Системи координат, в яких можуть діяти маніпулятори:

- прямокутна, або декартова, система координат;
- циліндрична система координат;
- сферична, або полярна, система координат;
- кутова, або ангулярна, сферична системі координат;
- ангулярна циліндрична, або складна циліндрична, система координат.

На рисунку 1 представлена класифікація роботів по базовій системі координат.

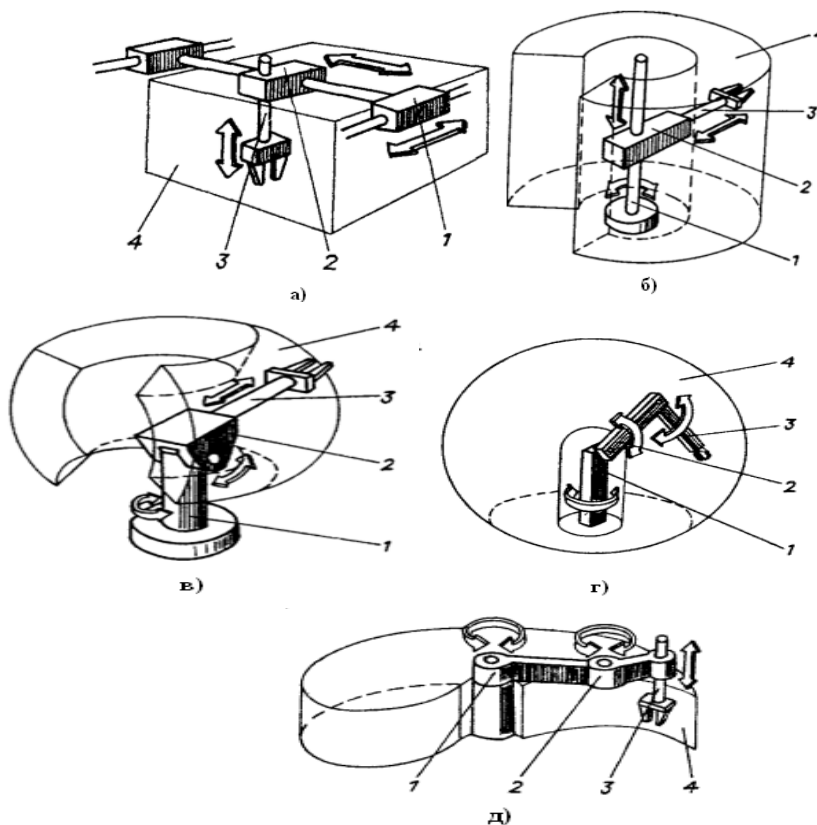


Рисунок 1 - Класифікація роботів по базовій системі координат

В роботі досліджується маніпулятор (рис. 1, г) з кутовою, або ангулярною, сферичною системою координат.

Промислові роботи, як правило, володіють п'ятьма-шістьма ступенями рухливості. Однак часто зустрічаються роботи мають менше чотирьох ступенів рухливості. Управління такими настільки складними механізмами, як багатоланкові маніпулятори, також може виявитися досить складним. Навіть при виконанні найпростішої

операції (переміщення захватного пристрою багатоланкового маніпулятора з точки А в точку В) для розрахунку керуючої інформації потрібно виконати великий обсяг обчислень.

У тому разі, якщо маніпулятор має всього одну ступінь рухливості, то управління переміщенням в задану точку не викликає ніяких труднощів - достатньо всього лише розрахувати величину кута повороту θ . Зовсім інша ситуація виникає в тому випадку, коли маніпулятор крім обертального може здійснювати зворотно-поступальні рухи. Щоб змусити схват переміститися з вихідної точки в цільову, необхідно розрахувати відповідні траєкторії руху для кожної з ланок. Для того щоб по відомим величинам обертання або лінійного переміщення по кожній з ступенів рухливості знайти положення захватного пристрою а також всього маніпулятора або якої-небудь з його частин використовується принцип перетворення координат за допомогою матриць перетворень.

Пряма задача кінематики маніпулятору полягає в знаходженні координат кінця кінематичного ланцюга, при заданій довжині ланок і кутів між ними [2].

На рисунку 2 представлено розташування систем координат маніпулятору.

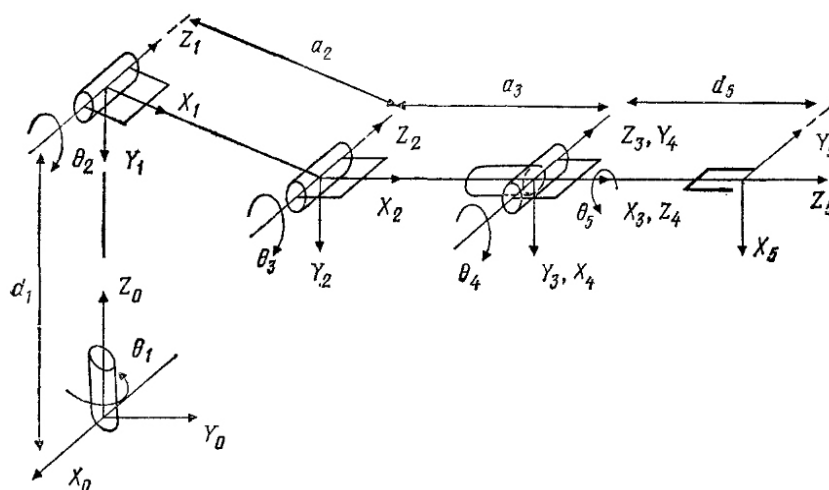


Рисунок 2 – Розташування систем координат

Положення і орієнтація n -ї ланки в системі координат буде визначатися за допомогою виразу (1).

$$T_0^5 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 A_4^5 \quad (1)$$

де A_{i-1}^i - матриця однорідного перетворення $(i-1)$ -ї в i -у систему координат.

Матриця T_0^5 має вигляд (2).

$$T_0^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

де a - вектор підходу; o - вектор орієнтації; n - вектор нормалі.

Матрицю однорідного перетворення $(i-1)$ -ї в i -у систему координат по відношенню до локальних систем координат зчленувань виконаємо за допомогою перетворення Денавіта – Хартенберга (3).

$$A_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

де d_i - ланкова відстань, θ_i - кут нахилу в зчленуванні, a_i - довжина ланки, α_i - кут скручування ланки.

Чотири параметри d_i , a_i , α_i , θ_i складають мінімальний набір, необхідний для опису кінематичної конфігурації кожної ланки виконавчого механізму робота. Значення параметрів системи координат ланок маніпулятора наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри зчленувань для маніпуляційного робота

Зчленування	θ_i	α_i	a_i , (см)	d_i , (см)
i=1	θ_1	-90	0	5
i=2	θ_2	0	10	0
i=3	θ_3	0	10	0
i=4	θ_4	90	0	0
i=5	θ_5	0	0	2

Насправді ми маємо справу з п'ятьма незалежними рівняннями щодо 5 невідомих незалежних змінних переміщень зчленувань.

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_1^2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 10C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & 10S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_2^3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 10C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & 10S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_4^5 = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Таким чином матриця T_0^5 має такі елементи:

$$\begin{aligned} (T_0^5)_{11} &= C_1 C_{23} C_4 C_5 - C_1 S_{23} S_4 C_5 - S_1 S_5 \\ (T_0^5)_{12} &= -C_1 C_{23} C_4 S_5 + C_1 S_{23} S_4 S_5 - S_1 C_5 \\ (T_0^5)_{13} &= C_1 C_{23} S_4 + C_1 S_{23} C_4 \\ (T_0^5)_{14} &= 2C_1 C_{23} S_4 + 2C_1 S_{23} C_4 + 10C_1 (C_{23} + C_2) \\ (T_0^5)_{21} &= S_1 C_{23} C_4 C_5 - S_1 S_{23} S_4 S_5 + C_1 S_5 \\ (T_0^5)_{22} &= -S_1 C_{23} C_4 S_5 + S_1 S_{23} S_4 S_5 + C_1 C_5 \\ (T_0^5)_{23} &= S_1 C_{23} S_4 + S_1 S_{23} C_4 \\ (T_0^5)_{24} &= 2S_1 C_{23} S_4 + 2S_1 S_{23} C_4 + 10S_1 (C_{23} + C_2) \\ (T_0^5)_{31} &= -S_{23} C_4 C_5 - C_{23} S_4 C_5 \\ (T_0^5)_{32} &= -S_{23} C_4 S_5 + C_{23} S_4 S_5 \\ (T_0^5)_{33} &= -S_{23} S_4 + C_{23} C_4 \\ (T_0^5)_{34} &= -2S_{23} S_4 + 2C_{23} C_4 + 5 + 10(S_{23} + S_2) \\ (T_0^5)_{41} &= (T_0^5)_{42} = (T_0^5)_{43} = 0 \\ (T_0^5)_{44} &= 1 \end{aligned}$$

де $C_i = \cos \theta_i$, $S_i = \sin \theta_i$, $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$.

Висновки. В результаті дослідження виявлено, що представлені рівняння кінематики описують просторове положення ланок маніпуляційного роботу. Ці рівняння необхідні для дослідження поведінки роботу, а також для визначення траєкторії руху схвату.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з вирішенням оберненої задачі кінематики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Накано Э. Введение в робототехнику / Э. Накано / - М: Мир, 1988. – 334 с.
2. Шахинпур М. Курс робототехники / М.Шахинпур / - М.: Мир, 1990. - 564 с.
3. Бурдаков С.Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов и роботизированных комплексов / С.Ф. Бурдаков, В.А. Дьяченко, А.Н. Тимофеев / - М.: Высшая школа, 1986. - 256 с.
4. Зенкевич С. Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами (ученик для ВУЗов) / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко / - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 400 с.

Т.Н. Дубовик, И.А. Алпатова

**КОГНИТИВНЫЕ МОДЕЛИ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
АДАПТАЦИЕЙ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЛИЧНОСТИ.
МЕТОДИЧЕСКИЙ АСПЕКТ. ЧАСТЬ 1**

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной задачи: повышения качества образования путем создания когнитивной модели с параметрической адаптацией. Данная модель представлена в форме регрессионного уравнения, которое связывает между собой показатели усвоения изучаемого материала с характеристиками личности. Адаптация модели осуществляется применительно к процессу изучения учебных дисциплин, определенных учебной программой специальности "специализированные компьютерные системы".

Ключевые слова: тренажер, когнитивная модель, когорта, кластер, параметрическая адаптация, математическая модель, корреляция, рейтинг.

Постановка задачи

Для исследования влияния комплекса психофизиологических и интеллектуальных факторов на когнитивные процессы используется модель в форме регрессионного уравнения, которое связывает между собой показатели усвоения изучаемого материала (оценки, рейтинги) с характеристиками личности учащегося. К последним относятся такие характеристики как: уровень подготовки по результатам аттестации, интеллектуальные качества, эмоциональная устойчивость, короткая память, долгая память и др. Адаптация модели осуществляется применительно к процессу освоения учебных дисциплин, определенных учебной программой специальности "специализированные компьютерные системы".

Исходными данными служат: перечень изучаемых дисциплин, рейтинги этих дисциплин, перечень факторов, определяющих модель учащегося, тестовые оценки факторов, которые в модели входят в виде переменных, а коэффициенты при этих переменных являются параметрами модели. Эти коэффициенты определяют уровень влияния

факторов на когнитивные процессы. Данные об оценке этих факторов получаются на основе тестирования учащегося известными тестами [3, 6].

Основная часть

Построение когнитивной модели осуществляется в три этапа.

На первом этапе проводится предварительный анализ парциального влияния каждого из рассмотренных факторов. На основе корреляционного анализа строится матрица влияния факторов на процесс обучения. Для оценки синергетических эффектов вычисляются средние значения коэффициентов корреляции по дисциплинам для каждого фактора и средние значения по факторам для каждой дисциплины.

Средний коэффициент корреляции по дисциплинам вычисляется как среднее арифметическое коэффициентов корреляции рейтингов всех рассматриваемых дисциплин с определенным фактором модели. Этот показатель указывает на относительное влияние данного фактора на усвоение материала по всем рассмотренным дисциплинам. Средний коэффициент корреляции по факторам определяется как среднее арифметическое коэффициентов корреляции всех рассмотренных факторов с одной из дисциплин. Этот коэффициент характеризует степень зависимости данной дисциплины от рассмотренных факторов при их совместном учете в оценках успешности процесса обучения, этот коэффициент может служить мерой синергетического эффекта. С целью определения доминирующих параметров для каждой дисциплины из анализа корреляционной матрицы выделяются те факторы, у которых наблюдается высокий коэффициент парной корреляции с соответствующей дисциплиной, пороговое значение задается (например, $r > 0,5$).

На втором этапе для набора выделенных факторов строятся множественные регрессионные уравнения и исчисляются коэффициенты множественной корреляции.

На третьем этапе осуществлялся переход к нормированным переменным для вычисления коэффициентов при соответствующих факторах (параметров модели) для оценки их парциального влияния на качество усвоения материала по различным дисциплинам. Эти коэффициенты и определяют относительный уровень влияния соответствующих факторов модели на качество усвоения материала по изу-

Определим показатель усвоения материала (оценку знаний, рейтинг) $y(y_i)$ как случайную величину, которая выражается через независимую переменную $x(x_i)$ где $j=1,2...k$, k – целое число, x_i – факторы влияния на процесс познания – интеллектуальные способности, психофизиологические факторы и уровень подготовки (определяются тестированием). Рассмотрим линейное регрессионное уравнение с k -переменными. По результатам n выборочных наблюдений отыскиваются коэффициенты (параметры) $\hat{b}_i$ ($i = \overline{0, k}$) следующего регрессионного уравнения:

Более удобно перейти к нормированным переменным

тогда уравнение (1) переходит в уравнение (2)

Коэффициенты β_i в относительных величинах характеризуют степень влияния i -го фактора на результат. Если коэффициенты β_i определять методом наименьших квадратов, то оценки этих коэффициентов находят решением системы уравнений:

где r_{0i} – оценка коэффициента корреляции между величинами y и x_i , $i = \overline{1, k}$;

r_{ij} – оценка коэффициента корреляции между величинами x_i и x_j , $i, j = \overline{1, k}$.

Из этой системы уравнений следует, что коэффициенты $\hat{\beta}_i$ при коррелированных факторах не могут быть определены независимо

друг от друга. Оценки этих коэффициентов могут быть найдены по формулам Крамера:

$$\hat{\beta}_i = \frac{D_i}{D}, \quad i = \overline{1, k}.$$

Определитель D системы уравнений имеет вид:

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & r_{k3} & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Определитель D_i получают из определителя D заменой i -го столбца столбцом правой части системы (3). Оценки коэффициентов b_i находят по формулам:

$$\hat{b}_i = \hat{\beta}_i \frac{s_y}{s_{x_i}}, \quad \hat{b}_0 = \bar{y} - \hat{b}_1 x_1 - \hat{b}_2 x_2 - \dots - \hat{b}_k x_k. \quad (5)$$

Средние квадратичные отклонения ошибок коэффициентов $\hat{b}_0$ и $\hat{b}_i$ ($i = \overline{1, k}$) вычисляются по формулам:

$$s_{\hat{b}_0} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-k-1}}, \quad s_{\hat{b}_i} = \frac{\sigma}{\sqrt{n-k-1}} \sqrt{\frac{D_{ii}^*}{D^*}}. \quad (6)$$

где D^* – определитель корреляционной матрицы независимых переменных; D_{ii}^* – определитель, получаемый из определителя D^* вычеркиванием i -й строки и i -го столбца. Определитель D^* имеет вид:

$$D^* = \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1k} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{k1} & k_{k2} & \dots & k_{kk} \end{vmatrix}, \quad k_{ii} = s_{x_i}^2, \quad k_{ij} = r_{x_i x_j} s_{x_i} s_{x_j} \quad (7)$$

В качестве оценки дисперсии σ^2 берем величину s^2 . Значение s^2 находится по одной из формул:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[y_i - (\hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_{1i} + \hat{b}_2 x_{2i} + \dots + \hat{b}_k x_{ki}) \right]^2}{n-k-1}, \quad (8)$$

$$s^2 = s_y^2 (1 - R^2) \frac{n-k-1}{n-1}$$

При $n \gg k$ параметр s^2 можно определять по формуле:

$$s^2 = s_y^2 (1 - R^2). \quad (9)$$

При этом коэффициент множественной корреляции R вычисляется по одной из формул:

$$R = \left[\sum_{i=1}^k r_{0i} \hat{\beta}_i \right]^{\frac{1}{2}}, \quad R = \left(1 - \frac{s^2}{s_y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})(y_{p_i} - \bar{y}_p)}{(n-1)s_y s_{y_p}}, \quad R = \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

где y_i – опытные значения результирующего фактора;

y_{p_i} – значения результирующего фактора, рассчитанные по уравнениям (3).

Определитель Δ представляет собой определитель полной нормированной корреляционной матрицы

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_{01} & r_{02} & \dots & r_{0k} \\ r_{10} & 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{20} & r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k0} & r_{k1} & r_{k2} & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Определитель Δ_{11} получают из определителя Δ вычеркиванием первой строки и первого столбца. Этот определитель совпадает с определителем D системы уравнений (3). Скорректированное значение коэффициента множественной корреляции определяется формулой:

$$\hat{R} = \left[1 - \left(1 - R^2 \right) \frac{n-1}{n-k-1} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Квадрат коэффициента множественной корреляции (коэффициент детерминации) показывает долю дисперсии функции отклика, обусловленную выбранным регрессионным уравнением.

Дисперсия ошибки регрессионного уравнения в точке $(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_k^*)$ определяется выражением:

$$s_{np}^2 = \left[\frac{\sigma^2}{n-k-1} + \sum_{i=1}^k (x_i^* - \hat{x}_i)^2 s_{b_i}^2 + \sum_{i>j} (x_i^* - \hat{x}_i)(x_j^* - \hat{x}_j) K_{b_i b_j} \right] \quad (14)$$

При этом корреляционный момент между коэффициентами $\hat{b}_i$ и $\hat{b}_j$ вычисляется так

$$K_{\hat{b}_i \hat{b}_j} = \left(\frac{\sigma^2}{n - k - 1} \right) \frac{D_{ij}^*}{D^*} \quad (15)$$

где D^* – определитель корреляционных моментов всех независимых переменных;

D_{ij}^* – алгебраическое дополнение элемента k_{ij} , определитель, получаемый из определителя (4.6) вычеркиванием i -й строки и j -го столбца и умноженный на $(-1)^{i+j}$.

Дисперсия ошибки прогнозирования функции отклика в точке $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$ с учетом разброса индивидуальных значений относительно регрессионного уравнения имеет вид:

$$s_{np}^2 = \left[\sigma^2 + \frac{\sigma^2}{n - k - 1} + \sum_{i=1}^k (x_i^* - \hat{x}_i)^2 s_{b_i}^2 + 2 \sum_{i>j} (x_i^* - \hat{x}_i)(x_j^* - \hat{x}_j) K_{\hat{b}_i \hat{b}_j} \right] \quad (16)$$

В более компактной форме это выражение можно записать так:

$$s_{np}^2 = \sigma^2 \left[1 + \frac{1}{n - k - 1} + \frac{1}{n - k - 1} \sum_{i,j=1}^k \frac{D_{ij}^*}{D^*} (x_i^* - \hat{x}_i)(x_j^* - \hat{x}_j) \right] \quad (17)$$

Верхняя и нижняя доверительные границы прогнозируемого значения результирующего фактора в точке $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$ вычисляется по формуле:

$$y_o, y_n = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1^* + \hat{b}_2 x_2^* + \dots + \hat{b}_k x_k^* \pm t_{\gamma, n-k-1} s_{np} \quad (18)$$

где $t_{\gamma, n-k-1}$ – коэффициент распределения Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности γ и числу степеней свободы $v = n - k - 1$.

Приведенные выражения можно представить в матричной форме. Уравнение множественной регрессии в матричной форме имеет вид:

$$Y = BX \quad (19)$$

где Y – вектор наблюдений результирующего фактора; X – матрица независимых переменных; B – вектор параметров, подлежащих оцениванию.

Доверительные границы результирующего фактора в точке, определяемой вектором X^* , вычисляются по формуле [1]

$$y_o, y_n = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 x_1^* + \dots + \hat{b}_k x_k^* \pm t_{\gamma, n-k-1} s \sqrt{1 + X^{*'} (X'X)^{-1} X^*} \quad (20)$$

где $t_{\gamma, n-k-1}$ – коэффициент, определяемый из распределения Стьюдента с $(n - k - 1)$ степенью свободы; X' – транспонированная матрица наблюдений; X^* – вектор-столбец, характеризующий точку в k -мерном пространстве, в которой производится прогнозирование функции отклика.

Среднее квадратичное отклонение ошибки прогнозирования в точке, определяемой вектором X^* , записывается так:

$$s_{np} = s \sqrt{1 + X^{*'} (X'X)^{-1} X^*} \quad (21)$$

Выражения (7), (8) эквивалентны. Однако выражением (7) удобнее пользоваться при определении вклада отдельных составляющих в ошибку прогнозирования оцениваемых параметров [2].

Определения и исходные данные

Введем несколько определений для обобщенных рейтингов. Будем различать следующие показатели:

- рейтинг студента по дисциплине – данные контрольных испытаний из соответствующей ведомости; -рейтинг студента по кластеру (блоку) дисциплин, вычисляется как среднее арифметическое по рейтингам всех дисциплин кластера;

- рейтинг студента по дисциплинам, выбранным по некоторому признаку для целей исследования, вычисляется как среднее арифметическое по рейтингам выбранных дисциплин;

- рейтинг студента по всем изученным на данный момент времени дисциплинам, вычисляется как среднее арифметическое по рейтингам всех изученных дисциплин;

- рейтинг дисциплины, вычисляется как среднее арифметическое по рейтингам всех студентов, изучавших данную дисциплину;

- рейтинг кластера дисциплин, вычисляется как среднее арифметическое по рейтингам дисциплин, включенных в кластер;

- кластеры дисциплин остаются неизменными на протяжении всего исследования, они являются результатом классификации. Кластеры формируются в соответствии с выводами локального феноменологического анализа.

Исходные данные для расчетов формируются в виде двух реляционных баз данных:

1) база данных всех студентов, содержащая рейтинги каждого студента по всем изученным дисциплинам. Таблица размером $N1 \times N2$, $N1$ – число студентов, $N2$ – число дисциплин.

2) база данных всех студентов, содержащая данные тестов, определяющих интеллектуальные и психофизиологические параметры каждого студента. Таблица размером $N1 \times N3$, $N1$ – число студентов, $N3$ – число характеристик, определенных набором тестов.

Все дисциплины рабочей программы по специальности "специализированные компьютерные системы" разбиты на три кластера. Первый кластер дисциплин включает цикл дисциплин по программированию, второй – по математическим основам моделирования и алгоритмов, третий кластер включает дисциплины, связанные с созданием технических устройств и элементов компьютерной техники. В каждом из блоков выбираются три условно ведущих (или характерных) дисциплины, которые реализованы в составе компьютерного тренажера.

Для исследований выбираются три когорты студентов – когорта 1 – контроля и когорты 2 и 3 – наблюдения. В когорте 1 контроля (без тренажера, n_1 студентов), в когорте 2 наблюдения (эксперимент с использованием адаптивного тренажера, n_2 студентов), в когорте 3 наблюдения (эксперимент с использованием неадаптивного тренажера, n_3 студентов). Наличие когорты 3 имеет смысл, если имеется набор необходимых статистических данных, это расширяет рамки исследований.

Когорты формируются таким образом, чтобы распределение студентов по успеваемости было статистически близким в смысле близости математических ожиданий и дисперсий рейтингов. Для этих когорт средние значения рейтингов до начала эксперимента обозначены, соответственно, $R_1 \pm r_1$ – когорта 1, $R_2 \pm r_2$ – когорта 2, $R_3 \pm r_3$ – когорта 3, где r_1, r_2, r_3 – отклонения значений от среднего. При больших массивах выборок R_1, R_2, R_3 – вычисляются как математические ожидания рейтингов для соответствующих когорт, r_1, r_2, r_3 – вычисляются как среднеквадратичные отклонения, соответственно.

Для эксперимента отбираются по три дисциплины в каждом кластере: с максимальным, средним и минимальным значениями рейтинга, соответственно. Рейтинги 1,2,3 вычисляются для соответствующих

групп учащихся (когорт), они преобразовываются в один средний рейтинг для сравнительного анализа рейтингов дисциплин [3,4,5].

В перспективе работы: ранжирование факторов влияния на когнитивные процессы, создание моделей и алгоритма построения когнитивных процессов, формулировка задачи прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кендал М. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М. Кендал, А. Стьюарт. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
2. Алпатова І. А. Моделі та алгоритми оцінки впливу екологічно-гігієнічної ситуації промислового регіону на захворюваність населення хворобами шкіри / І. А. Алпатова // Медична інформатика та інженерія. – 2009. – №2. – С.57–61.
3. Дубовик Т.Н., Сергеева О.В., Дубовик Д.Д. Использование тестовых систем для повышения качества обучения Materiały VIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Nauka: teoria i praktyka - 2012» Przemysł Nauka i studia. 2012 - 88 str. Стр. 31-33.
4. Дубовик Т.М., Курта А, Бекедова С. Информационные технологии в управлении сложными системами [текст] / Т.Н. Дубовик // Материалы научной конференции 2011, Днепропетровск, Изд. «Свидлер А.Л.», – С 375 – 377.
5. Дубовик Т.М., Семьонов В.А. К вопросу об адаптации и настройке моделей обучения [текст]/ Т.Н. Дубовик // Региональный межвузовский сборник научных работ «Системные технологии» 3(86) 2013. – С.19–28.
6. Аванесов В.С., Хохолова Т.С., Ступак Ю.А., Потап О.Е., Чернявский В.Г., Плискановський С.А. Педагогические тесты. Вопросы разработки и применения [Текст] Пособия для преподавателей / В.С. Аванесов, Т.С. Хохолова, Ю.А. Ступак, О.Е. Потап, В.Г. Чернявский, С.А. Плискановський – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – 64 с.

Л.О. Кириченко, Ю.А. Кобицкая, А.В. Стороженко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ

Аннотация. В работе проведен сравнительный анализ вейвлет-характеристик детерминированных хаотических и случайных самоподобных реализаций. Показано, что спектр вейвлет-энергии и вейвлет-энтропия отражают характерные особенности фрактальной и корреляционной структуры реализаций. Предложено использовать вейвлет-характеристики в качестве знаний в экспертной системе для различения временных рядов, обладающих 0 фрактальными свойствами.

Ключевые слова: энтропия подобия, вейвлет-декомпозиция, вейвлет-энтропия, хаотическая реализация, самоподобная стохастическая реализация.

Введение и цель

Многочисленные исследования, проведенные в последние десятилетия, показали, что многие информационные, биологические, физические, технологические процессы обладают сложной фрактальной структурой. Математическими моделями сложных систем, проявляющих нерегулярную динамику, являются как случайные, так и детерминированные хаотические процессы. В последние годы для анализа, моделирования и прогнозирования сложных процессов все большее применение находят методы интеллектуального анализа данных. В работе [1] предложена экспертная система (ЭС), предназначенная для исследования фрактальной структуры временных рядов. Для анализа характерных особенностей рядов в базу знаний добавлен блок знаний, определяющий информационную сложность системы. С помощью модифицированной ЭС были проведены исследования фрактальных временных рядов разной природы, которые показали возможность распознавания различных состояний динамики системы [2-4].

Одним из мощных инструментов исследования и классификации временных рядов является анализ, базирующийся на вейвлет-преобразованиях. Кратномасштабный анализ позволяет проводить декомпозицию временного ряда на составляющие с различными частотными диапазонами. Использование вейвлет-характеристик в качестве знаний для ЭС дает возможность распознавания характерных особенностей частотного распределения у фрактальных сигналов.

Целью представленной работы является проведение сравнительного анализа вейвлет-характеристик детерминированных хаотических и случайных самоподобных реализаций для выявления характерных особенностей фрактальной структуры.

Методы исследования

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла по системе базисных функций $\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, полученных из материнского вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени b и изменения временного масштаба a . Дискретное вейвлет-преобразование строится с помощью кратномасштабного анализа, основная идея которого состоит в представлении сигнала в виде совокупности его последовательных приближений [5,6].

Кратномасштабный анализ заключается в разбиении исследуемого сигнала $X(t)$ на две составляющие: аппроксимирующую и детализирующую, с последующим аналогичным дроблением аппроксимирующей до заданного уровня декомпозиции сигнала N . В результате декомпозиции сигнал $X(t)$ представляется в виде суммы аппроксимирующей компоненты $\text{approx}_N(t)$ и детализирующих компонент $\text{detail}_j(t)$:

$$X(t) = \text{approx}_N(t) + \sum_{j=1}^N \text{detail}_j(t) = \sum_{k=1}^{N_a} \text{apr}(N, k) \varphi_{Nk}(t) + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{N_j} \text{det}(j, k) \psi_{jk}(t),$$

где N – выбранный максимальный уровень разложения,

$\text{apr}(N, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \varphi_{Nk}(t) dt$ – аппроксимирующие вейвлет-

коэффициенты уровня N , $\text{det}(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi_{jk}(t) dt$ – детализирующие

вейвлет-коэффициенты уровня j , N_j – количество детализирующих коэффициентов на уровне j , N_a – количество аппроксимирующих коэффициентов на уровне N .

Величина вейвлет-энергии на заданном уровне вейвлет-разложения j определяется как $E_j = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} \det^2(j, k)$. Набор величин

E_j для каждого уровня разложения составляет спектр вейвлет-энергии ряда. Полная вейвлет-энергия спектра представляет собой сумму энергий каждого уровня $E_{tot} = \sum_{j=1}^N E_j$. Относительная вейвлет-энергия показывает распределение энергии по уровням разложения:

$$p_j = \frac{E_j}{E_{tot}}.$$

В настоящее время основными характеристиками сложности динамики систем можно считать различные типы энтропии. Вейвлет-энтропия WE является количественной мерой упорядоченности сигнала и определяется по формуле:

$$WE = - \sum_{j=1}^N p_j \ln(p_j). \quad (1)$$

Существует разные типы энтропии: энтропия подобия, энтропия шаблонов, многомасштабная энтропия, и др. Энтропия подобия $ApEn$ является статистикой регулярности временного ряда, что определяет возможность его предсказания [7]. Рассмотрим временной ряд $\{x_i\}$, $i = 1, \dots, N$. Пусть вектор $P_m(i)$ – подпоследовательность значений ряда $\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m}\}$ длиной m . Два вектора $P_m(i)$ и $P_m(j)$ будут подобными, если выполняется $|x_{i+k} - x_{j+k}| < \varepsilon$, $0 \leq k < m$.

Для каждого значения $i = 1, \dots, N - m + 1$ вычисляется величина

$$C_{im}(\varepsilon) = \frac{n_{i,m}(\varepsilon)}{N - m + 1} f, \text{ где: } n_{i,m}(\varepsilon) - \text{число векторов, подобных вектору } P_m(i). \text{ Энтропия подобия } ApEn \text{ определяется по формуле}$$

$$ApEn(m, \varepsilon) = \ln \frac{C_m(\varepsilon)}{C_{m+1}(\varepsilon)}, \quad C_m(\varepsilon) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} C_{im}(\varepsilon). \quad (2)$$

Входные данные

Хаотические реализации [8]. Хаос представляет собой сложную форму поведения детерминированной системы в установившемся режиме. Основным свойством таких систем является чувствительная зависимость режима функционирования к сколь угодно малым изменениям начальных условий. Если d_0 – мера начального расстояния между двумя точками, то спустя малое время t расстояние между траекториями, выходящими из этих точек, становится равным $d(t) = d_0 e^{\lambda t}$, где величина λ является показателем Ляпунова. Это обстоятельство ведет к потере детерминированной предсказуемости и хаотическому поведению. Одними из самых простых и наглядных математических моделей, демонстрирующих хаотическое поведение, являются итерируемые отображения вида $x_{n+1} = f(C, x_n)$, где C – управляющий параметр.

Для широкого класса нелинейных функций f последовательность значений $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ является хаотической. Наиболее известным примером хаотических отображений является логистическое отображение. Это одномерное квадратичное отображение, определяемое следующим образом:

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n), \quad (3)$$

где A – управляющий параметр, $A \in (0, 4]$, а значения $x_n \in [0, 1]$.

Стохастические самоподобные реализации [9]. Стохастический процесс $X(t)$ является самоподобным с параметром самоподобия H , если процесс $a^{-H}X(at)$ описывается теми же конечномерными законами распределений, что и $X(t)$. Одной из наиболее известных и простых моделей стохастической динамики, обладающих фрактальными свойствами, является фрактальное броуновское движение (ФБД).

Гауссовский процесс $X(t)$ называется фрактальным броуновским движением с параметром H , $0 < H < 1$, если приращения случайного процесса $\Delta X(\tau) = X(t + \tau) - X(t)$ имеют гауссовское распределение вида

$$P(\Delta X < x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2\tau^H}} \cdot \int_{-\infty}^x \text{Exp}\left[-\frac{z^2}{2\sigma_0^2\tau^{2H}}\right] dz, \quad (4)$$

где σ_0 - коэффициент диффузии. Приращения ФБД называются фрактальным гауссовским шумом (ФГШ).

ФБД с параметром $H = 0.5$ совпадает с классическим броуновским движением. Параметр H , называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия процесса. Наряду с этим свойством, показатель H характеризует меру долгосрочной зависимости стохастического процесса, т.е. убывание корреляционной функции процесса по степенному закону.

Результаты исследования

Рассмотрим реализации отображения (3) при различных хаотических режимах, которые определяются показателем Ляпунова λ . На рис. 1 слева показаны реализации при значениях управляющего параметра $A=3.7, 3.9, 4$ (сверху вниз). Соответствующие значения показателя Ляпунова равны $\lambda=0.37, 0.5, 0.69$. Большее значение показателя Ляпунова соответствует большей степени хаотичности системы. В правой части рис.1 показаны реализации ФГШ при значениях показателя Херста $H=0.3, 0.9, 0.5$ (сверху вниз). В случае $H=0.5$ реализация представляет собой набор независимых нормальных случайных величин. Случай $H=0.3$ соответствует отрицательной корреляции. При $H=0.9$ реализация обладает сильной долгосрочной зависимостью.

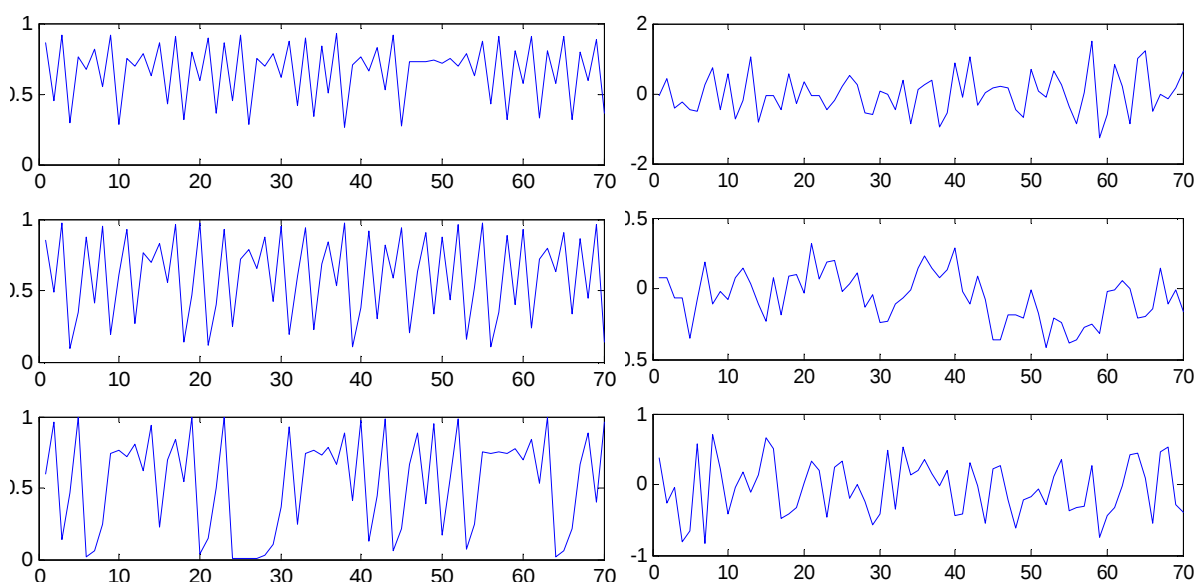


Рисунок 1 – Реализации хаотического отображения
при $\lambda=0.37, 0.5, 0.69$ (слева)
и реализации ФГШ при $H=0.3, 0.9, 0.5$ (справа)

В верхней части рис.2 показаны спектры вейвлет-энергии хаотических реализаций. Очевидно, что при меньших значениях показателя Ляпунова основная энергия процесса сосредоточена в высокочастотных компонентах (начальные уровни декомпозиции). В случае $\lambda=0.69$ данная система достигает максимального уровня хаотичности и вейвлет-энергия реализаций распределяется по частотам достаточно равномерно.

Спектры вейвлет-энергии ФГШ представлены в нижней части рис.2. В случае $H=0.3$ в реализациях преобладают высокочастотные колебания. При $H=0.9$ процесс обладает долгосрочной зависимостью и вейвлет-энергия сосредоточена на низкочастотных уровнях. В случае $H=0.5$ вейвлет-энергия реализаций равномерно распределяется по уровням.

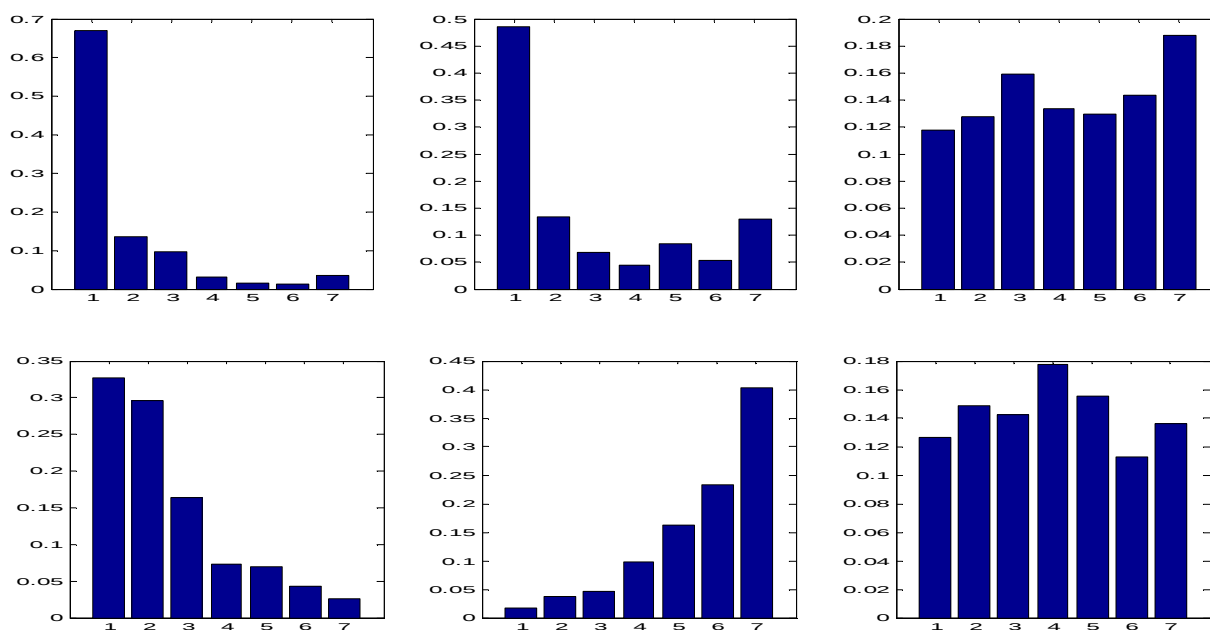


Рисунок 2 – Спектр вейвлет-энергии хаотических реализаций при $\lambda=0.37, 0.5, 0.69$ (вверху) и реализаций ФГШ при $H=0.3, 0.9, 0.5$ (внизу)

В таблице приведены средние значения вейвлет-энтропии (1) и энтропии подобию (2) для хаотических реализаций и реализаций ФГШ. В каждом случае величины энтропии увеличиваются с ростом хаотичности или некоррелированности процесса. Важным аспектом является то, что проведенные исследования выявили некоррелированность величин вейвлет-энтропии W и энтропии подобию ApE . Это

позволяет использовать их как независимые параметры при распознавании временных рядов с помощью ЭС.

Таблица 1

Числовые характеристики сложности реализаций

Логистическое отображение				Фрактальный гауссовский шум		
A	λ	W	$ApEn$	H	W	$ApEn$
3.7	0.37	1.22	0.35	0.3	1.63	1.88
3.9	0.5	1.46	0.49	0.9	1.56	1.67
4	0.69	1.86	0.62	0.5	1.93	1.9

Выводы

В работе проведен сравнительный анализ вейвлет-характеристик детерминированных хаотических и случайных самоподобных реализаций. Показано, что спектр вейвлет-энергии и вейвлет-энтропия отражают характерные особенности фрактальной и корреляционной структуры реализаций. Использование вейвлет-характеристик для распознавания фрактальных сигналов позволяет применять их в качестве знаний для ЭС, что дает возможность более корректно осуществлять исследование и построение математических моделей временных рядов, обладающих фрактальными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириченко Л.О. Разработка алгоритмов принятия решений в экспертной системе фрактального анализа / Л.О.Кириченко, О.В.Стороженко, Ю.А. Кобицкая // «Системні технології» - збірник наукових праць. -№3 (86). - 2013. -С.54-61.
2. Kirichenko L. Comparative Analysis of the Complexity of Chaotic and Stochastic Time Series / L. Kirichenko, Yu. Kobitskaya, A. Nabacheva // «Радіоелектроніка. Інформатика. Управління» - №2 (31). - 2014 -С.126-134.
3. Кириченко Л.О. Методы распознавания фрактальных временных рядов с помощью характеристик информационной сложности / Л.О.Кириченко, Ю.А. Кобицкая // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: VII Міжнар. наук.-практ. конф.: тези доп.- Запоріжжя, 2014. -С. 166-167.
4. Кириченко Л.О. Использование экспертной системы для классификации фрактальных временных рядов / Кириченко Л.О., Кобицкая Ю.А., Калинин О.В., Чалая Л.Э. // Теорія прийняття рішень: VII-а міжнар. школа-семінар: праці. – Ужгород, 2014.-С. 124.
5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. / С. Малла. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
6. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
7. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity / S.M. Pincus. Proc. // Natl. Acad. Sci. Vol.88, pp. 2297-2301.
8. Мун Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. –304 с.
9. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

ОБОБЩЕННЫЙ ПАРАМЕТР КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Предложено новое математическое выражение обобщенного параметра, позволяющего наиболее эффективно оценивать запас функциональной надежности режимов работы технического объекта.

Ключевые слова: функциональная надежность, обобщенный параметр, метрическое пространство, центральный пост управления.

Централизация контроля и управления сложными техническими объектами поставили операторов центральных постов управления (ЦПУ) перед необходимостью одновременного контроля большого количества физических параметров различной природы, характеризующих режимы работы объектов. Это усложнило анализ и оценку их состояния, а, следовательно, и операции по оперативному управлению [1].

Поэтому для обеспечения эффективного контроля функционирования объекта из ЦПУ оператор не должен перегружаться излишней информацией, и в то же время, у него должно формироваться комплексное представление о состоянии всего объекта контроля. Для этого можно использовать специальный определяющий параметр, который полностью характеризовал бы все основные стороны рабочего процесса [2]. Однако, такой параметр для объекта обычно трудно найти, в этом случае можно использовать принцип обобщенного параметра Кош [3].

Идея обобщенного параметра заключается в том, что процесс функционирования объекта, который характеризуется многомерностью описания, заменяется одномерной функцией. Такая функция, построенная искусственно, обычно не имеет конкретного физического смысла, потому что, в основном, все способы задания обобщенного показателя основываются на использовании комбинаций нормиро-

ванных числовых характеристик параметров, характеризующих технического состояние объекта.

К обобщенному параметру предъявляются требования:

1. Коп должен обеспечить возможность получения обобщенной оценки технического состояния объекта.

2. Коп должен обладать большой информативностью, поскольку позволяет рассматривать достаточно большой объем информации и резко сокращать большие массивы информации, делая их комплексными и наглядными.

3. При сведении массива информации в Коп не должны теряться индивидуальные черты отдельных параметров объекта.

4. Коп должен отражать влияние на объект параметров различной природы.

5. Каждый из сомножителей непосредственно связан с определенной цепью передач того или другого внешнего возмущения. Изменение любого из показателей ведет к изменению Коп.

Известно множество математических выражений обобщенного параметра Коп, но все они построены на принципе средней величины, а потому обладают недостатками, которые трудно компенсировать, например, флуктуация параметров, при которой происходит одновременное снижение одного и увеличение другого параметров в одинаковое количество раз, в результате чего обобщенный параметр своего значения не изменяет, что снижает его информативность [3].

Целью работы является получение математического выражения Коп, отражающего особенности функционирования исследуемых объектов. Для разработки такого параметра использовано свойство метрического пространства. Чтобы уйти от недостатков обобщенного параметра, реализованного с помощью принципа средней величины, найдено выражение Коп, которое, исходя из диалектического понимания, обладает свойствами категорий общего и индивидуального. В результате получено выражение для определения обобщенного параметра Коп, имеющее следующий вид:

$$K_{оп} = \frac{(\prod_{i=1}^n \hat{x}_i^{\mu_i}) n^{\frac{1}{2}}}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\hat{x}_i^{\mu_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

где: i – количество параметров; $\hat{x}_i$ – нормированное значение параметра; μ_i – вес каждого параметра; n – количество учитываемых параметров.

Физический смысл выражения $K_{оп}$ заключается в том, что числитель в нем представляет собой площадь или объем в многомерном пространстве в зависимости от количества параметров и меняется по квадратичной (для двух параметров), кубической (для трех параметров) или n -мерной (для n – параметров) зависимости, а знаменатель представляет собой длину диагонали фигуры, меняющейся по линейной зависимости.

В связи с тем, что тот или иной режим работы технического объекта характеризуются параметрами различной физической природы (давление, температура, напряжение, частота и другие), которые имеют различную размерность, все параметры приводятся к единой системе счисления, в которой они могут сравниваться. Такой системой является система безразмерного (нормированного) относительного счисления.

Если для каждого параметра x_i , $i = 1...n$, имеется возможность выделить текущее значение $x_i(t)$, допустимое значение x^* , при достижении которого объект теряет работоспособность, и оптимальное (номинальное) $x_{опт}$, то безразмерный параметр можно записать в виде [3]:

$$x_i(t) = \frac{x_i(t) - x}{x_{опт} - x}, \quad (2)$$

где: $0 \leq x_i(t) \leq 1$

При $x_i(t) = x_{опт}$ нормированное значение будет равно единице $\hat{x}_i(t) = 1$; при $x(t) = x^*$ нормированное значение будет равно нулю $\hat{x}_i(t) = 0$. При помощи выражения (2), нормируется параметр $x_i(t)$, а безразмерная нормированная величина изменяется с течением вре-

мени от 1 до 0. Отсюда по величине параметра $\hat{\lambda}_i$ можно судить о запасе работоспособности объекта поданному параметру в данном режиме.

Количественные изменения параметров не являются равнозначными по степени влияния на изменение режима работы объекта, поэтому их дифференцируют по степени важности. Степень влияния каждого параметра на рабочий режим объекта оценивается с помощью введения положительных весовых коэффициентов контролируемых параметров, которые могут быть определены, например, с помощью метода экспертных оценок.

Параметрам объекта $x_1, x_2, \dots, x_n$ соответствуют весовые коэффициенты $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, которые удовлетворяют тем или иным заданным критериям, при чем $0 < \mu_i < 1$. Весовые коэффициенты μ_i , имеющие наибольшее значение, соответствуют параметрам, оказывающим наибольшее влияние на бесперебойность работы объекта, а значит и на коэффициент обобщенного параметра.

Допустим, что в системе контролируется два параметра x_1 и x_2 для которых необходимо определить обобщенный параметр (Рис. 1).

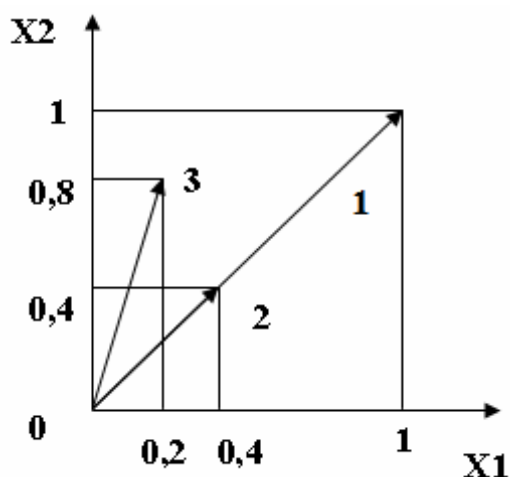


Рисунок 1 - Графическое представление обобщенного параметра:

- 1- номинальный режим,
- 2- оба параметра имеют одинаковые значения,
- 3- один параметр увеличился, а другой уменьшился в 2 раза

Очевидно, что изменение рабочего режима объекта приведет к изменению величины обобщенного параметра $K_{оп}$. При этом увеличение обобщенного параметра говорит об увеличении запаса функ-

циональной надежности данного режима работы объекта и наоборот. Поэтому, зная граничные области изменения входящих в Коп параметров (они регламентированы требованиями нормативных документов), можно количественно определять запас функциональной надежности режима работы объекта.

Любое изменение параметра x_i ведет к изменению координаты вектора, а значит и диагонали фигуры, поэтому при одинаковых площадях (объемах) будут разные диагонали, а значит и значение их отношений (Коп). Это свойство позволяет избавиться от такого негативного свойства как флуктуация. В предложенном выражении Коп флуктуации не влияют на величину параметра за счет заложенного в нем принципа изменения соотношения между вариациями площади (объема) фигуры и ее диагонали, который позволяет выявить изменения параметров в ту или иную стороны от среднего на одну и ту же величину по отношению площади (объема) фигуры. Благодаря имеющейся закономерности, при линейном увеличении диагонали, площадь (объем) меняется по квадратичной (кубической или n - мерной зависимости) зависимости.

Для подтверждения вышесказанного сравним два случая. В первом случае допустим, что $x_1=x_2=0,4$. Длина гипотенузы в этом случае равна 0,52, а площадь равна 0,16. Допустим, что во втором случае параметр x_1 уменьшился в два раза $x_1=0,2$, а параметр x_2 увеличился в два раза $x_2=0,8$. Длина гипотенузы в этом случае увеличится и будет равна 0,82, а площадь останется прежней 0,16. Как видим из приведенного примера, при равных площадях в первом и втором случае, значительное отклонение одного из параметров привело к значительному отклонению гипотенузы, а значит, и к изменению Коп. В выражении Коп выход любого параметра за допустимые пределы, т.е. $\hat{x}_i(t)=0$, приводит к равенству Коп = 0. Исходя из физического смысла при достижении нуля любым из нормированных параметров $\hat{x}_i$ объект теряет запас надежности. Из формулы (2) для обобщенного параметра следует, что составляющая $n^{1/2}$ позволяет Коп принимать значение единицы в нормальном режиме, что отвечает физическому смыслу.

Из анализа математического выражения Коп видно, что чем ближе обобщенный параметр к единице, тем выше запас функцио-

нальной надежности (стабильности) режима работы объекта, и чем ближе $K_{оп}$ к нулю, тем этот запас меньше. Таким образом: при всех $\hat{x}_i = 1$, обобщенный параметр будет равен единице $K_{оп} = 1$ (нормальный режим), при любом $\hat{x}_i = 0$ обобщенный параметр будет равен нулю $K_{оп} = 0$ (предаварийное состояние режима).

Движение годографа вектора $K_{оп}$ в пространстве состояний описывает некоторую траекторию, которая позволяет исследовать поведение объекта в прошлом, настоящем и в будущем, т.е. обобщенный параметр позволяет определить не только запас работоспособности многопараметрического объекта в исследуемом режиме, но и проследить характер изменения его работоспособности во времени.

В заключение можно сделать вывод о высокой информативности данного выражения обобщенного параметра, применение которого позволит получить представление о работе сложного объекта и оценить запас его функциональной надежности в различных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбросовский В.М., Белый О.И., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Интегрированные системы управления технических средств транспорта. Учебное издание.- СПб.: Элмор, 2001.- 288 с.
2. Чапкис Д.Т. Ремонтпригодность морских судов.- Л.: Судостроение, 1977.- 256 с.
3. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалеvский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры.- М.: Сов. Радио, 1974.- 224 с.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ УГЛАХ
НАКЛОНА ПЛАТФОРМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА
ДИСКРЕТНЫМ ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА**

Аннотация. Предложен метод снижения погрешности измерения уровня топлива в баках установленной на качающейся платформе ракеты-носителя и построен дискретный фильтр Калмана, который позволяет производить оценку уровня заправляемого топлива на основе показаний бортового датчика уровня и информации о текущих углах наклона платформы, что является реализацией предложенного метода. Ключевые слова: ракета-носитель, измерение уровня жидкости, фильтр Калмана.

Известна задача измерения уровня жидкого топлива в баках ракеты-носителя (РН), жестко установленной на качающейся стартовой платформе (СП). Эта задача представлена в работе [1] и отражает условия проведения заправки РН «Зенит» космического ракетного комплекса морского базирования «Морской старт». Измерение уровня топлива в баке ракеты производится бортовым, установленном непосредственно внутри бака, датчиком уровня заправки (ДУЗ). Из-за наличия ряда конструктивных ограничений в большинстве случаев ДУЗ устанавливается на некотором расстоянии от оси бака, иногда довольно значительном. Поэтому при наличии качания системы «СП-РН», которое происходит вследствие воздействия морских волн на корпус СП, поверхность жидкого топлива в баке отклоняется от номинального положения, что искажает результаты измерений датчика уровня заправки. Данные измерений ДУЗ используются для формирования команды на прекращение заправки баков РН топливом. В результате появляется дополнительная составляющая погрешности заправки, что в свою очередь отрицательно сказывается на энергетических характеристиках РН. Специфика задачи определения уровня топлива в баках РН в условиях качания СП состоит в необходимости

минимизации этой составляющей погрешности заправки. В целях решения поставленной задачи путем уменьшения величины указанной составляющей погрешности в работе [2] предложен метод, основанный на применении дискретного фильтра Калмана для обработки сигнала от ДУЗ, переведенного в цифровую форму представления. Анализ предложенного в [2] метода показывает, что точность заправки ракеты-носителя может быть повышена в большей степени, если в процессе оценивания уровня заправки бака РН использовать не только сигнал от датчика уровня, но и информацию об углах наклона СП, а именно – данные текущих измерений углов крена и дифферента платформы. Навигационное оборудование современного морского судна включает в себя гироскопические приборы (ГП), которые непрерывно производят измерения текущих углов наклона судна. Использование этих показаний позволяет реализовать данный метод на практике.

Настоящая статья посвящена вопросу разработки метода снижения погрешности измерения уровня топлива в баках установленной на качающейся платформе РН, который основывается на использовании информации о текущих углах наклона СП в процессе обработки дискретным фильтром Калмана сигнала от датчика уровня заправки. Целью уменьшения погрешности измерения уровня топлива является повышение точности заправки и соответствующее [3] повышение энергетической вооруженности РН.

При разработке метода будем основываться на модели, отражающей процесс измерений уровня жидкого топлива в условиях качки, и которая детально представлена в [1] и развита в [2]. В пространстве состояний эта модель описывается двумя матричными уравнениями, одно из которых представляет движение системы в переменных пространства состояний, а другое является уравнением выхода:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k \quad (2)$$

где $\mathbf{x}_k$ и $\mathbf{u}_k$ – вектор-столбцы переменных пространства состояний и входных воздействий соответственно, размером 7×1 . $\mathbf{z}_k$ – вектор-столбец выходных переменных наблюдения. Матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ согласно [2] имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 \frac{T_a - \frac{\Delta t}{2}}{T_a + \frac{\Delta t}{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{T_a \Delta t}{(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -a_2 & -a_1 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{T_a \Delta t^2}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} & \Delta t & b_2 & b_1 & \frac{T_y - \frac{\Delta t}{2}}{T_y + \frac{\Delta t}{2}} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & -c_1
 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\Delta t}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\Delta t^2}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

Здесь T_a – постоянная времени затухания в корреляционной функции линейной скорости наполнения бака, Δt – период дискретизации, T_y – постоянная времени апериодического звена первого порядка, которым представлена модель гидроуспокоителя датчика уровня заправки. В матрицах использованы следующие коэффициенты:

$$a_1 = \frac{2 - \frac{8b}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}}, \quad a_2 = \frac{1 - \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}}, \quad b_1 = \frac{2}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}}, \quad b_2 = \frac{2}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}},$$

$$c_1 = \frac{2 - \frac{8d}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4d}{\Delta t^2}}, \quad c_2 = \frac{1 - \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4d}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4d}{\Delta t^2}}, \quad (4)$$

где $a = \frac{2\mu}{\mu^2 + \beta^2}, \quad b = \frac{1}{\mu^2 + \beta^2}, \quad c = \frac{2\xi}{\xi^2 + \gamma^2}, \quad d = \frac{1}{\xi^2 + \gamma^2}$

В формулах для расчета коэффициентов применены следующие обозначения величин: μ – коэффициент нерегулярности в модели сигнала типа «нерегулярной качки», которой описывается возмущение в процессе измерения уровня топлива, вызванное качанием СП, β – преобладающая частота в сигнале типа «нерегулярной качки» этой же модели, $\xi = \frac{1}{T_a}$ – постоянная затухания в корреляционной

функции линейной скорости наполнения бака, $\gamma = \frac{2\pi}{T_c}$ – параметр

модели квантования ДУЗ, а именно – характерная собственная частота, то есть средняя циклическая частота прохождения зеркалом жидкого топлива дискретных уровней квантования в датчике заправки (здесь: T_c – среднее время прохождения уровнем жидкости одного

уровня квантования $T_c = \frac{\delta}{V_c}$, где V_c – средняя линейная скорость

наполнения бака при заправке, а δ – шаг квантования датчика уровня по высоте бака).

Для отслеживания состояния системы в переменных, отражающих реальные физические величины, уравнения (1) и (2) дополняются соотношением:

$$y_k = Gx_k, \quad \text{где} \quad (5)$$

y_k – вектор-столбец текущих значений физических величин процесса наполнения бака и измерения уровня топлива, компоненты которого: y_1 – линейная скорость наполнения бака жидким топливом при заправке, y_2 – уровень, до которого заполнен бак, y_3 – колебания поверхности жидкости в месте установки датчика уровня заправки, y_4 – уровень топлива внутри бака в месте установки датчика, y_5 – уровень

топлива внутри кожуха гидроуспокоителя датчика. Матрица G определена в [2]:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{T_a \Delta t}{(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_a \Delta t^2}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} & \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & b_1 & 0 \\ \frac{T_a \Delta t^2}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} & \Delta t & b_2 & b_1 & 0 \\ \frac{T_a \Delta t^3}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{\Delta t^2}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_2 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_1 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

В представленном ранее [1], [2] описании процесса измерения уровня жидкого топлива в баках РН, происходящего в условиях качки СП, полагалось, что в распоряжении наблюдателя имеется только один выход – показания датчика уровня заправки. Соответственно, вектор-столбец переменных наблюдения z_k представлялся в виде скаляра z_k . Таким образом, работа фильтра Калмана по оцениванию уровня топлива в баке строилась только на основе показаний датчика уровня. Однако уже и в этом случае достигалось заметное снижение погрешности измерений. Логично ожидать, что возможно получить больший эффект от применения фильтрации по методу Калмана, если при оценивании уровня топлива в баке также учитывать и показания приборов, измеряющих углы наклона СП. В таком случае вектор-столбец переменных наблюдения z_k увеличивается до размера 2×1 . Будем считать, что отклонение поверхности жидкого топлива от номинального положения вследствие наклона СП в месте установки ДУЗ – это компонента z_{1k} , а сами показания датчика уровня в k -тый момент времени – это компонента z_{2k} .

Угол наклона ракеты, которая имеет жесткую механическую связь с СП, в направлении на датчик уровня выражается через показания ГП следующим образом:

$$\alpha = \psi \cos \varphi + \theta \sin \varphi \quad (7)$$

где ψ – угол дифферента СП, θ – угол крена СП, φ – угол, лежащий в плоскости поперечного сечения бака, между направлением на корму СП и направлением на датчик уровня заправки с вершиной на оси бака.

Соответствующее отклонение зеркала жидкости в месте установки датчика уровня заправки, то есть возмущение вследствие качения СП, равно:

$$z_{1k} = R(\psi \cos \varphi + \theta \sin \varphi) \quad (8)$$

где R – расстояние от продольной оси бака до датчика уровня.

Это соотношение должно использоваться для расчета по показаниям ГП значений переменной наблюдения z_{1k} , которые совместно с данными измерений датчика уровня z_{2k} будут подаваться на вход фильтра Калмана непосредственно при проведении заправки баков РН. При моделировании процесса наполнения и фильтрации переменная наблюдения z_1 есть не что иное, как физическая переменная y_3 на выходе соответствующего формирующего фильтра.

Перейдем к определению матриц C и D уравнения (2). Сразу отметим, что шумы по каналам измерения углов наклона СП, а также по каналу измерения уровня топлива (за исключением шума квантования, который уже учтен путем введения в модель отдельного формирующего фильтра) при дальнейшем рассмотрении игнорируются вследствие их существенной малости в сравнении с основными действующими возмущениями. В работе [2] в качестве матриц C и D используются матрицы следующего вида:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{T_a \Delta t^3}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{\Delta t^2}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_2 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_1 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \rightarrow \\ & \rightarrow & \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} & -d_0 c_2 & d_1 - d_0 c_1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^3}{8(T_a + \frac{\Delta t}{2})(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & 0 & d_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

где

$$d_0 = \frac{2 + \frac{4\sqrt{d}}{\Delta t}}{1 + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4d}{\Delta t^2}}, \quad d_1 = \frac{2 - \frac{4\sqrt{d}}{\Delta t}}{1 + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4d}{\Delta t^2}} \quad (10)$$

В связи с появлением дополнительной переменной наблюдения размер указанных матриц должен быть увеличен до 2×7 . При этом вторая строка новых матриц должна повторять единственную строку соответствующих векторов (10). Далее, поскольку $z_1 \equiv y_3$, то в качестве первой строки матрицы C должна быть взята третья строка матрицы G , дополненная нулями на позициях шестой и седьмой переменных состояния вследствие очевидной независимости y_3 от переменных x_6 и x_7 , которые задействованы в формирующем фильтре для шумов квантования датчика уровня заправки. В итоге получаем:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & b_2 & b_1 & \rightarrow \\ & \rightarrow & 0 & 0 & 0 \\ \frac{T_a \Delta t^3}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{\Delta t^2}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_2 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \frac{b_1 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & \rightarrow \\ & \rightarrow & \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} & -d_0 c_2 & d_1 - d_0 c_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

В работе [1] показано, что выходная переменная формирующего фильтра для колебаний y_3 зависит только от переменных состояния x_3 , x_4 (что и отражается первой строкой матрицы C) и прямо не зависит от входных воздействий u_k . Поэтому в рассматриваемом нами случае первая строка матрицы D должна быть заполнена нулями:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\Delta t^3}{8(T_a + \frac{\Delta t}{2})(T_y + \frac{\Delta t}{2})} & 0 & d_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Для завершения подготовки фильтра Калмана к работе необходимо указать вид матрицы ковариаций входных белых шумов Q и матрицы ковариаций шумов измерений R . Матрица ковариаций входных белых шумов Q сохраняет вид, представленный в [2]:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{2T_a D_c}{\Delta t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2aD_\alpha}{\Delta t} R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\delta^2 c}{12 \Delta t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

где D_c – дисперсия линейной скорости наполнения бака, D_α – дисперсия угла наклона РН α в направлении на датчик уровня.

Матрицу ковариаций шумов измерений R можно определить по формуле $R = D Q D^T$, для чего матрицу D в процессе расчетов необходимо довести до размерности 7×7 путем добавления нулевых строк с третьей по седьмую. В результате получаем:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t^4 T_a^2 D_c^2}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2 (T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} + d_0^2 (\frac{\delta^2 c}{12 \Delta t})^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Таким образом, в результате проведенных выше построений получены все матрицы и коэффициенты, необходимые для работы рекуррентного алгоритма дискретного фильтра Калмана, который при определении уровня топлива в баках качающейся ракеты-носителя позволяет дополнительно использовать информацию о текущих углах наклона платформы, на которой установлена ракета. Как известно [4], рекуррентный алгоритм дискретного фильтра Калмана на каждом шаге процесса оценивания включает в себя два этапа: этап предсказания и этап корректировки.

Этап предсказания

$$\hat{x}_k^- = F \hat{x}_{k-1} \quad (15)$$

$$P_k^- = F P_{k-1} F^T + B Q B^T \quad (16)$$

Этап корректировки

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (18)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-, \text{ где} \quad (19)$$

В описании алгоритма, кроме введенных ранее литер Q и R для матриц ковариации, использованы следующие общепринятые обозначения, относящиеся к текущему состоянию процесса измерения и оценивания, то есть к шагу k : $\hat{x}_k$ – вектор оценок величин, выражаемых переменными состояния, размерностью 7×1 , P_k – матрица ковариаций ошибок оценивания размером 7×7 , K_k – вектор–столбец коэффициентов обратной связи фильтра Калмана (7×1), z_k – вектор наблюдений, I – единичная матрица размером 7×7 . Матрицы F и H определяются таким образом: $F = A$, $H = C$, где A и C – матрицы модели (1).

В целях проверки эффективности разработанного метода определения уровня топлива в баках качающейся РН путем обработки показаний датчика уровня заправки с использованием информации об углах наклона СП автором было проведено моделирование процессов наполнения бака и измерения уровня топлива с выполнением фильтрации имитируемых сигналов посредством дискретного фильтра Калмана, представленного в настоящей статье. При этом была использована модель процесса, разработанная в [1], а само моделирование проводилось при помощи комплекса программных средств, представленного в [2]. В целях обеспечения сравнимости результатов режимы и условия проведения данного моделирования выбраны идентичными режимам и условиям, в которых ранее [2] проводилось моделирование с применением фильтра Калмана без использования информации об углах крена и дифферента СП. Тестовые исходные данные для расчета сохранены прежними [2].

В процессе моделирования определялись величины систематической и случайной составляющей погрешности заправки, возникающих в случае выработки команды на прекращение заправки на основе выходной информации дискретного фильтра Калмана, на вход которого поступают показания датчика уровня топлива РН и гироскопического прибора СП. Полученные данные сравнивались с результатами моделирования для варианта фильтрации только по одному каналу – каналу измерения уровня. Также проводилось сравнение с вариантом формирования команды на прекращение заправки

путем традиционной релейной логики – по сигналу от датчика уровня заправки, без его обработки вычислительными средствами. Необходимо заметить, что в данном случае, как указывалось и ранее [2], речь идет не обо всей, полной или суммарной, погрешности заправки, а только о той ее составляющей, которая связана с качанием стартовой платформы и дискретностью датчика уровня. Для иллюстрации качественных отличий в результатах использования различных вариантов обработки сигналов на рис. 1 приведены аппроксимированные прямыми линиями зависимости величин указанной составляющей погрешности от максимальных амплитуд качания СП, полученные по результатам моделирования. В процессе моделирования также оценивалась функционирование предложенного фильтра и характеристики выходного сигнала в различных условиях и режимах заправки. В частности, определялись величины постоянной и случайной составляющих анализируемой погрешности при различных скоростях наполнения бака, при изменяющемся преобладающем периоде колебаний СП, а также при различных значениях постоянной времени, характеризующей инерционность гидроуспокоителя датчика уровня.

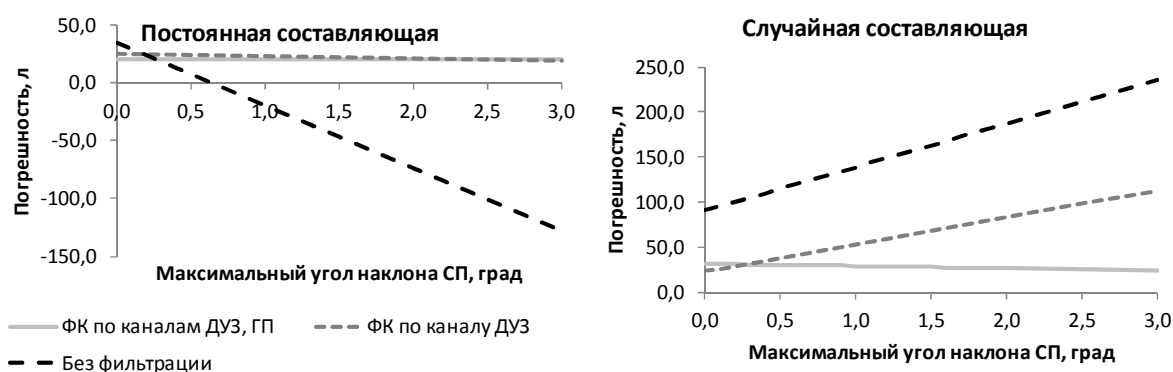


Рисунок 1 – Зависимость величины погрешности от амплитуды качания

Из полученных при моделировании результатов важно отметить основные, которые приводятся ниже. При качании СП с максимальной амплитудой до одного углового градуса (соответствует заданным условиям эксплуатации [5]) в случае проведения фильтрации по двум каналам (ДУЗ и ГП) случайная составляющая погрешности заправки, связанная с качанием стартовой платформы и дискретностью датчика уровня, составляет около 25% от величины этой же составляющей при использовании обычной (без какой-либо вычислительной

обработки сигнала от ДУЗ) логики прекращения заправки, в то время как при введении фильтрации Калмана только по одному каналу (ДУЗ) этот показатель имеет значение около 40% [2]. Таким образом, достигается заметное снижение величины рассматриваемой составляющей случайной погрешности заправки. Также следует заметить, что результаты моделирования подтверждают полную инвариантность получаемой на выходе построенного дискретного фильтра Калмана оценки уровня топлива в баке ракеты от амплитуды и периода качания СП. Это свойство положительно отличает предложенный метод фильтрации по двум каналам от метода фильтрации по одному каналу измерения уровня.

В завершение укажем, что результатом анализа и проведенных теоретических исследований, представленных в настоящей статье, является следующее:

1. Предложен метод снижения погрешности определения уровня топлива в баках установленной на качающейся платформе РН, который основывается на использовании информации о текущих углах наклона СП совместно с показаниями бортового датчика уровня заправки.

2. Построен дискретный фильтр Калмана, позволяющий производить оценку высоты уровня топлива в баках РН в условиях колебаний СП путем обработки сигнала от бортового датчика уровня заправки и показаний ГП об углах крена и дифферента СП, который является реализацией предложенного метода.

3. Выполнено моделирование и проведена оценка эффективности использования построенного дискретного фильтра Калмана для обработки результатов измерений в целях их дальнейшего использования для формирования команды на прекращение заправки. Результаты расчетов, проведенных на общих тестовых исходных данных, показывают, что применение данного фильтра (вместо традиционного способа формирования команды без обработки сигнала от ДУЗ) позволяет в четыре раза уменьшить величину случайной составляющей погрешности заправки, связанной с колебаниями СП и дискретностью бортового датчика уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуренко В.Б. Модель процесса измерения уровня жидкого топлива в условиях качки // Системні технології Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5. - Дніпропетровськ, 2014.
2. Мазуренко В.Б. Применение дискретного фильтра Калмана для решения задачи измерения уровня жидкого топлива в условиях качки // Системні технології Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6. - Дніпропетровськ, 2014.
3. Мазуренко В.Б. Повышение энергетических характеристик ракет-носителей методом модификации критерия полноты использования объема топливных баков // Вісник Дніпропетровського університету. Серія "Ракетно-космічна техніка". – 2013. – Вип. 16. – С.61–68.
4. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
5. Sea Launch Company, LLC. User's Guide, Revision C. 2003. D688-10009-1.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТИПА

Аннотация. Представлен обзор итерационных методов решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений большой размерности. Проведен сравнительный анализ методов решения СЛАУ. Показано, что метод обобщённых минимальных невязок (GMRES) для разреженных матриц обладает высокой вычислительной эффективностью при решении задач эллиптического типа с плохо обусловленной матрицей.

Ключевые слова: методы решения систем линейных алгебраических уравнений большой размерности.

Введение

Численное моделирование реальных физических процессов основывается на применении уравнений математической физики различного типа. Дискретные аналоги исходных дифференциальных уравнений приводят к необходимости решения разреженных систем алгебраических линейных уравнений (СЛАУ). Такие системы могут быть очень большими, например, как в сопряженных задачах вычислительной аэродинамики, электродинамики, теплопроводности, механике деформируемого твёрдого тела [1-3]. Основная часть компьютерных ресурсов тратится на решение систем линейных уравнений, поэтому одной из ключевых проблем математического моделирования является выбор оптимального метода решения СЛАУ.

Все используемые на практике методы решения систем линейных алгебраических уравнений можно разделить на две большие группы: прямые и итерационные методы [3, 4]. Под прямым методом решения понимается метод, позволяющий теоретически получить точное значение всех неизвестных в результате конечного числа арифметических операций (метод Крамера). Итерационные методы позволяют находить решение только в виде предела последовательности векторов, построение которого производится одинаковым процес-

сом, называется процессом итераций, или последовательных приближений [4, 5].

Основные аргументы в пользу итерационных методов основаны на экономии компьютерной памяти и процессорного времени. Также преимуществом итерационных методов является удобное применение в современной вычислительной технике. При решении разреженных систем линейных уравнений большой размерности прямые методы становятся неэффективными в силу накопления ошибок округления и большого числа математических операций. Итерационные методы позволяют получить решения системы с заранее определенной погрешностью. Явным плюсом является значительное преимущество перед прямыми методами в скорости сходимости, а также удобная реализация на практике.

Обычно итерационные методы применяются к разреженным системам линейных алгебраических уравнений, которые возникают при конечно-элементной, конечно-разностной или конечно-объемной аппроксимации дифференциальных уравнений (систем уравнений) в частных производных. Итерационные методы часто используются в комбинации с операторами предобуславливания (preconditioning), которые позволяют повысить скорость сходимости данного метода. Выбор предобуславливателя составляет отдельную проблему. Также итерационные методы успешно применяются при решении некоторых больших плотных СЛАУ.

Наиболее эффективными и устойчивыми среди итерационных методов решения таких систем уравнений являются так называемые проекционные методы, и особенно тот их класс, который связан с подпространством Крылова. Они отличаются наибольшей устойчивостью из всех итерационных методов. В работах [4, 5] описаны итерационные методы, особое внимание уделено различным формам предобуславливания. В работе [3] приведен обзор методов решения СЛАУ основанных на подпространстве Крылова. Описание численных алгоритмов итерационных методов решения СЛАУ рассмотрено в [3].

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует универсальные методы, одинаково хорошо работающих для разных классов задач. Как правило, задача заключается в том, чтобы найти наиболее эффективный метод для конкретной проблемы. В настоящей работе

проведен сравнительный анализ методов решения СЛАУ для уравнений математической физики эллиптического типа.

Методы решения систем линейных алгебраических уравнений

Итерационные методы бывают двух видов: стационарные и нестационарные.

Стационарный итерационный метод – это метод, который может быть представлен в следующей простой форме

$$x^{k+1} = Ax^k + c,$$

где A и c не зависят от номера итерации k . Если такая зависимость существует, то метод нестационарный.

Стационарные итерационные методы существуют довольно давно, они простые для понимания и реализации, но, как правило, не столь эффективны в сравнении с нестационарными. Нестационарные методы сравнительно новые, и они могут быть очень эффективными с точки зрения вычислительных затрат.

Скорость, с которой итерационный метод сходится, во многом зависит от спектрального радиуса матрицы. Таким образом, итерационные методы обычно включают вторую матрицу, которая преобразует матрицу A к матрице с меньшим спектральным радиусом. Матрица преобразования называется матрицей предобуславливания. Хорошее предобуславливание улучшает сходимость итерационного метода. Без предобуславливания итерационный метод может даже не сойтись.

Разработано большое количество итерационных методов. Остановимся на тех, которые иллюстрируют историческое развитие итерационных методов для решения больших разреженных систем линейных уравнений.

Стационарные методы:

- Метод Якоби базируется на решении для каждой переменной локально по другим переменным, одна итерация метода соответствует решению для каждой переменной один раз. Метод прост для понимания и реализации, но сходится медленно.

- Метод Гаусса-Зейделя можно рассматривать как модификацию метода Якоби. Основная идея модификации состоит в том, что новые значения используются здесь сразу же по мере получения, в то время как в методе Якоби они не используются до следующей итерации.

- Метод последовательной верхней релаксации (Successive Overrelaxation – SOR) может быть получен из метода Гаусса-Зейделя путем введения экстраполяционного параметра ω . При оптимальном выборе ω метод может сходиться на порядок быстрее, чем метод Гаусса-Зейделя.

- Метод симметричной последовательной верхней релаксации (Symmetric Successive Over-Relaxation – SSOR) не имеет преимуществ перед SOR как независимый итерационный метод, однако используется в качестве предобуславливателя для нестационарных методов.

Нестационарные методы:

- Метод сопряженных градиентов (Conjugate Gradient – CG) – метод нахождения локального минимума функции на основе информации о ее значении и ее градиента.

- Метод минимальных невязок (MINimum RESidual – MINRES). Этот метод является вычислительной альтернативой для метода сопряженных градиентов для матрицы, коэффициенты которой являются симметричными и положительно неопределенными.

- Метод обобщенных минимальных невязок (Generalized Minimal Residual – GMRES). Данный метод вычисляет последовательность ортогональных векторов (как MINRES) и решает их методом наименьших квадратов. Тем не менее, в отличие от MINRES (и CG), требует хранения всей последовательности, так что необходим большой объем памяти. По этой причине используются поздние версии этого метода, в которых вычисления и затраты на хранение ограничиваются указанием на фиксированное количество векторов, которые будут созданы. Этот метод полезен для произвольных несимметричных матриц.

- Бисопряженные градиенты (BiConjugate Gradient – BiCG). Метод бисопряженных градиентов создает две последовательности векторов сопряженных градиентов, один из которых базируется на системе с оригинальными коэффициентами матрицы A , а другой – на A^T . Вместо ортогонализации каждой последовательности они являются взаимно ортогональными или "биортогональными". Этот метод, как и CG, использует ограниченное количество памяти. Это полезно, когда матрица симметрична, однако сходимость может быть нерегулярной. BiCG требует умножения на коэффициенты матрицы и ее транспонирование на каждой итерации.

- Метод итераций Чебышева рекурсивно определяет многочлены с коэффициентами, выбранными для сведения к минимуму нормы остатка в смысле минимума-максимума. Матрицы коэффициентов должны быть положительно определенными, также требуется знание экстремальных собственных значений. Преимущество в том, что он не требует внутренних произведений.

Сравнительная характеристика итерационных методов

Эффективное решение СЛАУ в значительной мере зависит от выбора итерационного метода. Ниже рассмотрим преимущества и недостатки итерационных методов.

1. Метод Якоби

- Крайне прост в использовании, но если матрица не является диагонально доминирующей, этот метод лучше всего рассматривать как введение в итерационные методы или в качестве предобусловливателя для нестационарных методов.

- Простой в распараллеливании.

2. Метод Гаусса-Зейделя

- Сходимость быстрее, чем у метода Якоби, но в целом не может конкурировать с нестационарными методами.

- Относится к матрицам с диагональным преобладанием или симметричным положительно определенным матрицам.

- Свойства распараллеливания зависят от структуры матрицы коэффициентов. Разные порядки с неизвестными имеют различные степени параллелизма.

- Это частный случай метода SOR, полученный путем выбора $\omega=1$.

3. Метод последовательной верхней релаксации (SOR)

- Ускорение сходимости Гаусса-Зейделя ($\omega > 1$, верхняя релаксация); может привести к сходимости, когда метод Гаусса-Зейделя не сходится ($0 < \omega < 1$, нижняя релаксация).

- Скорость сходимости зависит главным образом от ω ; оптимальное значение ω может быть оценено по спектральному радиусу матрицы Якоби.

- Свойства распараллеливания зависят от структуры матрицы коэффициентов. Разные порядки неизвестных имеют различные степени параллелизма.

4. Метод сопряженных градиентов (CG)

- Относится к симметричной положительно определенной системе.

- Скорость сходимости зависит от ряда условий.

- Свойства распараллеливания во многом зависят от матрицы коэффициентов и от структуры предварительной обработки.

5. Метод обобщённых минимальных невязок (GMRES)

- Применяется к несимметричным матрицам.

- GMRES приводит к меньшей невязке для фиксированного числа итераций, но эти шаги становятся все более затратными.

- Для того, чтобы ограничить увеличение вычислительных затрат и количество шагов на одну итерацию, необходим перезапуск GMRES.

- GMRES требует только матрично-векторные произведения с матрицей коэффициентов.

- Число внутренних произведений возрастает линейно вместе с числом итераций до точки перезапуска. В реализации, основанной на простом процессе Грама-Шмидта внутренние произведения независимы, так что вместе они означают лишь одну точку синхронизации. Более стабильная реализация базируется на модифицированной ортогонализации Грама-Шмидта и имеет по одной точке синхронизации на каждое внутреннее произведение.

6. Метод бисопряженных градиентов (BiCG)

- Применяется к несимметричным матрицам.

- Требуется матрично-векторное произведение коэффициентов матрицы и транспонированной матрицы.

- Свойства распараллеливания аналогичны свойствам CG.

7. Метод итераций Чебышева

- Применяется к несимметричным матрицам.

- Вычислительная структура аналогична CG, но в ней нет точек синхронизации.

- Адаптивный метод Чебышева может быть использован в сочетании с такими методами как CG, так и GMRES.

Выбор "лучшего" метода для данного класса задач в значительной степени – это вопрос проб и ошибок. Хотя из всего многообразие итерационных методов наиболее работоспособными являются метод сопряженных градиентов (CG), метод обобщённых минимальных невязок (GMRES) и метод бисопряженных градиентов (BiCG).

Результаты и обсуждение

Сравнение нестационарных итерационных методов решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений большой размерности проведем на задаче о распределении электрического потенциала в заданной области. Уравнение электрического поля представляет собой уравнение Лапласа $\nabla(\varepsilon_r \nabla \varphi) = 0$. В качестве начальных условий для уравнения Лапласа задавалось нулевое распределение электрического потенциала в области. Данное уравнение решается, используя приложенное напряжение к электродам как граничное условие, а также соответствующие значения относительной диэлектрической проницаемости для воздуха и диэлектрика. К открытому электроду прикладывается напряжение $\varphi = 30$ кВ, а к изолированному – нулевой потенциал. На внешних границах ставится условие Неймана $\partial \varphi / \partial \ell_n = 0$. Геометрия расчетной области приведена на рис. 1.

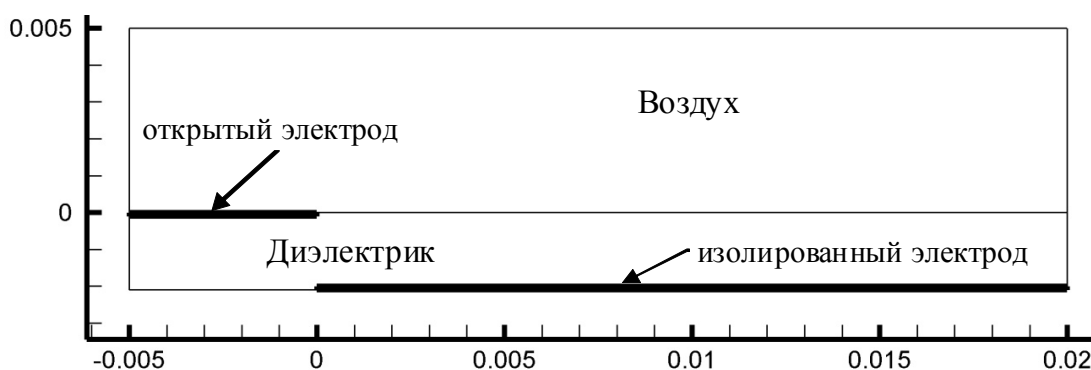


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области

Диэлектрик представляет собой керамический материал Масог с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 6$ и толщиной $d = 2,1$ мм. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\varepsilon_r = 1,0006$. Электроды представляют собой полоски меди. Длина открытого электрода составляет 5 мм, а изолированного – 25 мм. Начало координат совпадает с правым краем открытого электрода.

Многоблочная структурированная сетка, описывающая геометрию расчетной области, состоит из 5 блоков, с общим количеством узлов 17275 (рис. 2). Минимальный шаг сетки вблизи правого края открытого электрода $1 \cdot 10^{-5}$ м.

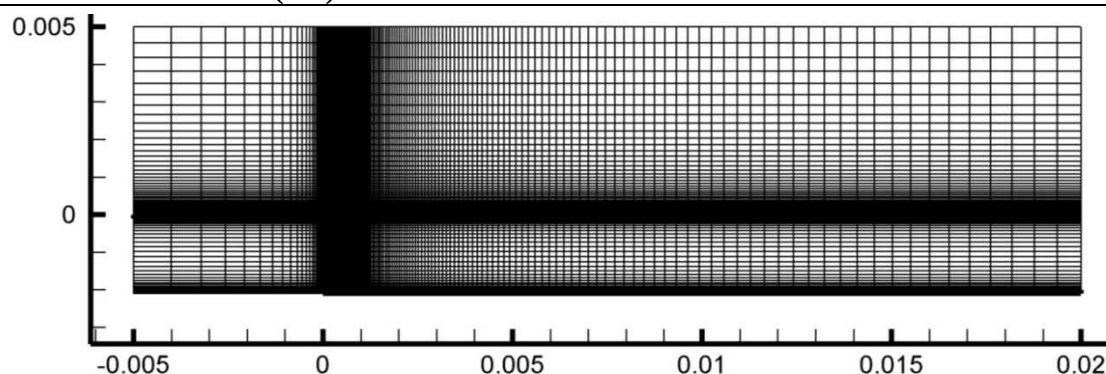


Рисунок 2 – Многоблочная структурированная сетка

После дискретизации исходного уравнения формируется разреженная матрица A с общим числом ненулевых элементов 94663, включая диагональные.

Уравнение Лапласа относится к эллиптическому типу дифференциальных уравнений. Так как данное уравнение содержит переменные коэффициенты (при вторых производных), то к нему не могут быть применены специальные методы решения типа быстрого преобразования Фурье. Поэтому возникает вопрос о том, какой лучше использовать солвер для полученной системы линейных алгебраических уравнений.

Аппроксимация уравнения Лапласа приводит к формированию симметричной положительно определенной матрицы с большим спектральным радиусом. Т.е. матрица является плохо обусловленной.

Для сравнения выберем наиболее популярные нелинейные методы решения СЛАУ метод сопряженных градиентов (CG), метод обобщённых минимальных невязок (GMRES) и метод бисопряженных градиентов (BiCG). В качестве предобуславливателя используется ILU(0) разложение. Линейные методы не рассматриваются в силу их изначально плохой сходимости решения для данного класса уравнений.

Получено распределение электрического потенциала в области (рис. 3). Для наглядности результаты отнесены к максимальному значению напряжения $\varphi = 30$ кВ.

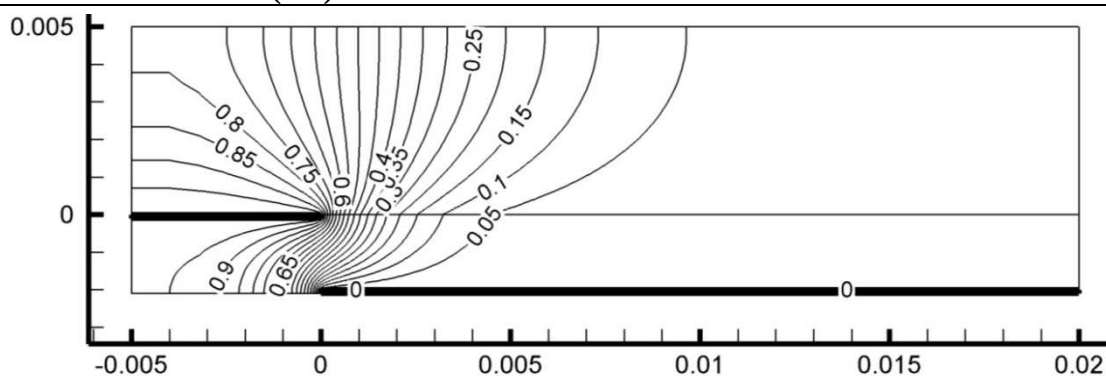


Рисунок 3 – Распределение электрического потенциала в области отнесенного к максимальному значению

Критерием сходимости выступает норма невязки. Система линейных алгебраических уравнений считается решенной, если текущая норма невязки меньше начальной на семь порядков $\|R_i\|/\|R_0\| < 10^{-7}$.

Изменение нормы невязки от числа итераций для методов CG, GMRES и BiCG приведены на рис. 4. Исходя из полученных результатов видно, что метод сопряженных градиентов не приводит к сходимости. Метод бисопряженных градиентов хотя и приводит к решению, однако скорость сходимости, а также поведение вселяет некоторую неуверенность в надежность данного метода. И только метод обобщенных минимальных невязок показал хорошую и устойчивую сходимость при решении СЛАУ. Поэтому данный солвер рекомендуется использовать как робастный при решении систем линейных алгебраических уравнений с произвольной матрицей A .

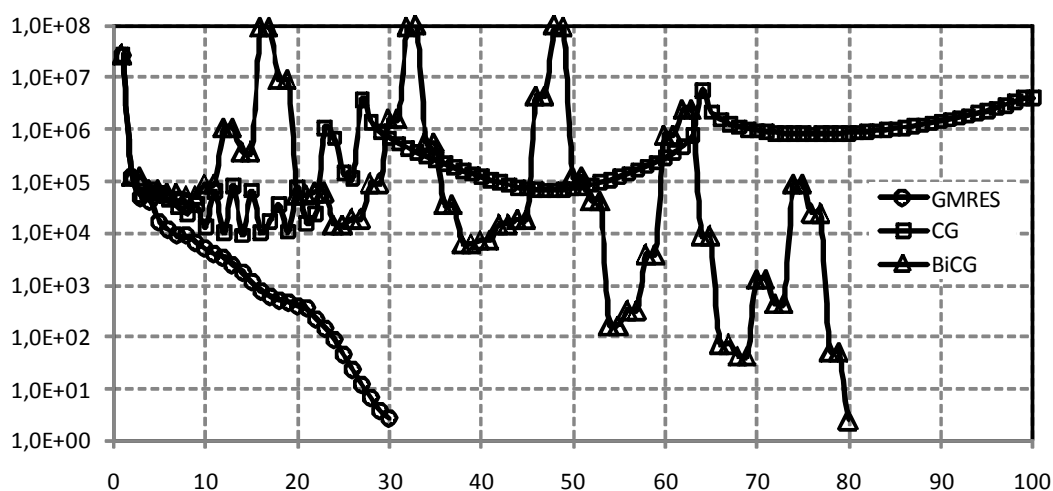


Рисунок 4 – Изменение нормы невязки от числа итераций

Выводы

1. Проведен обзор итерационных методов решения разреженных систем линейных алгебраических уравнений большой размерности.

2. На основе преимуществ и недостатков существующих определен круг наиболее эффективных методов решения систем линейных алгебраических уравнений с несимметричной положительно определенной матрицей.

3. Установлено, что метод обобщённых минимальных невязок (GMRES) для разреженных матриц обладает высокой вычислительной эффективностью при решении задач эллиптического типа с плохо обусловленной матрицей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеенко, С.В. Расчет априорных вероятностей для решения задачи Дирихле для уравнения Пуассона методом Монте-Карло [Текст] / С.В. Моисеенко, Ю.И. Николаенко, П.М. Зуб // Вестник Херс. нац. техн. ун-та. – Херсон: ХНТУ, 2010. – Вып. №3 (39). – С. 345 – 349.
2. Редчиц, Д.А. Управление вихревой дорожкой Кармана с помощью плазменных актуаторов [Текст] / Д.А. Редчиц, О.Б. Полевой, С.В. Моисеенко // Вестник Днепропетровского ун-та. Механика. – Днепропетровск: ДНУ, 2013. – Т.21, № 5, Вып. 17, Т. 1. – С. 63-80.
3. Van der Vorst, H.A. Iterative Methods for Large Linear Systems [Text] / H.A. van der Vorst; Utrecht University. – Utrecht, The Netherlands, 2002 – 195 p.
4. Saad, Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems [Text] / Y. Saad; Society for Industrial and Applied Mathematics. – Boston, USA, 528– 195 p.
5. Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods [Text] / M. Berry, T. Chan, J. Demmel, J. Donato, J. Dongarra, V. Eijkhout, R. Pozo, C. Romine, and H. Van der Vorst; Society for Industrial and Applied Mathematics. – Philadelphia, USA, 1994. – 195 p.

С.Л. Никулин, О.В. Коробко

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ
ОБРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ
ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Аннотация. Исследована эффективность применения различных методов предварительной обработки космических снимков для повышения качества выделения границ и контуров природных объектов. Экспериментальным путём установлено, что увеличение количества выделяемых целостных и протяжённых границ достигается путём предварительной обработки снимков методом контрастно-ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы.

Ключевые слова: космические снимки, границы яркости, обработка изображений, оптимальный детектор Кенни.

Постановка задачи и состояние проблемы

В настоящее время всё большее количество инженерно-технических задач решается с использованием космических снимков поверхности Земли. К таким задачам относятся мониторинг инженерно-технических сооружений (дорог, трубопроводов, зданий, промышленных объектов), сельхозугодий, разведка и эксплуатация недр, управление имуществом и территориями, и многие другие. Одним из стандартных этапов обработки снимков является выявление т.н. границ – контуров площадных объектов и осей линейных объектов. Они могут быть как чёткими и объективно существующими (как, например, контур здания или автодорога), так и нечёткими или существующими лишь условно (например, ось древнего геологического разлома или граница болота). Как правило, границы второго типа соответствуют природным объектам, поэтому их выделение выполняется менее успешно (они выделяются лишь частично и представляются прерывистыми, фрагментарными), по сравнению с техногенными объектами, имеющими обычно более простые и чёткие контуры.

Существует целый ряд подходов к автоматическому выделению границ природных объектов. Чаще всего используется один из них, заключающийся в предварительном выявлении узких вытянутых зон резкого перепада значений яркости (фототона) снимка – т.н. границ яркости. Для этого используются разнообразные масочные алгоритмы, наиболее приемлемым из которых считается оптимальный детектор Кэнни [1], преобразующий исходный снимок в бинарное изображение, на котором единичные пикселы соответствуют наличию границы, а нулевые – её отсутствию.

Предварительные исследования показали, что повышение качества выявления границ яркости может быть достигнуто путём дополнительной обработки космических снимков. Традиционно на практике применяется ряд несложных методов – контрастирование, коррекция яркости, эквализация гистограммы космоснимка. Вместе с тем, в теории обработки цифровых изображений [2] существует большое количество методов, которые до настоящего времени не применялись для указанных целей.

Цель работы – экспериментальная оценка ряда методов обработки изображений и выявление наиболее эффективных при решении задачи выделения границ яркости на синтезированных и панхроматических космических снимках.

Исходные данные и инструментарий исследований

В качестве исходных данных выступали 20 синтезированных космических снимков, различного пространственного и спектрального разрешения, сделанных аппаратурой Landsat-7, Terra MODIS, Spot-4, а также снимки Google. Снимки представляют различные участки Земного шара, находящиеся в различных геологических и ландшафтных условиях.

Обработка исходных космоснимков исследуемыми методами производилась в среде MatLab, выделение границ яркости обработанных снимков выполнялась в среде специализированной ГИС РАПИД, разрабатываемой на кафедре геоинформационных систем ГБУЗа «НГУ» [3].

В таблице 1 приведены условные названия и краткая характеристика снимков.

Исходные данные для экспериментов

Название снимка	Характеристика снимка
Месторождение Зармитан (Узбекистан)	синтезированный снимок SPOT-4 (разрешение 20 м) золоторудного месторождения Зармитан
Месторождение Зиаэтдин (Узбекистан)	панхроматический снимок Landsat-5 (разрешение 15 м) золоторудного месторождения Зиаэтдин
Фрагмент территории Китая	синтезированный космический снимок Landsat-5 (разрешение 30 м) фрагмента горной местности территории провинции Сычуань (Китай)
Сельхозугодья, Украина	синтезированный космический снимок Landsat-5 (разрешение 30 м; каналы 1,2,4) части территории Магдалиновского р-на Днепропетровской области
Фрагмент территории Афганистана	снимок Google части горной территории Афганистана
Фрагмент территории Мексики	снимок Google части горной территории Мексики
Фрагмент территории Норвегии	снимок Google фрагмента северной части Норвегии
Фрагмент территории Перу	снимок Google фрагмента восточной части Перу
Месторождение Султануиздаг (Узбекистан)	снимок Google золоторудного месторождения Султануиздаг (Узбекистан)
Фрагмент Тибета	снимок Google части горной территории Тибета
Фрагмент территории Финляндии	снимок Google части среднегорной территории Финляндии
Фрагмент территории Шотландии	снимок Google фрагмента северной части Шотландии (район разлома Глен-Мор)
Дождевой лес, Малайзия	снимок Google фрагмента территории Малайзии
Попигайский метеоритный кратер	космический снимок Landsat-7 Попигайского метеоритного кратера (Россия)
Фрагмент территории о.Суматра	снимок Google территории побережья о.Суматра, Индонезия (разрешение ок. 10 м)
Фрагмент территории Забайкалья	снимок Google, включающий северную часть акватории оз. Байкал и территорию Забайкалья (разрешение ок. 250 м)
Фрагмент территории Австралии	снимок Terra Modis (разрешение 500 м) восточной части Австралии
Фрагмент территории Марокко	снимок Terra Modis (разрешение 250 м) западной части Марокко
Фрагмент территории Азии	обзорный космический снимок территории Азии (разрешение ок. 10000 м)
Центральные Карпаты	снимок Terra Modis (разрешение 250 м) центральной части Карпат

Методика и результаты исследований

В работе исследовались такие методы обработки изображений [2, 4-6]:

- среднеконтргармонический фильтр;
- метод нечеткого маскирования;
- контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы;
- метод Люси-Ричардсона;
- разностный метод;
- метод с использованием среднеквадратических отклонений интенсивности пикселей локальных окрестностей;
- на основе фильтра усеченного среднего;
- на основе фильтра Кувахары (Kuwahara);
- на основе линейного фильтра Винера;
- на основе фильтра срединной точки.

Эксперименты проводились по следующей методике.

1. В среде MatLab каждое из исходных изображений обрабатывалось вышеперечисленными методами. В результате получено 200 изображений, которые подвергались дальнейшей обработке.

2. В среде ГИС РАПИД на исходных и преобразованных изображениях оптимальным детектором Кенни выделялись границы яркости. В результате получено 210 бинарных изображений, на которых единицы соответствуют границам яркости. Некоторые из полученных бинарных карт, относящихся к территории Забайкалья, приведены на рисунке 1. Следует отметить высокую концентрацию и криволинейность выделяемых границ, что обусловлено их естественным происхождением и сложным рисунком рельефа местности.

3. Выполнялась оценка качества выделения границ яркости до и после применения исследуемых методов обработки изображений.

Оценка качества выделения обычно основывается на использовании интуитивно-понятных эвристических критериев качества выделения границ:

а) выделяемые границы должны быть максимально целостными и не иметь большого количества разрывов; выполнение этого условия на практике ведёт к росту количества пикселей, относимых к граничным.

б) должны выделяться только основные границы, имеющие достаточную протяжённость и чёткость. В противном случае может возникнуть ситуация, когда получаемое бинарное изображение перегружено многочисленными 1-2-пиксельными фрагментами. На практике выполнение этого условия ведёт к уменьшению количества пикселей, относимых к граничным.

Таким образом, указанные требования, при всей своей очевидности, на практике являются взаимоисключающими – максимальное удовлетворение одного ведёт к минимальному удовлетворению другого. Поэтому наиболее продуктивным представляется подход к оценке качества выделения, основанный на использовании двух предлагаемых ниже показателей качества выделения границ. Они легко вычисляются, имеют простой геометрический смысл, а их совместное использование не требует применения процедур многокритериальной оптимизации.

Предлагается использовать следующие показатели:

N – количество единичных (ненулевых) пикселей, соответствующих границам яркости на бинарном изображении. Характеризует общее количество выделенных границ и вычисляется путём суммирования пикселей с единичными значениями.

$F = K/N$, где K – количество непрерывных фрагментов границ на изображении. Этот показатель характеризует степень целостности границ. Чем он ниже, тем более надёжно и уверенно выделены границы.

Значения показателей N и F автоматически рассчитывались для всех исходных и обработанных различными методами изображений и заносились в таблицы. Показатели N и F , приведенные в каждой из таблиц, упорядочивались по возрастанию и, в зависимости от их полученного порядкового номера, им присваивался ранг от 1 (наименьшее значение) до 11 (наибольшее значение).

По результатам ранжирования показателей N и F были построены таблицы 2 и 3, содержащие ранги этих показателей для исследуемых методов, рассчитанные для каждого снимка. Они послужили основой для формулирования выводов и рекомендаций относительно применимости исследованных методов в процедурах обработки космоснимков и, в частности, выделения линеаментов.

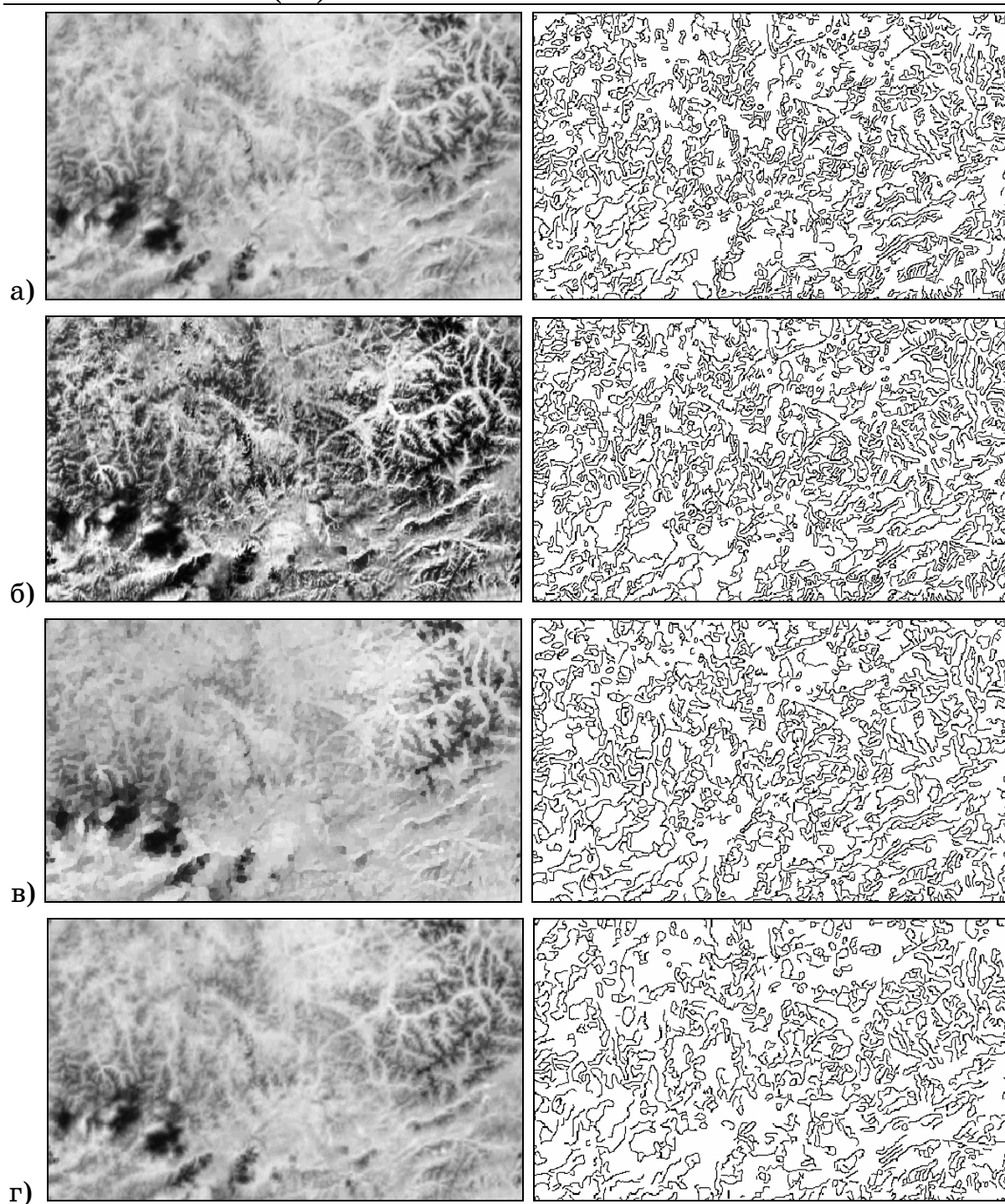


Рисунок 1 – Результаты обработки фрагмента снимка Забайкалья и соответствующие им бинарные карты границ яркости: а) исходное изображение; обработанные методами контрастно-ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы (б), фильтра Кувахары (в), фильтра срединной точки (г)

Суммарные ранги показателей N и F для разных методов, проранжированные по возрастанию, представлены в таблице 4. Они позволили оценить эффективность применения каждого из 10 использованных методов предобработки изображений.

Подобные действия выполнялись также отдельно для снимков высокого и низкого разрешения; полученные результаты оказались сходными с приведенными в таблицах 2-4.

Анализ результатов и практические выводы

Анализ полученных результатов, позволяет утверждать следующее:

1. Метод контрастно-ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы, разностный метод и метод с использованием среднеквадратических отклонений интенсивности локальных окрестностей увеличивают значение показателя N по сравнению с исходным изображением. Это означает, что применение любого из этих методов позволяет увеличить количество выделяемых границ яркости на обработанном изображении по сравнению с исходным.

2. Как указывалось выше, повышение количества выявляемых границ ведёт к проявлению значительного количества мелких, несущественных деталей, – коротких, прерывистых фрагментов границ, – существенно затрудняющих решение многих практических задач. Поэтому большое значение имеет значение показателя F , которое является своеобразной мерой целостности получаемых границ. Низкие значения F свидетельствуют о том, что выделенные границы яркости являются целостными, протяженными, уверенно выделяемыми.

3. С точки зрения практического использования, лучшие результаты могут быть достигнуты при использовании таких методов обработки, которые обеспечивают выделение большего количества границ (повышение значения N), по сравнению с необработанным снимком, но выделяемые границы должны быть протяжёнными, целостными (снижение значения F).

Таблица 2

Ранги показателя N для используемых космических снимков

Методы обработки изображений:	Фрагмент территории Афганистана	Фрагмент территории Забайкалья	Месторождение Замитан (Узбекистан)	Месторождение Замитан (Узбекистан)	Фрагмент территории Китая	Сельхозугодья, Украина	Фрагмент территории Мексики	Фрагмент территории Норвегии	Фрагмент территории Перу	Месторождение Султаничун (Узбекистан)	Фрагмент территории Тибета	Фрагмент территории Финляндии	Фрагмент территории Шотландии	Фрагмент территории Австралии	Понгайский метеоритный кратер	Фрагмент о. Суматра	Фрагмент территории Марокко	Дождевой лес, Малайзия	Фрагмент территории Азии	Центральные Карпаты	Суммарный ранг
Исходное изображение	8	9	8	8	11	11	7	10	9	10	7	8	9	6	9	6	10	9	6	7	158
Фильтр усеченного среднего	3	3	5	5	4	3	3	5	3	4	3	3	3	5	4	2	1	3	4	2	68
Контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы	4	11	11	11	11	11	7	10	9	10	10	11	6	11	11	9	4	6	10	11	184
Среднеконтрастный фильтр	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	4	2	4	2	1	3	2	2	3	47
Фильтр Кувахары	6	5	1	4	6	4	6	6	5	6	5	5	5	2	1	4	7	5	9	1	93
Метод Люси-Ричардса	9	7	6	7	9	7	10	7	7	8	7	6	7	7	7	7	8	10	7	8	151
Метод нечеткого маскирования	7	6	9	9	3	9	5	1	6	5	6	10	10	1	6	11	6	7	5	9	131
Метод среднеквадратических отклонений интенсивности	11	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11	9	11	10	10	10	11	8	11	6	202
Разностный метод	10	8	7	8	7	8	9	8	8	9	8	7	8	8	8	8	9	11	8	10	167
Фильтр средней точки	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	3	3	3	2	1	1	5	33
Линейный фильтр Винера	5	5	4	3	5	5	4	4	4	3	4	2	4	9	5	5	5	4	3	4	87

Таблица 3

Ранги показателя F для используемых космических снимков

Методы обработки изображений:	Фрагмент территории Афганистана	Фрагмент территории Забайкалья	Месторождение Замитан (Узбекистан)	Месторождение Замитан (Узбекистан)	Фрагмент территории Китая	Сельхозугодья, Украина	Фрагмент территории Мексики	Фрагмент территории Норвегии	Фрагмент территории Перу	Месторождение Султанын (Узбекистан)	Фрагмент территории Тибета	Фрагмент территории Финляндии	Фрагмент территории Шотландии	Фрагмент территории Австралии	Попытский метеоритный кратер	Фрагмент о. Суматра	Фрагмент территории Марокко	Дождевой лес, Малайзия	Фрагмент территории Азии	Центральные Карпаты	Суммарный ранг
Исходное изображение	10	11	9	8	10	7	8	10	11	8	10	10	10	8	8	8	9	8	9	8	180
Фильтр усеченного среднего	3	3	4	5	5	1	2	4	5	6	6	3	4	2	6	2	1	2	5	2	71
Контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы	4	5	10	7	6	6	7	7	6	3	5	7	5	11	5	7	4	5	3	6	119
Среднеконтрастгармонический фильтр	2	2	6	6	4	4	4	5	3	4	3	5	3	5	3	4	2	4	2	3	74
Фильтр Кувахары	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	5	1	1	1	28
Метод Люси-Ричардса	8	9	7	9	11	9	10	8	9	9	8	8	8	9	9	9	10	9	10	9	178
Метод нечеткого маскирования	6	4	1	2	1	5	3	2	2	2	2	6	7	3	1	11	7	7	6	7	85
Метод среднеквадратических отклонений интенсивности	11	8	11	11	9	11	11	11	8	11	11	11	11	7	10	6	8	11	8	11	196
Разностный метод	9	10	8	10	8	10	9	9	10	10	9	9	9	10	11	10	11	10	11	10	193
Фильтр средней точки	7	7	5	3	7	8	6	6	4	7	7	4	6	4	7	5	3	6	7	5	114
Линейный фильтр Винера	5	6	3	4	3	3	5	3	7	5	4	2	2	6	4	3	6	3	4	4	82

Сводная таблица показателей качества выделения границ после применения различных методов предобработки снимков

Метод обработки изображений	Суммарные ранги	
	N	F
Фильтр Кувахары	93	28
Фильтр усеченного среднего	68	71
Среднеконтргармонический фильтр	47	74
Линейный фильтр Винера	87	82
Метод нечеткого маскирования	131	85
Фильтр срединной точки	33	114
Контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы	184	119
Метод Люси-Ричардсона	151	178
Исходное изображение	158	180
Разностный метод	167	193
Метод с использованием среднеквадратических отклонений интенсивности пикселей локальных окрестностей	202	196

Таким образом, особую важность имеют методы обработки изображений, которые повышают значение параметра N при одновременном снижении F. Как видно из таблицы 4, единственным методом, повышающим N при одновременном снижении F, является контрастно-ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы.

Данный метод рекомендуется применять к космическим снимкам перед выделением границ с помощью оптимального детектора Кенни или других масочных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Canny J.F. A computational approach to edge detection / J.F. Canny // IEEE ТРАМІ. – 1986. – N 8(6). – P. 679-698
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р.Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Пивняк Г.Г. ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных. / Г.Г.Пивняк, Б.С.Бусыгин, С.Л.Никулин// Доп. Нац. акад. наук України. – 2007. – N6. – С.121-128.
4. Яне Б. Цифровая обработка изображений / Б.Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
5. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB //Р.Гонсалес, Р.Вудс, С.Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization / Karel Zuiderveld// in book: Graphics gems IV. – Academic Press Professional, Inc. – 1994. – pp. 474-485

РОЗРОБКА РОЗШИРЕННЯ ПІДРАХУНКУ «ВТРАЧЕНОГО ЧАСУ» В INTERNET

Анотація. Розроблено розширення для Google Chrome для підрахунку «Втраченого часу» в Інтернет. Це розширення підраховує час, проведений на сайтах з можливістю визначення відвіданих сайтів за категоріями: корисний час, або втрачений час.

Ключові слова: втрачений час, Google Chrome, Internet, розширення.

Інтернет - це інструмент, який допомагає нам вчитися, спілкуватися, творити і т. д. Але освоювати нові технології або сервіси буває непросто, і це приводить багатьох в замішання. І початківцю, і досвідченому фахівцеві важливо знати, як працює той чи інший продукт і як домогтися від нього максимальної ефективності.

Розширення - це персоналізовані функції, які легко підключити до Google Chrome. Розширення дозволяють додавати в Google Chrome тільки потрібні функції, уникаючи тих, які вам не потрібні.

Розширення дозволяють покращувати сторінку шляхом додавання релевантних посилань і інформації.

Деякі розширення додають кнопки в область біля адресного рядка, дозволяючи отримувати повідомлення про певні події.

Деякі розширення виконують функції ярликів.

Розробка розширення для Google Chrome, створеного для підрахунку «втраченого часу» в Інтернеті. Тобто це розширення рахує час, проведений на сайтах з можливістю визначення відвіданих сайтів за категоріями: корисний час, або втрачений час.

Отже, почнемо зі створення розширення: зі створення папки самого розширення, в яку будемо складати всі створювані нами файли. Назва якого буде - «losttime». Далі, створимо файл manifest.json, який виглядає наступним чином:

```

manifest.json
{
  "manifest_version": 2,
  "name": "Lost Time",
  "version": "1.0",
  "icons": {
    "128": ""
  },
  "content_scripts": [
    {
      "matches": [ "*"://*/*" ],
      "js": [ "content.js" ]
    }
  ],
  "background": {
    "scripts": [ "background.js" ]
  },
  "permissions": [
    "http://losttime.su/*"
  ],
  "browser_action": {
    "default_title": "LostTime",
    "default_icon": "",
    "default_popup": "popup.html"
  }
}

```

Деякі з рядків мають бути інтуїтивно зрозумілі, але що обов'язково потрібно знати:

- Значення `manifest_version` має бути обов'язково «2»;
- У `content_scripts` пишемо, який скрипт буде запускатися на всіх сторінках окремо;
- У `background` пишемо загальний скрипт (фоновий скрипт), який запускається при запуску браузера;
- У `permissions` пишемо адресу сайту, з якого буде братися інформація.

JSON (англ. Java Script Object Notation) - текстовий формат обміну даними, заснований на JavaScript і зазвичай використовуваний саме з цією мовою. Як і багато інших текстові формати, JSON легко читається людьми.

Незважаючи на походження від JavaScript (точніше, від підмножини мови стандарту ECMA - 262 1999 года), формат вважається язиконезавісним і може використовуватися практично з будь-якою мовою програмування. Для багатьох мов існує готовий код для створення та обробки даних у форматі JSON.

За рахунок своєї лаконічності в порівнянні з XML, формат JSON може бути більш підходящим для серіалізації складних структур. Якщо говорити про веб-додатках, в такому ключі він доречний в задачах обміну даними як між браузером і сервером (AJAX), так і між самими серверами (програмні HTTP - інтерфейси).

Оскільки формат JSON є підмножиною синтаксису мови JavaScript, то він може бути швидко десеріалізований вбудованою функцією `eval()`. Крім того, можлива вставка цілком працездатних JavaScript-функцій. У мові PHP, починаючи з версії 5.2.0, підтрим-

ка JSON включена в ядро у вигляді функцій `json_decode ()` і `json_encode ()`, які самі перетворюють типи даних JSON у відповідні типи PHP і навпаки.

JSON - текст являє собою (в закодованому вигляді) одну з двох структур:

Набір пар ключ: значення. У різних мовах це реалізовано як об'єкт, запис , структура, словник, хеш -таблиця, список з ключем або асоціативний масив. Ключем може бути тільки рядок , значенням - будь-яка форма.

Впорядкований набір значень. У багатьох мовах це реалізовано як масив, вектор, список або послідовність.

Це універсальні структури даних: як правило, будь-який сучасний мова програмування підтримує їх у тій чи іншій формі. Вони лягли в основу JSON, так як він використовується для обміну даними між різними мовами програмування.

Як значення в JSON використовуються структури:

Об'єкт - це неврегульована безліч пар ключ: значення, укладену в фігурні дужки " `{ }` ". Ключ описується рядком, між ним і значенням стоїть символ " `:` ". Пари ключ- значення відокремлюються один від одного комами.

Масив (одновимірний) - це впорядкована безліч значень. Масив полягає у квадратні дужки " `[]` ". Значення розділяються комами.

Значення може бути рядком у подвійних лапках, числом, об'єктом, масивом, одним з літералів: `true`, `false` або `null`. Т.ч. структури можуть бути вкладені один в одного.

Рядок - це впорядкована безліч з нуля або більше символів юнікоду, укладену в подвійні лапки. Символи можуть бути вказані з використанням ескапе - послідовностей , що починаються із зворотного косою риси " `\` ".

Рядок дуже схожа на однойменний тип даних в мовах C і Java. Число теж дуже схоже на C- або Java -число, за винятком того , що використовується тільки десятковий формат . Прогалини можуть бути вставлені між будь-якими двома синтаксичними елементами .

На рисунку 1 переставлене вікно, яке Ви можете бачити по кліку на іконку розширення - це сторінка: rporup.html.



Статистика за сегодня

Потеряно: 4 мин. 23 сек.

Полезное время: 59 мин. 10 сек.

Всего проведено: 1 ч. 9 мин. 26 сек.



Рисунок 1 – Вікно статистики

Файл `popup.html` виглядає наступним чином:

```
<!doctype html>
<html>
  <head>
    <title>Потерянное время
LostTime</title>
    <script src="jquery.js"
type="text/javascript"></script>
    <!-- Подключаю jquery -->
    <link href="css.css"
rel="stylesheet"
type="text/css"/><!-- Подключаю
стили-->
  </head>
  <body>
    <div id="options"><!-- меню -->
    <a href="/popup.html"><img
class='img' src="" Title =
"Короткая статистика за
сегодня"></a>
    <a href="/options.html"></a>
    <a href="/stat.html"></a>
  </div>
  <div id="dannie"></div> <!-- в
этот блок буду загружать данные,
которые будут показываться
пользователю-->
    <script
src="popup.js"></script><!--
скрипт, выполняющийся при нажатии
на иконку расширения-->
  </body>
</html>
```

Щоб було зрозуміліше, опис коду представлено на мові гіпертекстової розмітки HTML. Меню організуємо просто: на картинку необхідно поставити внутрішню посилання розширення.

Файл `popup.js` виглядає вельми просто:

```
var xhr = new XMLHttpRequest();
xhr.open("GET",
"http://losttime.su/?tmpl=login&t
oken="+localStorage['lostlogin'],
true); // тут происходит GET
запрос на указанную страницу
xhr.onreadystatechange =
function() {
  if (xhr.readyState == 4) //
если всё прошло хорошо,
выполняем, что в скобках
{
    var dannie =
document.getElementById('dannie')
;
    dannie.innerHTML =
xhr.responseText; // добавляем в
блок с id=dannie полученный код
  }
  xhr.send();
}
```

Саме описана вище конструкція дозволяє витягти і вивести зміст з Вашого, а може і не з Вашого сайту.

Важливо знати:

- У файлі маніфесту обов'язково в полі permissions пишемо адресу сайту, з якого буде братися інформація.

- Файл роруп.js пов'язаний з фоновим скриптом background.js, т.к. дані, занесені в локальне сховище на background.js, видно і на роруп.js.

Перед тим, як розглянути файл фонового скрипта background.js, розглянемо файл скрипта, який запускається на кожній сторінці окремо - content.js.

```

content.js                                == 'visible')//если страница
function onBlur() { // окно              активна
    теряет фокус                            {
                                            localStorage[sait] =
chrome.runtime.sendMessage({site:        parseInt(localStorage[sait],10)
sait,time:localStorage[sait]});          +1; // обновляем данные о сайте в
// отправка сообщения на                локальном хранилище
background.js                            }
    localStorage[sait] = '0';              }
}                                          var sait=location.hostname; // на
    window.onblur = onBlur; //            каком сайте находится скрипт
если окно теряет фокус                  localStorage[sait] = '0';
    function sec() //выполняется          setInterval(sec, 1000);//
каждую секунду                          запускать функцию каждую секунду
    {
if(document.webkitVisibilityState

```

Найбільш цікавий момент з скрипта, повинен бути:

```
chrome.runtime.sendMessage ({site: sait, time: localStorage
[sait]});
```

Тут відбувається відправлення повідомлення background скрипту, а саме дві змінні: site: sait - містить адресу сайту, на якому скрипт

time: localStorage [sait] - кількість часу, проведена на цьому скрипті.

Далі, розглянемо фоновий скрипт background.js, де і відбувається прийом даних, а точніше розглянемо саму функцію прийому даних.

```

background.js
chrome.runtime.onMessage.addListener(
    function(request, sender, sendResponse) {

```

```
var a = request.site; // данные о сайте
var b = request.time; // данные о проведенном времени
// тут делаем с этими данными что хотим.
});
```

Якщо в скрипті background.js додати які-небудь дані в локальне сховище, то ці ж дані можна буде використовувати і в rorup.js скрипті.

На сторінці налаштувань необхідно було організувати перетягування сайтів в різні колонки, рисунок 2.

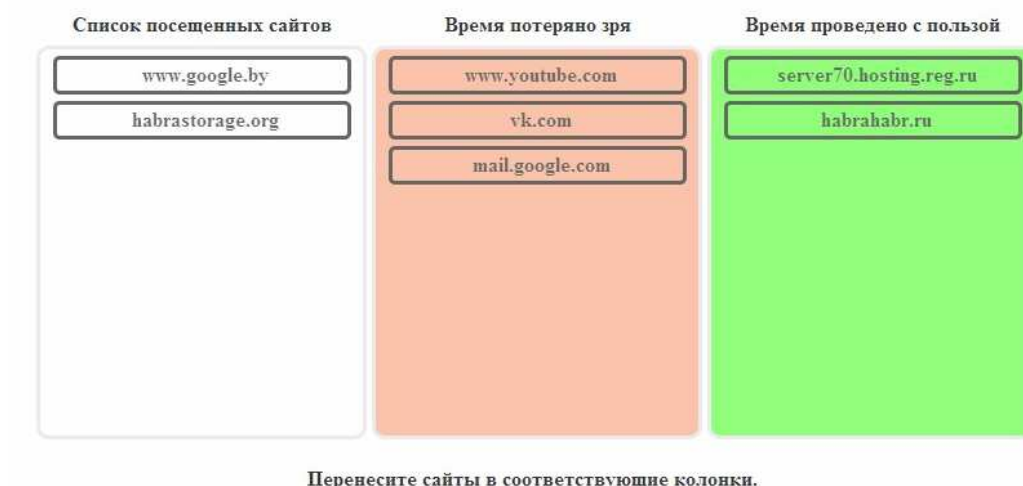


Рисунок 2 - Налаштування сайтів в різні колонки

Так як дані вставляються за допомогою InnerHtml, то дана можливість просто так не з'явиться. Ось, що довелося організувати:

```
$('#dannie').on('mouseover'
, '.sait', function( ) {
    $(this).css({'border':'3px solid black'});
    $(this).css({'border':'3px solid #ffffff'});
});
$('#dannie').on('mouseout',
'.sait', function( ) {
    $(this).css({'border':'3px solid black'});
});
$('#dannie').on('mousedown'
, '.sait', function( ) {
    $('#dannie').on('mouseover'
, '.sait', function( ) {
        $('#dannie').on('mouseover'
, '.sait', function( ) {
            $('.sait').draggable({
                helper:'clone'
            });
        });
    });
});
$('#dannie').on('mousedown'
, '.sait', function( ) {
```

Встановлює обробники подій на вибрані елементи сторінки. Має два варіанти використання:

```
on ( events, [ selector ], [ data ], handler ): jqueryv : 1.7
```

events - тип (и) оброблюваних подій. Наприклад "click", "resize" і т.д. (список всіх подій див. нижче). Якщо необхідно прив'язати обробник відразу на кілька типів подій, потрібно перерахувати їх через пропуск: "click resize..."

selector - селектор по якому будуть фільтруватися елементи, що лежать всередині вже знайдених. У підсумку, обробник буде спрацьовувати тільки в тому випадку, якщо подія «піднялося» від одного з відфільтрованих елементів.

data - дані, передані оброблювачу подій. У обробнику будуть доступні у змінній event.data.

handler - функція, яка буде встановлена в якості обробника. Замість функції, можна вказати значення false, це буде еквівалентно установці такої функції: function () { return false ;}.

.on (events - map, [selector], [data]): jqueryv : 1.7
за допомогою цього методу можна встановити на вибрані елементи відразу кілька різних обробників подій, кожен з яких буде реагувати на свій тип події.

events - map - об'єкт, в якому потрібно перерахувати типи оброблюваних подій і відповідні їм обробники. Здається в форматі:

{events - 1 : handler - 1, events - 2 : handler - 2, ...},

де events - і handler - і відповідають параметрам events та handler в першому варіанті методу (описаному вище).

Тестування розширення.

Заходимо в Настройки - Інструменти - Розширення, тиснемо на «Завантажити розпаковане розширення».

ЛІТЕРАТУРА

1. Марко Беллиньясо Разработка Web-приложений в среде ASP.NET 2.0: задача - проект - решение = ASP.NET 2.0 Website Programming. - М.:»Диалектика», 2007. — С. 640.
2. Посилання в мережі Інтернет:
http://ru.wikipedia.org/wiki/Google_Chrome

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ SIEMENS-РЕАКТОРА НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Анотація. Виконано моделювання температури поверхні перемички U-образного блоку полікристалічногоскремнія в «Siemens-Реакторі» - для різних схем подачі ПГС. Аналіз даних показав наявність об'єктивних причин тріщинообразування в блоках перемички.

Ключові слова: ідентифікація, процес, моделювання полікристалічний кремній, Siemens-Реактор, тріщини блоку.

Среди ряда известных промышленных технологий получения поликристаллического кремния (ПКК) полупроводниковой чистоты, наиболее распространена и востребована испытанная временем, коммерчески доступная технология Siemens-процесса (водородное восстановление трихлорсилана SiHCl_3) [1,2].

Полусение ПКК по «Siemens-процессу» обеспечило приемлемые на сегодняшний день технико-экономические показатели, темпы роста мировых объемов производства и определило высокий спрос на соответствующее оборудование. Конкуренция на рынке оборудования, направленная, прежде всего, на повышение производительности (рост объема реакционной камеры), привела к необходимости его совершенствования, имея главной целью улучшение качественных показателей ПКК. Для реализации такого подхода необходимо изучение особенностей протекания физико-химических процессов в реакторе водородного восстановления.

Отсутствие способов прямого и точного измерения основного управляемого параметра процесса в Siemens-реакторе, - скорости осаждения кремния на поверхность стержня-подложки U-образной формы, - предопределило развитие инструментов моделирования процесса в реакторе. В традиционных схемах управления Siemens-реактором в качестве параметра управления используется температура поверхности стержней-подложек. На практике [1,3] задача решается путем

использования эмпирически устанавливаемой зависимости температуры стержня от силы питающего электрического тока, что обусловлено доминирующим воздействием этих параметров на процесс.

Необходимость повышения адекватности моделей, используемых для управления процессом, привела к вовлечению в расчеты и других параметров - объемный расход парогазовой смеси (ПГС) «водород:трихлорсилан (ТХС)», концентрационное соотношение «водород:ТХС», температура ПГС в реакторе, и др. Распределенный и стохастический характер параметров, отражающих физико-химические процессы в реакторе, является источником дрейфа во времени оценок, характеризующих адекватность моделей управления. Использование в управлении процессом вычисляемого результирующего комплексного показателя - скорости осаждения кремния - позволит обеспечить в ходе процесса контроль уровня адекватности используемой модели, и соответственно повысит качество управления. Нарушения адекватности являются проявлением неучтенных параметрических связей - случайного «резонирующего» сочетания значений параметров, ошибок моделирования или несоответствия модели управления конкретному конструктивному исполнению реактора.

Тенденция роста объема реакционной камеры определила потребность подачи в реактор значительного большего количества ПГС. Увеличение площади поддона реактора привело к образованию свободного пространства в его центральной части, что и было использовано для размещения дополнительного центрального патрубка подачи ПГС в реактор. Режим истечения через существовавшие периферийные патрубки был сохранен, а баланс по ПГС обеспечивался за счет его притока через центральный патрубок. Однако расчетная производительность процесса (по извлечению ПКК) достигнута не была. Выход на расчетные объёмы подаваемой ПГС для обеспечения заданной скорости осаждения ПКК, приводил к образованию трещин в перемычках U-образных блоков ПКК (рис. 1.) и к аварийному завершению процесса.

Анализ наблюдаемого явления показал, что его причина заключается в изменении газодинамического режима перемещения ПГС (соответственно и транспортировки реагентов) внутри реактора. Подача ПГС из центрального патрубка (сопло диаметром 35 мм) формирует локальное конусообразное впрыскивание ПГС в реактор.



Рисунок 1 - Развитие трещин на перемычке при форсированной подаче ПГС в реактор через центральный патрубок

Имея значительную дальнобойность, струя из центрального патрубка резко изменяет систему потоков ПГС и распределение концентрации ТХС внутри реактора. В области перемычки, со стороны блока, обращённой к низу, образуется зона повышенных концентраций ТХС. Далее центральная струя ПГС тормозится и разрушается в верхней части реактора. В точке соприкосновения с блоком (рис. 2, точка t_1) происходит интенсивная передача тепла от разогретого блока к поверхности перемычки и подаваемой ПГС, в результате чего интенсифицируются химические реакции и ускоряется процесс осаждения ПКК в локальном месте – в нижней части перемычки. Перемещение ПГС вдоль поверхности блока приводит к обеднению смеси реакционными компонентами. В результате к верхней поверхности блока поступает обеднённая ПГС, и реакции протекают с меньшей интенсивностью (рис. 2, точка t_2).

Асимметрия скорости осаждения кремния приводит к появлению тренда центральной, высокотемпературной зоны блока ПКК, в сторону нижней, интенсивно растущей его части [4] (см. рис.2.) и перераспределению теплового поля внутри блока ПКК - образуется менее нагретая зона в верхней части блока.

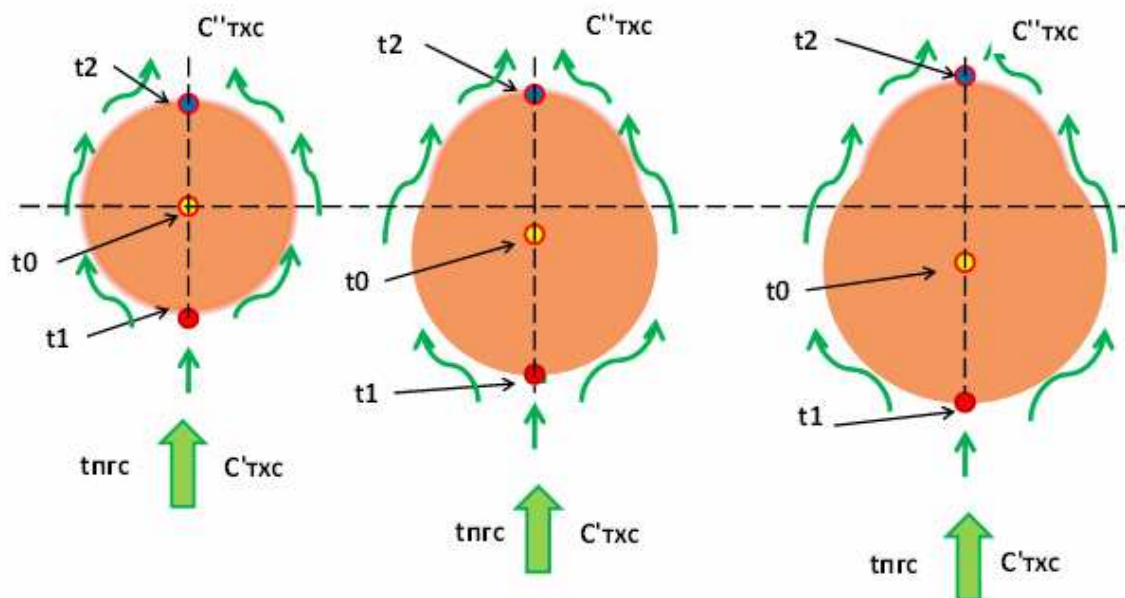


Рисунок 2 - Формирование асимметричной перемычки U-образного блока ПКК (поперечный разрез)

Таким образом, процесс водородного восстановления ТХС можно рассматривать с точки зрения протекания двух конкурирующих внутренних процессов. Первый - увеличение теплоаккумулирующих свойств формируемого блока в нижней (интенсивно растущей и соответственно более габаритной) его части. Второй - увеличение электрического сопротивления блока в верхней (менее нагретой) его части. Следствием этих процессов является смещение центральной высокотемпературной зоны блока от его верхней поверхности и перераспределение теплогенерирующей мощности (выделяемой электрическим током) в сторону менее нагретой (верхней) части блока. Но это перераспределение мощности не обеспечивает рост скорости осаждения кремния, так как поступающая к этой части поверхности блока ПГС уже обеднена реагентами. Таким образом, центральная, высокотемпературная зона блока все далее удаляется от верхней точки. В верхней точке блока температура опускается все ниже, что и ведёт к нарушениям регламента ведения процесса - преобладающему росту

перемычки U-образного блока ПКК со стороны, обращенной к низу (см. рис.1.).

Происходящие в реакторе процессы характерны для систем с положительной обратной связью: местное сочетание более высокой температуры ($t_1 > t_2$) и более высокой концентрации ТХС ($C'_{\text{тхс}} > C''_{\text{тхс}}$), приводящие к более высокой скорости осаждения кремния на нижней поверхности блока, и, как следствие, к смещению центральной, более высокотемпературной зоны блока вниз. Формирование асимметричного блока и удаление центральной, более высокотемпературной зоны блока от поверхности, обращенной кверху ($t_0 > t_1 > t_2$), приводит к дальнейшему уменьшению температуры верхней части блока и ещё большему увеличению асимметрии блока ПКК. В результате - устойчивый рост градиента температуры различных участков блока ПКК, формируемого на перемычке.

Моделирование температурного поля на верхней и нижней поверхностях перемычки блока ПКК позволило получить характер его распределения, приведенный на рис. 3. Точка (t_1) - фронт встречи струи ПГС, точка (t_2) – расположена с противоположной стороны блока, диаметрально противоположна направлению движения струи. Как видно из рис. 3, происходит перераспределение тепла и рост градиента температур между поверхностью и объёмом блока ПКК, формируемого на перемычке. Как следствие – большие температурные напряжения в блоке, рост вероятности образования трещин в перемычке блока ПКК и риск аварийного завершения процесса из-за образования трещин в перемычке между стержнями блока ПКК.

Идентификация причин образования брака позволила откорректировать систему подачи ПГС в реактор за счёт перераспределения объемов ПГС между боковыми патрубками. Уменьшение термических напряжений в перемычке U-образного блока ПКК и выполненная корректировка схемы подачи ПГС позволили значительно уменьшить температурный градиент и минимизировать риски образования трещин (рис. 4).

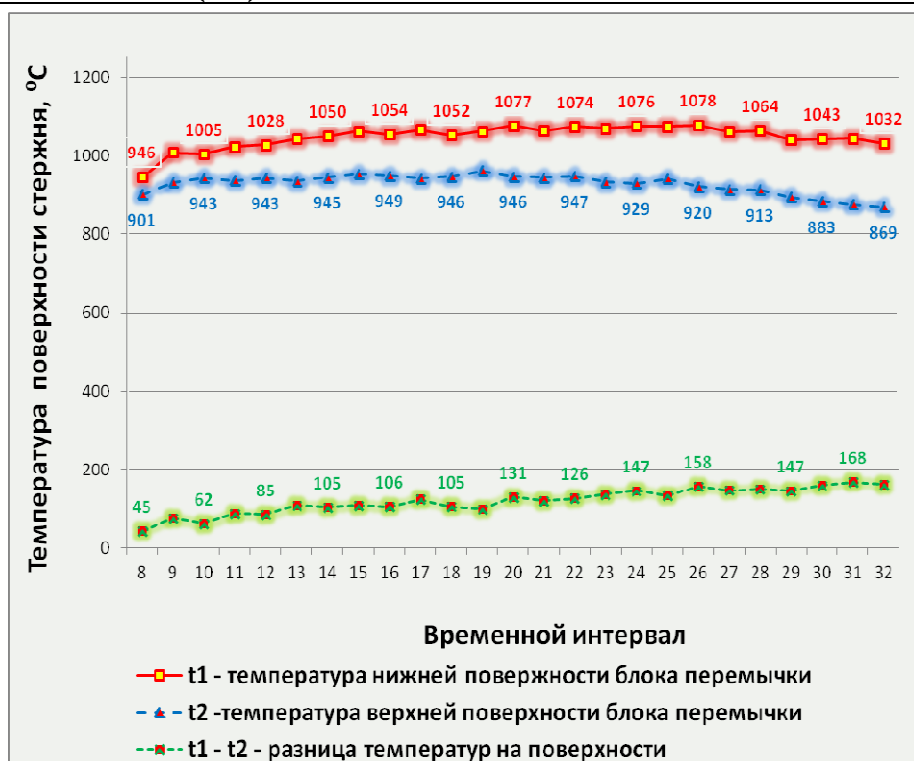


Рисунок 3 - Характер изменения во времени температурного поля на перемычке между стержнями блока ПКК при форсированной подаче ПГС в реактор через центральный патрубок

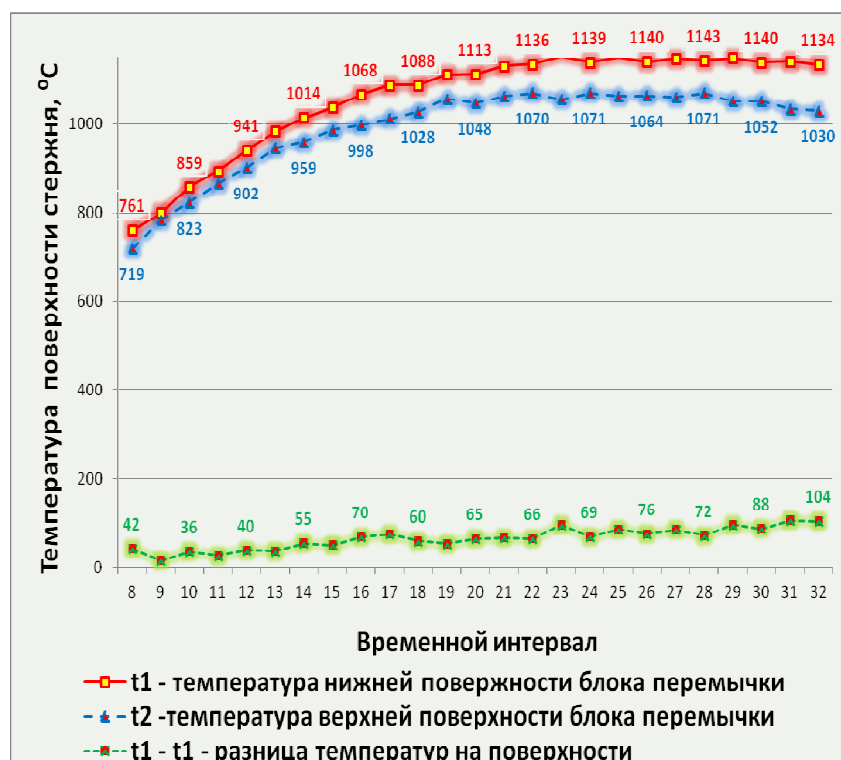


Рисунок 4 - Характер температурного поля после устранения центрального патрубка и перераспределения подачи ПГС в реакторе

Полученные результаты по установлению причины разрушения стержней ПКК, вызванного трещинообразованием на перемычках U-образных блоков, были подтверждены в ходе последующих промышленных процессов, что позволило вывести их на проектную производительность в соответствии с предписанным регламентом (рис. 5).

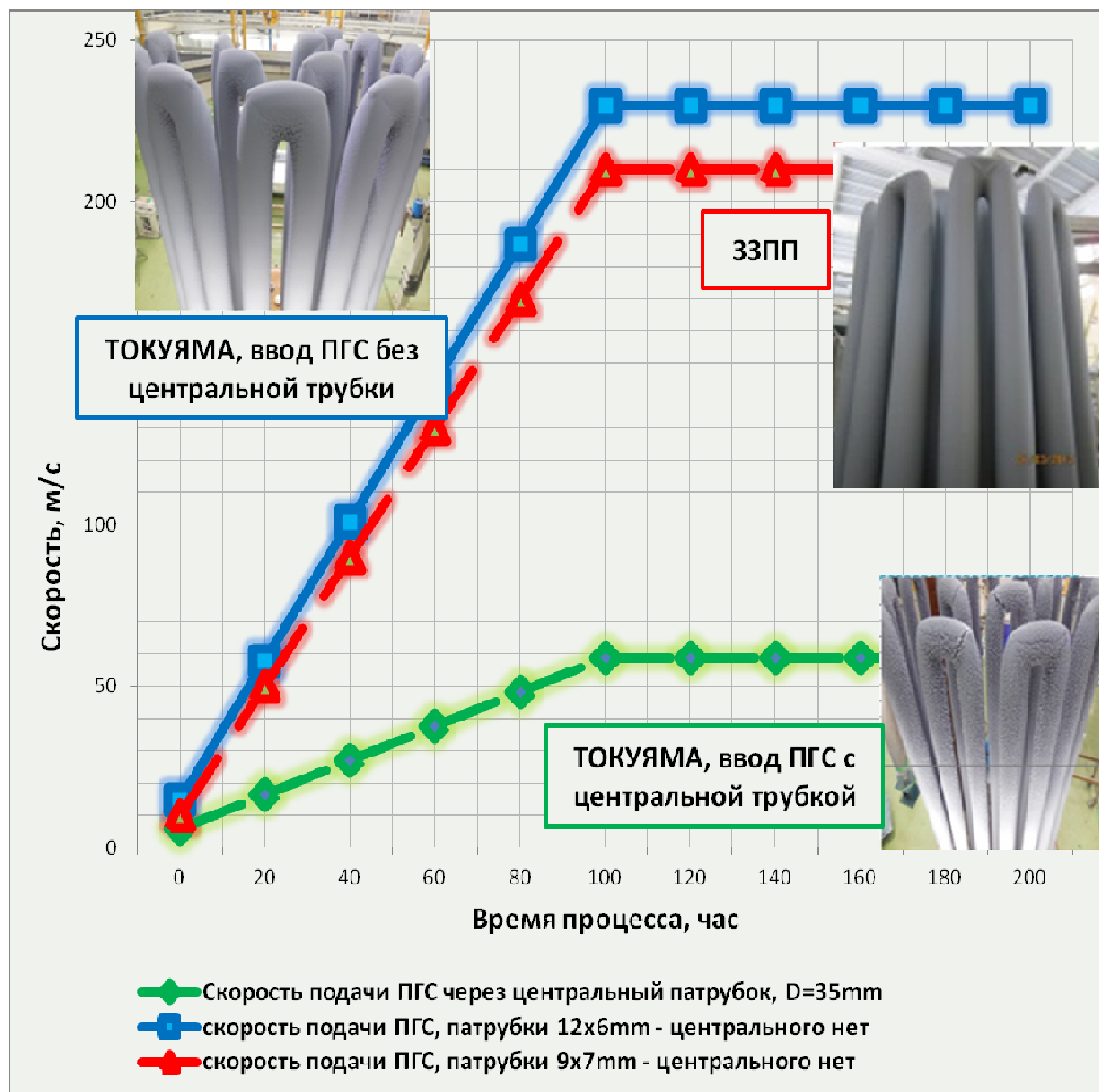


Рисунок 5 - Решение проблемы трещинообразования на перемычках U-образных блоков ПКК Siemens-реактора

Возможные варианты реализации регламентов подачи ПГС в реактор могут быть обеспечены схемами с различной компоновкой патрубков подачи-эвакуации парогазовой смеси (рис. 6).

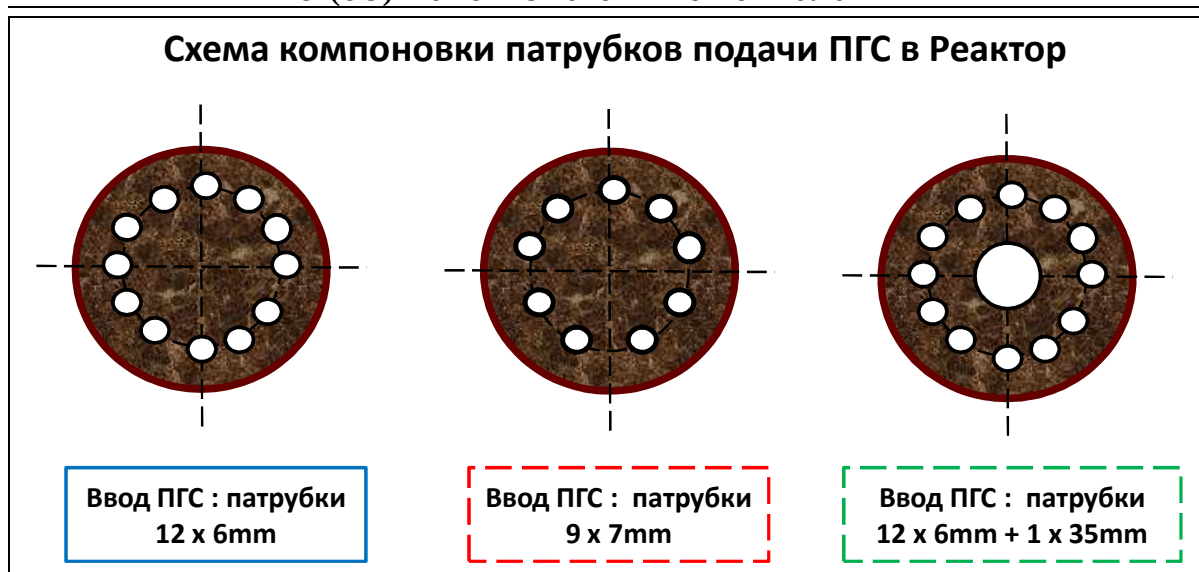


Рисунок 6 - Варианты схем компоновки патрубков подачи
парогазовой смеси

Заключение. Высокая чувствительность процесса водородного восстановления ТХС к характеру протекания газодинамических потоков ПГС в реакторе при получении ПКК определяет необходимость моделирования процесса уже на стадии проектирования оборудования. Отработка решений на модели сокращает период ввода оборудования в эксплуатацию, минимизирует затраты обеспечивает его выход на проектную мощность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния/Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червонный И.Ф., Шварцман Л.Я., Яркин В.Н. – М.:МЕТАЛЛУРГИЯ, 1992. - 408с.
Режим доступа: <http://www.booksshare.net/index.php?author=falkevich-es&book=1992&category=electrotech&id1=4>
2. Оптимизация процесса выращивания кремниевых основ для производства поликристаллического кремния / Реков Ю.В., Червонный И.Ф., Егоров С.Г., и др.// Прикладная физика и Материаловедение. 2011 -3/15-19.
Режим доступа:http://cyberleninka.ru/viewer_images/14427969/p/1.png
3. Алгоритм управления Siemens-Реактором производства поликристаллического кремния / Козин К.А., Горюнов А.Г., Левинцев С.Н., и др.//Известия Томского политехнического университета, 2009. №5 /том 315/с.70 – 74.
Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-rezistivnym-nagrevom-kremnievyh-sterzhney-peremennym-tokom>
4. Пат. США 20090229991 A1, Устройство и способ для получения равномерного распределения температуры в кремниевых стержнях во время процесса осаждения / Peter Wallmeier– US 12/400,984;заявл. 10.03.09; опубл. 17.09.09.
Режим доступа:<http://www.google.com/patents/US20090229991>

А.И. Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ МАСШТАБА В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Аннотация. Проведен сравнительный анализ мощности непараметрических критериев сравнения масштабов в выборках независимых и автокоррелированных случайных величин с различными законами распределения вероятностей. Исследована работоспособность критериев в задачах сравнения выборок с различными законами распределения вероятностей. И статистика критериев масштаба во всех перечисленных случаях.

Ключевые слова: выборка измерений, мощность критерия, непараметрические критерии, масштаб.

Постановка задачи

В задачах ультразвукового неразрушающего контроля объектов информация об их состоянии содержится в выборках измерений, статистические закономерности которых, как правило, неизвестны. Изменение статистических закономерностей является свидетельством изменения состояния объекта. Оценка изменения может быть использована при контроле однотипных объектов и наблюдении за их состоянием при эксплуатации, после длительного хранения, перевозке, ремонте. Задача обнаружения изменения состояния объектов может быть решена путем сравнения двух выборок измерений с неизвестными законами распределения вероятностей. Чаще всего выборки отличаются центром группировки измерений и величиной рассеяния (сдвигом и масштабом по терминологии непараметрической статистики) [1]. В работе [1] рассмотрено десять методов использования непараметрических критериев масштаба для сравнения двух выборок случайных величин. Это критерии Анасари-Бредли, Сижела-Тьюки, Кейпена, Клотца, квартильный критерий, Муда, Сэндвика-Олссона, Камата, Сукхатме, Сэвиджа и Краута-Линерта. Критерии Сукхатме, Сэвиджа и Краута-Линерта малоэффективны и поэтому здесь не рассматриваются.

Проведенные исследования в работе [2] изучены не все перечисленные критерии, и решалась задача только об обнаружении различия дисперсий в законах, отличных от нормального.

В задачах неразрушающего контроля при сравнении двух выборок измерений имеют места два ошибочных решения: 1) при равенстве масштабов выборок случайных величин принимается противоположное решение (ошибки первого рода); 2) при сравнении выборок с неравными масштабами принимаются ошибочные решения об их равенстве (ошибки 2-ого рода).

Цель исследования – анализ статистики непараметрических критериев масштаба при сдвиге масштабов, оценка вероятностей ошибочных решений 1-ого и 2-ого рода и работоспособности непараметрических критериев масштаба при различных видах законов распределения вероятности и коррелированности случайных величин. Эта задача решена путём проведения вычислительных экспериментов. Используя программы формирования выборок случайных величин с симметричными и асимметричными законами распределения вероятностей Лапласа и Гаусса, экспоненциальным и Релея, оценивалось влияние длины выборок и разностей их дисперсий, на законы распределения вероятностей исследуемых критериев и их параметры.

Эффективность критерия в задачах неразрушающего контроля – это его способность распознавать различие между масштабами исследуемых выборок. С этой целью решались следующие задачи:

1. Оценка критериев масштаба непараметрической статистики по величине минимальной ошибки первого рода.

2. Проведён факторный анализ исследуемых критериев путём оценивания влияния на статистические закономерности и их параметров видов законов распределения исследуемых выборок, их дисперсий, коррелированности и объёмов измерений (размеров выборок).

Анализ результатов вычислительных экспериментов

Первый вычислительный эксперимент имеет своей целью оценить эффективность всех критериев масштаба по величине вероятности ошибок первого рода при изменении дисперсий сравниваемых выборок. Исследовались две выборки по 100 измерений подчинённых нормальному закону распределения вероятностей с одинаковыми сдвигами и с изменяющейся дисперсией второй выборки (σ_2^2). Порог

сравнения критериев выбирался в соответствии с правилом Неймана-Пирсона (допустимая ошибка правильного решения P_{12} при отсутствии изменения масштаба выбрана не более 0,03). Результаты первого эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

σ_2 / σ_1 Критерий	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Анасари-Бредли	0,971	0,897	0,749	0,558	0,328	0,189	0,101	0,035	0,018	0,003	0,001
Сижела-Тьюки	0,97	0,96	0,881	0,823	0,783	0,6	0,521	0,433	0,315	0,21	0,193
Кейпена	0,937	0,855	0,868	0,811	0,79	0,698	0,626	0,599	0,57	0,507	0,461
Клотца	0,986	0,948	0,725	0,522	0,26	0,102	0,024	0,002	0	0	0
Квартильный	0,953	0,936	0,846	0,709	0,557	0,392	0,294	0,181	0,105	0,055	0,03
Муда	0,953	0,882	0,717	0,47	0,248	0,141	0,042	0	0	0	0
Сэндвика-Олссона	0,951	0,897	0,717	0,508	0,286	0,139	0,049	0,016	0,003	0	0
Камата	0,951	0,891	0,743	0,549	0,347	0,233	0,13	0,058	0,028	0,009	0

Из её анализа следует, что лучшими критериями сравнения выборок является критерий Клотца ($P_{12}^* = 0,14$) и критерий Анасари-Бредли ($P_{12}^* = 0,29$). Они же лучше и при обнаружении изменений масштаба. Так, если $\sigma_2 / \sigma_1 = 1$, то вероятность обнаружения этого изменения критерием Клотца $P_{22}^* = 0,976$ ($P_{12}^* = 0,024$) и критерием Анасари-Бредли $P_{22}^* = 0,899$ ($P_{12}^* = 0,101$).

Второй эксперимент – оценка влияния на ошибочные решения размеров выборок измерений при использовании критериев Клотца и Анасари-Бредли. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2

n Критерий	10	20	30	50
Анасари-Бредли	0,035	0,029	0,024	0,021
Клотца	0,018	0,016	0,015	0,014

Очевидно, что с увеличением количества измерений ошибки уменьшаются, однако рассматриваемые критерии позволяют получить достаточно точные результаты и при незначительных объёмах

исходных данных, что расширяет возможности их использования и сокращает расходы по накоплению данных.

Исследовались выборки с одинаковыми параметрами, но различные законы распределения вероятностей: нормальной и/или экспоненциальный. Установлено как в этих условиях изменяется статистика критериев и их параметры. Результаты эксперимента представлены в виде гистограмм и таблиц. На рисунке 1 приведены гистограммы критерия Клотца для случаев входных выборок с нормальным и/или экспоненциальным законами распределения вероятностей при длинах выборок $n = 50$ и одинаковых значениях параметров.

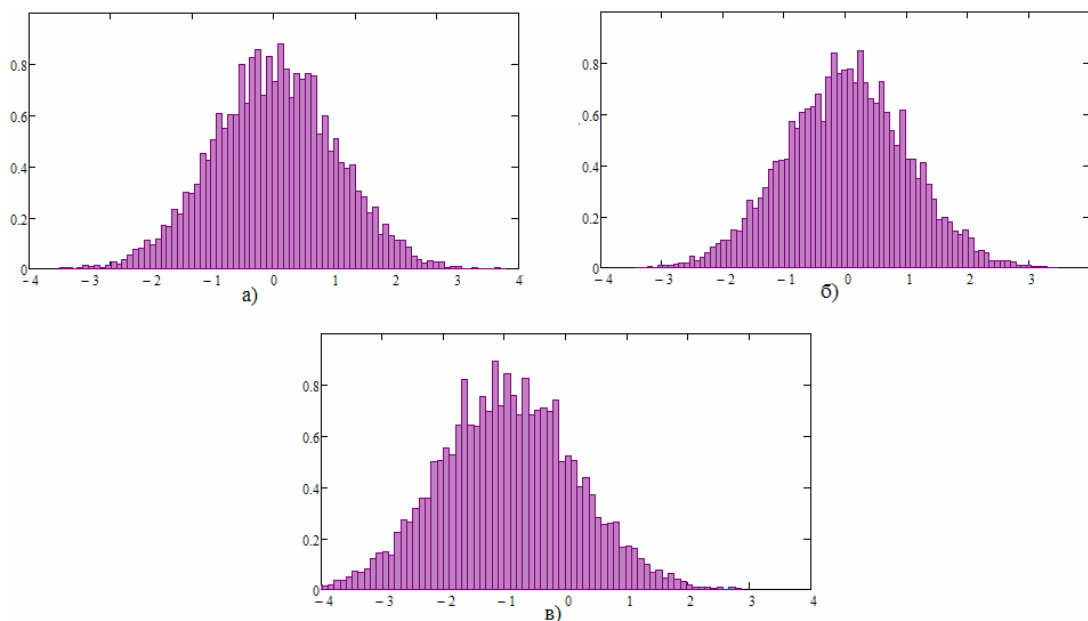


Рисунок 1 – Гистограммы статистики критерия Клотца

а) выборки с нормальным законом ($a_1 = a_2 = 1, \sigma_1 = \sigma_2 = 1$);

б) выборки с экспоненциальным законом ($\lambda_1 = \lambda_2 = 1$); в) выборки с

нормальным ($a_1 = 1, \sigma_1 = 1$) и экспоненциальным законом ($\lambda_2 = 1$)

Из рисунка 1 видно, что статистика критерия подчиняется нормальному распределению вероятностей. Эта гипотеза проверена по критерию хи-квадрат, и получила подтверждение (показатель критерия хи-квадрат $z = 110,542$, при пороговом значении $z_0 = 124,34$, то есть выполняется условие $z < z_0$). Это нормальное распределение имеет нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию. Исключение составляет случай, когда сравниваются выборки с нормальным и экспоненциальным распределениями вероятностей, тогда математическое ожидание статистики становится равным -1. Такая закономер-

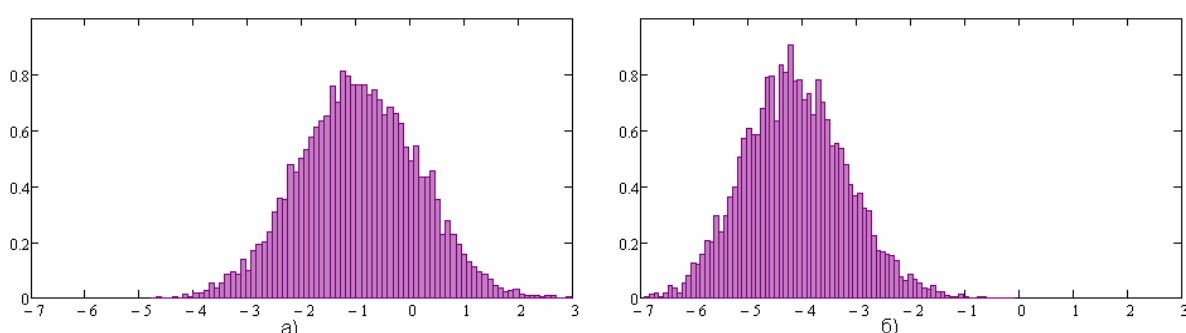
ность справедлива и для прочих вариантов различных законов распределения вероятностей при равных параметрах. Аналогичный эксперимент для критерия Анасари-Бредли подтвердил, что его статистика так же подчиняется нормальному распределению.

В таблице 3 приведены показатели эффективности непараметрических критериев масштаба при сравнении выборок с нормальным ($\sigma_1 = 1$) и экспоненциальным ($\lambda_2 = 1$) распределениями. В таблице приведено значение вероятности, с которой каждый критерий определяет выборки как имеющие различные масштабы ($n = 50$).

Таблица 3

σ_2	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Критерий											
Анасари-Бредли	0,519	0,325	0,229	0,135	0,097	0,035	0,024	0,01	0	0	0
Клотца	0,545	0,274	0,102	0,031	0,004	0	0	0	0	0	0

При этом статистика критериев не изменяется, но различие масштабов оказывает существенное влияние на математическое ожидание распределения критериев. На рисунке 2 представлены гистограммы статистики критерия Клотца для выборок с нормальным и экспоненциальным распределением вероятностей. Рисунок 2а – масштабы выборок совпадают и равны 1 ($n = 50$), рисунок 2б – $\sigma_2 / \sigma_1 = 2$.

Рисунок 2 – Гистограммы статистики критерия Клотца а) $\sigma_2 / \sigma_1 = 1$,

$$\text{б) } \sigma_2 / \sigma_1 = 2$$

Поскольку параметры статистики самих критериев зависят от разности масштабов исходных данных, то этот факт можно использовать для определения неоднородности выборок измерений.

Исследовалось влияния корреляции на эффективность непараметрических критериев масштаба. Приведён случай коррелированных ($r=0.9$) нормальных случайных величин с нулевым математическим ожиданием при фиксированном значении одной дисперсии $\sigma_1^2=1$ изменяющимся значением σ_2^2 . Объем экспериментальных выборок $n=50$. Результаты эксперимента занесены в таблицу 3.

Таблица 3

$\sigma_2 \backslash \sigma_1$ Критерий	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
Анасари-Бредли	0,841	0,777	0,72	0,644	0,61	0,544	0,484	0,435	0,392	0,357	0,311
Клотца	0,693	0,68	0,629	0,566	0,453	0,371	0,322	0,276	0,196	0,162	0,147

Из графиков и таблиц видно, что критерий Анасари-Бредли обладает высокой эффективностью распознавания различия масштабов (0,96) и не теряет своих свойств распознавания даже для коррелированных выборок, с коэффициентом корреляции не превышающим 0,7. Критерий Клотца обладает высокой эффективностью. Распознаёт разницу в масштабах 0,1 с величиной ошибки первого рода до 0,08. Но, не пригоден для коррелированных выборок, или выборок с различными законами распределения вероятностей.

Выводы

1. Непараметрические критерии масштаба целесообразно использовать только в тех случаях, когда заранее известно, что изменяется только параметр масштаба. А исследуемые выборки имеют одинаковое математическое ожидание, но величина его не влияет на эффективность работоспособность критериев.

2. В результате проведения вычислительных экспериментов установлено, что в случае корреляции исследуемых выборок непараметрические критерии масштаба теряют эффективность.

3. Критерии масштаба являются случайной величиной и моделью их статистических закономерностей может служить нормальный закон распределения при сравнении как однородных, так и неоднородных выборок измерений.

4. Для неоднородных выборок величина математического ожидания нормального закона (для критериев Анасари-Бредли, Камата,

Сижела-Тьюки и Кейпена) линейно зависит от степени разности масштабов исходных выборок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика/ А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2006. – 816 с.
2. Горбунова А.А., Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б. Критерии проверки гипотез об однородности дисперсий при наблюдаемых законах, отличных от нормальных. – Материала X международной конференции «Актуальный проблем электронного приборостроения» АПЭП – 2010. Т.6, Новосибирск, 2010. – с. 36-41.

СОДЕРЖАНИЕ

Бабенко Ю.В., Михалёв А.И., Кирия Р.В.

Моделирование работы систем конвейерного подземного транспорта с бункерами 3

Гвоздева И.М., Демиров В.В.

Моделирование динамических процессов в автономной электроэнергетической системе при асинхронном режиме работы одного из синхронных генераторов 10

Деренг Е.В.

Математические модели трендов изменения состояния сложных технических объектов в долговременной эксплуатации 21

Заспенко А.С., Низяев К.Г., Молчанов Л.С., Бойченко Б.М., Стоянов А.Н., Синегин Е.В.

Математическая модель изменения глубины ванны в процессе эксплуатации кислородных конвертеров малой емкости 28

Иващенко В.П., Тимошкин А.И.

О необходимых и достаточных условиях 2-проверяемости одновыходных функциональных элементов относительно кратных константных неисправностей на входах и выходе 34

Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В.

Экспериментальные исследования динамических характеристик макета двухмассовой электромеханической системы с анизотропными регуляторами при многокритериальном синтезе . 40

Поляков М.А., Ларионова Т.Ю.

Теоретико-множественная модель функциональной структуры удаленной лаборатории для обучения проектированию систем управления 48

Дмитрієва І.С., Левченко Д.О.

Дослідження кінематичної моделі маніпуляційного роботу 57

Дубовик Т.Н., Алпатова И.А.

Когнитивные модели с параметрической адаптацией к характеристикам личности. Методический аспект. Часть 1 63

Кириченко Л.О., Кобицкая Ю.А., Стороженко А.В.

Использование вейвлет-характеристик временных рядов в экспертной системе 72

Луковцев В.С.

Обобщенный параметр контроля режимов работы технических объектов 79

Мазуренко В.Б.

Использование информации об углах наклона платформы при обработке данных измерений уровня жидкого топлива дискретным фильтром Калмана 85

Моисеенко С.В.

Сравнительный анализ методов решения систем линейных алгебраических уравнений для уравнений эллиптического типа..... 97

Никулин С.Л., Коробко О.В.

Исследование методов предварительной обработки космических снимков для повышения качества выделения границ природных объектов 107

Островська К.Ю.

Розробка розширення підрахунку «Втраченого часу» в Internet 117

Шварцман Л.Я., Троценко Э.А., Баженов Е.В.

Выбор конструктивных решений Siemens-реактора на основании моделирования газодинамических потоков 124

Федорович А.И.

Исследование непараметрических критериев масштаба в задачах неразрушающего контроля 132

РЕФЕРАТЫ

УДК 622.647.2

Бабенко Ю.В. **Моделювання роботи систем конвеєрного підземного транспорту з бункерами** / Ю.В. Бабенко, А.И. Михалёв, Р.В. Кирия // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.3 - 9.

На підставі теоретичних розрахунків роботи системи підземного транспорту деревовидної структури з аккумуляючими бункерами була розроблена імітаційна модель її роботи. В результаті дана імітаційна модель дозволяє проводити моделювання роботи систем підземного транспорту при різних вхідних параметрах, що дозволяє більш детально дослідити процес її роботи. Отримано значення пропускної здатності систем конвеєрного транспорту та проведено порівняння цих результатів з імітаційним моделюванням.

Бібл. 7, іл.5.

УДК 629.12

Гвоздева І.М, Деміров В.В. **Моделювання динамічних процесів в автономній електроенергетичній системі при асинхронному режимі роботи одного з синхронних генераторів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.10 - 20.

У роботі досліджені динамічні процеси в автономній електроенергетичній системі, що виникають при переході одного з паралельно працюючих генераторів в асинхронний режим. Для створення математичних моделей використовуються відомі рівняння Парка-Горева. Вирішено завдання імітаційного моделювання динамічних процесів в електроенергетичній системі контейнеровозу MSC Japan.

Бібл. 8, іл. 7.

УДК 004.942

Деренг Є.В. **Математичні моделі трендів зміни стану складних технічних об'єктів в довготривалій експлуатації** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.21 - 27.

У роботі пропонується підхід до сумісного трендовому контролю і аналізу часових рядів, утворених параметрами реєстрації стану складних технічних об'єктів в їх тривалій експлуатації. Пропонований підхід заснований на формуванні діагностичної моделі у вигляді поліноміальної апроксимації взаємозалежностей вимірюваних вихідних змінних в усталених режимах і виділенні відхилень від вказаної моделі. Для отриманих багатовимірних масивів відхилень вирішується завдання на власні числа і власні вектори відповідних кореляційних масивів, що дозволяє послідовно використовувати відомі методи сингулярного спектрального аналізу і трендового контролю. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для пропонованого підходу.

Бібл. 11, іл. 2.

УДК 669:18620.9

Заспенко А.С., Нізяєв К.Г., Молчанов Л.С., [та ін.] **Математична модель змінення глибини вани в процесі експлуатації кисневих конвертерів малої ємності** / Заспенко

А.С., Нізяєв К.Г., Молчанов Л.С., [та ін.] // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.28 - 33.

Стаття присвячена актуальній проблемі аналізу геометричних параметрів робочого простору кисневого конвертера в ході експлуатації. У ній представлена математична модель залежності глибини конвертерної ванни від тривалості експлуатації конвертера. Отримана модель базується на статистичних даних про середню швидкість руйнування вогнетривкої футеровки в кисневих конвертерах.

Бібл. 13, іл. 2.

УДК 519.714

Іващенко В.П., Тимошкін А.І. **Про необхідні і достатні умови 2-перевірюваності одновихідних функціональних елементів відносно кратних константних несправностей на входах і виході** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.34 - 39.

Ставиться проблема існування перевіряючого тесту довжини 2 для функціональних елементів відносно константних несправностей їх входів і виходів. Проблема розглядається відносно одновихідних функціональних елементів. Отримані необхідні і достатні умови існування перевіряючого тесту довжини 2 для одновихідних функціональних елементів відносно кратних константних несправностей на їх входах і виході.

Бібл. 10.

УДК 621.3.076

Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Коломієць В.В., Хоменко В.В. **Експериментальні дослідження динамічних характеристик макета двомасової електромеханічної системи з анізотропійними регуляторами при багатокритеріальному синтезі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.40 - 47.

Розроблено методику експериментального дослідження синтезованих систем з анізотропійними регуляторами на стенді двомасової електромеханічної системи. Багатокритеріальний синтез анізотропійних регуляторів виконаний на основі стохастичних мультиагентних алгоритмів оптимізації роєм часток. Експериментально підтверджено адекватність розроблених математичних моделей і правильність результатів теоретичних досліджень методу синтезу анізотропійних регуляторів на стенді двомасової електромеханічної системи з пружним зв'язком між виконавчим двигуном і робочим органом. Встановлено, що за допомогою анізотропійних регуляторів швидкості вдалося підвищити швидкодію експериментальної установки і зменшити помилку регулювання при випадковій зміні моменту навантаження в порівнянні з системою регулювання швидкості з типовими регуляторами. Для керування об'єктами зі змінними параметрами можна використовувати анізотропійний регулятор і анізотропійний спостерігач, синтезовані тільки для одного центрального об'єкта керування, що підтверджує їх слабку чутливість до зміни параметрів об'єкта керування. Показано, що за допомогою синтезованих систем вдається зменшити чутливість синтезованої системи в порівнянні з оптимальними системами, зокрема, зміна моменту інерції об'єкта керування в широкому діапазоні не приводить до істотної зміни

динамічних характеристик синтезованих систем, які замкнуті анізотропійними регуляторами.

Бібл. 17, іл. 4.

УДК 621.314

Поляков М.О. Ларіонова Т.Ю. **Теоретико-множинна модель функціональної структури удаленної лабораторії для навчання проектуванню систем керування** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.48 - 56.

Дистанційна лабораторія розглядається як система інтегруюча локальні системи, які реалізують окремі аспекти педагогічних сценаріїв віддаленого навчання проектуванню. Ці системи деталізовані до рівня об'єкта керування, керуючого блоку, їх зв'язків між собою і з зовнішнім середовищем. Показана ієрархічність локальних систем.

Бібл. 4.

УДК 004.896:621.865

Дмитриева И.С., Левченко Д.А. **Исследование кинематической модели манипуляционного робота** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.57 - 62.

Работа посвящена исследованию построения кинематической модели манипуляционного робота. Рассматривая систему манипулятора робота, с помощью процедуры Денавита-Хартенберга, записаны кинематические уравнения.

Библ. 4, ил. 2, табл. 1.

УДК 004.94+001:372.82

Дубовик Т.Н., Алпатова И.А. **Когнитивные модели с параметрической адаптацией к характеристикам личности. Методический аспект. Часть 1** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.63 - 71.

Статья посвящена решению актуальной задачи: повышения качества образования путем создания когнитивной модели с параметрической адаптацией. Данная модель представлена в форме регрессионного уравнения, которое связывает между собой показатели усвоения изучаемого материала с характеристиками личности Адаптация модели осуществляется применительно к процессу изучения учебных дисциплин, определенных учебной программой специальности "специализированные компьютерные системы".

Библ. 6.

УДК 519.2:004.9

Кіріченко Л.О., Кобицька Ю.О., Стороженко О.В. **Використання вейвлет-характеристик часових рядів у експертній системі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.72 - 78.

У роботі проведено порівняльний аналіз вейвлет-характеристик детермінованих хаотичних та випадкових самоподібних ралізацій. Показано, що спектр вейвлет-енергії та вейвлет-ентропія відображають характерні особливості фрактальної та кореляційної

структури реалізацій. Використання вейвлет-характеристик як знання для експертної системи дає можливість розрізняти часові ряди, які володіють фрактальними властивостями.

Бібл.9, рис. 2, табл.1.

УДК 621.311: 629.5.004.

Луковцев В.С. **Узагальнений параметр контролю режимів роботи технічних об'єктів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.79 - 84.

Розглядається питання застосування узагальненого параметра для оцінки технічних об'єктів під час роботи. Запропоновано нове математичне вираження узагальненого параметра, що позбавлене недоліків всіх відомих математичних виразів узагальненого параметра, а також дозволяє найбільш ефективно оцінювати запас функціональної надійності режиму технічного об'єкта.

Бібл. 3, іл. 1

УДК 681.128+681.518.22

Мазуренко В.Б. **Використання інформації про кути нахилу платформи при обробці даних вимірювань рівня рідкого палива дискретним фільтром Калмана** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.85 - 96.

Запропоновано метод зменшення похибки вимірювання рівня палива в баках ракети-носія, встановленої на платформі, що хитається, і побудований дискретний фільтр Калмана, який дозволяє проводити оцінку рівня заправленого палива на основі показань бортового датчика рівня та інформації про поточні кути нахилу платформи, що є реалізацією запропонованого методу.

Бібл. 5, іл. 1.

УДК 519.6

Моїсеєнко С.В. **Порівняльний аналіз методів розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь для рівнянь еліптичного типу** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.97 - 106.

Представлено огляд ітераційних методів розв'язання розріджених систем лінійних алгебраїчних рівнянь великої розмірності. Проведено порівняльний аналіз методів розв'язання СЛАР. Показано, що метод узагальнених мінімальних нев'язок (GMRES) для розріджених матриць має високу обчислювальну ефективність при розв'язанні задач еліптичного типу з погано обумовленою матрицею.

Бібл. 5, іл. 4.

УДК 528.8

Нікулін С.Л., Коробко О.В. **Дослідження методів попередньої обробки космічних знімків для підвищення якості виділення границь природних об'єктів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.107 - 116.

Досліджується ефективність застосування низки методів обробки зображень при вирішенні задачі виділення лінійних зон і контурів майданних об'єктів на космічних знімках різного розрізнення. Експериментально показано, що поліпшення якості виділення лінійних зон і контурів може бути досягнуте шляхом попередньої обробки знімків методом контрастно-обмеженого адаптивного вирівнювання гістограми.

Бібл. 6, іл. 1, табл. 4.

УДК 330.46

Островская К.Ю. **Разработка расширения подсчета «Потерянного времени» в Internet** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.117 - 123.

Разработано расширения для Google Chrome для подсчета «Потерянного времени» в Интернет. Это расширение подсчитывает время, проведенное на сайтах с возможностью определения посещенных сайтов по категориям: полезное время, или потерянное время.

Библ. 2, рис. 2.

УДК 621.315.592.2 : 004.942

Шварцман Л.Я., Троценко Е.А., Баженов Е.В. **Вибір конструктивних рішень siemens-реактора на основі моделювання газодинамічних потоків** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.124 - 131.

Виконано моделювання температури поверхні перемички U-образного блоку полікристалічного кремнію в «Siemens-Реакторі» - для різних схем подачі ПГС. Аналіз даних показав наявність об'єктивних причин тріщинообразування в блоках перемички.

Бібл. 4.

УДК 620.179

Федорович А.И. **Дослідження непараметричних критеріїв масштабу в задачах неруйнівного контролю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (98). - Днепропетровск, 2015. - с.132 - 138.

Одним із способів підготовки даних для підтримки прийняття рішення про однорідність об'єктів, в умовах повної невизначеності про природу вимірювань, є критерії непараметричної статистики. Ці критерії доцільно використовувати коли апіорі відомо, що досліджувані вибірки мають однакові зрушення. Шляхом проведення обчислювальних експериментів досліджено можливість застосування критеріїв непараметричної статистики масштабу для вибірок з різними (симетричними і асиметричними) законами розподілу ймовірностей. А так же ефективність їх для розпізнавання різниці масштабів. Вплив на результати обсягу вхідних даних та їх кореляційні властивості.

Бібл.2, іл.2.

UDK 622.647.2

Babenko Yu. **Modeling of functioning of mines conveyer transport systems with hoppers** / Yu.Babenko, A.Mikhalyov, R. Kiriya // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.3 - 9.

Based on the analytical calculations of the system of underground transport tree structure with storage bins we developed simulation model of its work. As a result of this simulation model allows to simulate underground transport systems with different input parameters, allowing a more detailed study of the process of its work. We obtained the values of the capacity of conveyor transport system and a comparison of these results with simulations.

Refs. 7, ill. 5.

UDK 629.12

Gvozdeva I.M., Demirov V.V. **Modelling of dynamic processes in the off-line electro-energy system at the asynchronous operating regime of one of synchronous generators** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.10 - 20.

Dynamic processes in the off-line electroenergy system at transition of the one of parallel operating generators to the asynchronous regime are investigated in this paper. For mathematical models creation the known Park-Gorev's equations are used. The problem of simulation of dynamic processes in the electroenergy system of container carrier MSC Japan is solved.

Bibl. 8, il. 7.

UDK 004.942

Dereng E.V. **Mathematical models of trend changes in the state of complex technical objects in the long-term operation** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.21 - 27.

In this paper we propose an approach to joint monitoring and trending analysis of time series formed parameters registration status of complex technical objects in their long-term operation. The proposed approach is based on the formation of diagnostic model in the form of polynomial approximation interdependencies measured output variables in steady-state conditions and the allocation of deviations from this model. For multidimensional arrays deviations obtained to solve the problem on eigenvalues and eigenvectors corresponding correlation arrays, which allows consistent use of well-known methods singular spectrum analysis and trend monitoring. Developed software and algorithmic support for the proposed approach.

Bibl. 11, il. 2.

UDC 669:18620.9

Zaspenko A.S., Nizjaev K.G., Molchanov L.S., [et al.] **Mathematical model of change of bath depth during operation of small capacity basic oxygen converter** / Zaspenko A.S., Nizjaev K.G., Molchanov L.S., [et al.] // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.28 - 33.

The article describes the actual problem of analysis of workspace geometrical parameters of BOF during operation. It presents a mathematical model of dependence of the con-

verter bath depth on the duration of operation of the converter. The resulting model is based on statistical data on the average rate of destruction of the refractory lining in BOF.

Ref. 13, fig. 2.

UDK 519.714

Ivashchenko V.P., Timoshkin A.I. **About necessary and sufficient conditions of testability for one-bit output functional elements in respect of multiple stuck-at faults on their inputs and output** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.34 - 39.

The problem of the existence of fault detection test of the length of two for functional elements in respect of stuck-at faults on their inputs and outputs is raised. This problem is considered in respect of one-bit output functional elements. The necessary and sufficient conditions for the existence of fault detection test of the length of two or two-testability for one-bit output functional elements in respect of multiple stuck-at faults on their inputs and output have been obtained.

Ref. 10.

UDC 621.3.076

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. **Experimental studies of dynamic characteristics of two-mass electromechanical system prototype with anisotropic regulators at multicriterion synthesis** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.40 - 47.

The technique of an experimental study of the synthesized systems with anisotropic regulators on two-mass electromechanical system prototype. Multicriteria synthesis of anisotropic regulators made on the basis of stochastic multi-agent particles swarm optimisation algorithms . Experimental confirmation of the adequacy of the developed mathematical models and validity of the method of synthesis of theoretical studies anisotropic regulators for two-mass electromechanical system prototype with elastic coupling between the motor and the executive body of work. It was found that by using anisotropic speed regulators failed to improve the performance of the experimental setup and reduce the error control for random change of load torque compared to the control system with speed controller types. To manage objects with variable parameters, you can use anisotropic controller and anisotropic observer synthesized only one central control object, which confirms their low sensitivity to changes in the parameters of the control object. It is shown that by using systems synthesized possible to reduce the sensitivity of the system as compared synthesized with optimal systems in particular, the change of moment of inertia of the control object in a wide range does not significantly change the dynamic characteristics of the synthesized systems that are closed anisotropic regulators.

Bibl. 17, il. 4.

UDC 621.314

Poliakov M. A., Larionova T.Y. **Set-theoretic Model of the Functional Structure of Remote Laboratory for Learning** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.48 - 56.

Remote laboratory is considered as a system integrated particular systems that implement certain aspects of teaching distance learning scenarios of engineering design. These

systems are detailed to the level of the control object, the control unit, and their relations with each other and with the environment. The hierarchy of separate systems is shown.

Bibl. 4.

UDC 004.896:621.865

Dmitrieva I.S., Levchenko D.A. **Investigation of the kinematic model of the manipulation robot** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.57 - 62.

Paper is devoted to the construction of the kinematic model of the manipulation robot. Considering the system of manipulator robot, using the procedure Denavit-Hartenberg, write down the kinematics equations.

Bibl. 4.

UDC 004.94+001:372.82

Dubovik T.N., Alpatova I.A. **Cognitive models with parametric adaptation to the characteristics of the individual. Methodological aspect. Part 1** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.63 - 71.

This paper is devoted to solving urgent problems: improving the quality of communication and through the establishment of a cognitive model with parametric adaptation. This model is presented in the form of a regression equation that relates the performance of mastering the studied material with the characteristics of the individual model adaptation is carried out in relation to the process of studying the discipline, determination of the curriculum specialty "Specialized computer systems".

Bibl. 6.

UDC 519.2:004.9

Kirichenko L.O., Kobyt'ska Yu.O., Storozhenko O.V. **Using the wavelet characteristics of time series in the expert system** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.72 - 78.

In this paper comparative analysis of wavelet characteristics of deterministic chaotic and random self-similar implementations was carried out. It is shown that the spectrum of the wavelet energy and wavelet entropy reflects features of fractal and correlation structure of realization. Using the wavelet characteristics as knowledge for expert system allows distinguish time series that have fractal properties.

Ref.9, fig. 2, tab.1.

UDC 621.311: 629.5.004.

Lukovtsev V.S. **Generalized parameter control modes of technical objects** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.79 - 84.

The application of the generalized parameter for the assessment of technical objects during operation. A new mathematical expression of the generalized parameter avoids the disadvantages of all known mathematical expressions of generalized parameters allowing most effectively assess the functional reliability of supply mode of the technical object.

Bible. 3, il. 1.

UDC 681.128+681.518.22

Mazurenko V.B. **Using of information about platform rotation angles at data processing performed by Kalman filter for liquid propellant level measuring** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.85 - 96.

It is proposed a method to decrease inaccuracy of propellant level measurement in tanks of a launch vehicle installed on swinging platform as well as it is designed a discrete Kalman filter that permits to make estimation of filling level on the base of onboard level sensor data and information about current angles of platform inclination, and this is an implementation of the method.

Ref. 5, fig. 1.

UDC 519.6

Moiseenko S.V. **Comparative analysis of methods for solving systems of linear algebraic equations for elliptic equations** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.97 - 106.

Overview of iterative methods for solving sparse systems of linear algebraic equations of high dimensionality was provided. A comparative analysis of methods for solving linear algebraic equation was performed. It is shown that the method of generalized minimal residual (GMRES) for sparse matrices has high computational efficiency for solving problems of elliptic type with an ill-conditioned matrix.

Bible. 5, il. 4.

UDC 528.8

Nikulin S.L., Korobko O.V. **Research of methods of satellite images preliminary processing for improvement of quality of natural objects borders allocation** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.107 - 116.

Efficiency of using of a number of images processing methods for solution of a problem of linear zones and contours of areal objects allocation at satellite images of various resolution is investigated. It is experimentally shown that improvement of quality of linear zones and contours allocation can be reached by preliminary processing of pictures by method of Contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE).

Bibl. 6, fig. 1, tabl. 4.

UDC 330.46

Ostrovskaya K.Y. **Developing extensions counting "Lost Time" on the Internet** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.117 - 123.

Developed by extension for Google Chrome to calculate the "Lost time" in the Internet. This extension counts the time spent on the site to determine the sites visited by category: useful time or time lost.

Bible. 2, fig. 2.

UDC 621.315.592.2 : 004.942

Shvartsman L.Y., Trotsenko E.A., Bazhenov E.V. **Choosing of design solutions of Siemens-reactor based on the modelling of gas dynamic streams** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.124 - 131.

The modelling of the temperature of jumper surface of aU-for med polycrystal linesiliconblock in the «Siemens-reactor» was carried out for various schemes of the addition of mixed sand and gravel. The data analysis revealed objective reasons of crack formation in the jumper blocks.

Bibl. 4.

UDC 620.179

Fedorovich A.I. **The study nonparametric scale NDT tasks** // System technologies. N 3(98) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.132 - 138.

One way to prepare data for decision support to the uniformity of objects in complete uncertainty about the nature of the measurement criteria are nonparametric statistics. These criteria should be used when it is known a priori that the sample studied have the same signs. By conducting computational experiments investigated the possibility of applying the criteria of nonparametric statistics scale for samples with different (symmetric and asymmetric) probability distribution law. As well as their effectiveness for detecting the difference magnitude. Results Effect on amount of input data and the correlation of their properties.

Bibl.2, ill.2.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Кирия Руслан Виссарионович - к.т.н., ст. научн. сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Михалев Александр Ильич - д.т.н, профессор, заведующий кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Бабенко Юлия Васильевна - ассистент кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Гвоздева Ирина Маратовна - профессор Одесской национальной морской академии, г. Одесса.

Демиров Владислав Викторович - магистр Одесской национальной морской академии, г. Одесса.

Деренг Евгения Владимировна - аспирантка Института проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины.

Заспенко Андрей Сергеевич - аспирант, Национальная металлургическая академия Украины.

Низяев Константин Георгиевич – д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Молчанов Лавр Сергеевич – к.т.н., ассистент кафедры металлургии стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Бойченко Борис Михайлович - доктор технических наук, зав. кафедры металлургии стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Стоянов Александр Николаевич – к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, Национальная металлургическая академия Украины.

Синегин Евгений Владимирович - ассистент, Национальная металлургическая академия Украины.

Иващенко Владимир Петрович - д.т.н., проф., первый проректор Национальной металлургической академии Украины.

Тимошкин Андрей Иванович - к.ф.-м.н., доцент, кафедра прикладной математики и вычислительной техники, Национальная металлургическая академия Украины.

Кузнецов Борис Иванович - д.т.н., проф., заведующий отделом проблем управления магнитным полем Института технических проблем магнетизма.

Никитина Татьяна Борисовна - д.т.н., профессор кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Коломиец Валерий Витальевич - канд. техн. наук, доц., директор учебно-научного профессионально-педагогического института Украинской инженерно-педагогической академии.

Хоменко Виктор Витальевич - аспирант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Поляков Михайло Олексійович - к.т.н., доцент кафедри електричних та електронних апаратів ЗНТУ.

Ларіонова Тетяна Юрївна - асистент кафедри електричних та електронних апаратів ЗНТУ, аспірант ЗНТУ.

Дмитрієва І.С. - к.т.н., доц., Національна металургійна академія України.

Левченко Д.О. - магістр, Національна металургійна академія України.

Дубовик Т.Н. - старший преподаватель кафедры специализированных компьютерных систем, ГВУЗ "УДХТУ", г. Днепропетровск.

Алпатова И.А. - врач городская больница № 17, г. Днепропетровск.

Кириченко Людмила Олеговна – д.т.н., профессор кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Кобицкая Юлия Александровна – аспірант каф. прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Стороженко Александра Владимировна – к.т.н., доцент каф. экономической кибернетики Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Луковцев Валерий Сергеевич – к.т.н., доцент, Одесская национальная морская академия, декан факультета электромеханики и радиоэлектроники.

Мазуренко Валерий Борисович - Государственное предприятие «Конструкторское бюро „Южное“ имени М. К. Янгеля», начальник отдела.

Моисеенко Светлана Викторовна - к.т.н., доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

Нікулін Сергій Леонідович - д.геол.наук, професор Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», кафедра геоінформаційних систем.

Коробко Ольга Валеріївна - здобувач, асистент Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», кафедра геоінформаційних систем.

Островская Екатерина Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры Информационных технологий и систем, НМетАУ.

Баженов Євгеній Васильович - к.т.н., технический директор ООО «Солнечные Стандартные Решения».

Троценко Едуард Анатольевич - генеральный директор INFOCOM LTD (Ukrainian Siemens Partner).

Шварцман Леонид Яков - к.т.н., научный руководитель компании SILIDO.

Федорович Анна Игоревна - преподаватель кафедры Радиоэлектронной автоматики, физико-технического факультета, Днепропетровского национального университета им. О. Гончара.