ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 1 (9) 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Гарькина И. А., Данилов А. М., Лапшин Э. В., Юрков Н. К. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения 3

Щербань А. Б., Братцев К. Е., Жашкова Т. В., Михеев М. Ю. Обобщенные структурные модели информационных объектов 12

Пальченков Ю. Д. Основы теории вычислимых функций действительных переменных в проектировании непрерывно-дискретных вычислительных систем и нейронных сетей 23

Абрамов О. В. Параллельные алгоритмы расчета и обеспечения параметрической надежности 31

Никонорова О. А. Оценка эффективности алгоритма прогноза землетрясений по приливным вариациям силы тяжести 40

Алмаметов В. Б., Затылкин А. В., Граб И. Д., Зияутдинов В. С., Щербакова С. В. Методология формирования профессиональных навыков в интеллектуальной компьютерной системе обучения с внешним объектом изучения 48

Аванский С. М., Щербакова С. В. Построение интеллектуальной компьютерной обучающей системы с применением нейронных сетей 55

Воробьев Г. А., Малыш В. Н. Методика оценки семантической сложности графовых моделей учебных элементов 62

Мещеряков В. А., Суровицкая Г. В., Чугунова В. В. Факторный анализ данных самооценки университета 72

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Михеев М. Ю., Юрманов В. А., Куц А. В. Совершенствование алгоритмов и структур интегрирующих аналого-цифровых преобразователей 86

Якимов А. Н., Яковлев С. А. Построение каркасной модели криволинейной антенны 100

Балуков О. Н., Якимов А. Н. Построение геометрической модели антенны с использованием триангуляции Делоне 109

Алексеева В. В., Скаморин Д. А. Метод компенсации температурной погрешности коэффициента преобразования прецизионных акселерометров 118

Воронов А. П., Недорезов В. Г., Юрков Н. К. Математические модели амплитудных и амплитудно-частотных характеристик вакуумного емкостного делителя высоких высокочастотных напряжений 125

Клевцова Т. В. Методы обнаружения скрытых дефектов в навигационных системах 134

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Гущина А. А., Кемалов Б. К., Лапшин Э. В. Неклассические функционалы и принцип минимума функционала обобщенной работы..... 142

Савицкий В. Я., Сухорукова И. А., Сухоруков И. В. Модернизация уплотнительных устройств в рамках *CAE*-технологий..... 151

Ефимова Е. А. Сравнительный анализ создания имитационной модели пропускной способности городской транспортной сети 163

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.7; 681.5.01; 691

И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков

СИСТЕМНЫЕ МЕТОДОЛОГИИ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ: ПРОМЫШЛЕННЫЕ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ*

Аннотация. Рассматриваются промышленные и аэрокосмические приложения системных методологий, теорий идентификации систем и управления, исходя из единой концепции проектирования сложных технических систем: авиакосмические тренажеры для подготовки операторов, разработка и управление качеством материалов специального назначения, анализ экологической опасности от деятельности объектов по хранению и уничтожению химического оружия.

Ключевые слова: идентификация систем, теория управления.

Abstract. From the point of view of joint concept of complex technical systems' design (creation of flight simulators for training of personnel, development and quality management of special-purpose materials, analysis of environmental consequences caused by stores of chemical weapons) the industrial and aerospace applications of system methodology, system identification theory and control theory are considered.

Keywords: system identification, control theory.

Введение

В рамках создания «единой геометрической теории управления» и «теории структур управления» А. Г. Бутковский сформулировал два общих принципа в рамках их общефилософского и методологического осмысления [1, 2]:

– «принцип (закон) 100 % эффективности математики»

– «управленческую парадигму Мира».

Под идентификацией в широком смысле предлагается понимать выработку точного *языка* описания реальности и соответствующих *понятий* и *категорий*, т.е. понятий крайне высокого, насколько это возможно, уровня. Сложность понятий – цена за простоту языка описания реальности, ее «законов». Наблюдаемая реальность («Мир») рассматривается как одна большая система многосвязного регулирования.

В каждый конкретный исторический период могут быть недостаточными ресурсы для получения с заданной точностью нужного для решения практической проблемы описания реальности. Возникает необходимость использования присущих только человеку способностей в процессе управления. Бо-

* Выполнена при поддержке гранта Президента РФ (гос. рег. № 01200609111) и по заказу Минобразования и науки РФ (гос. рег. № 01200850940).

лее того, любая система или непосредственно (в явном виде) содержит человеческий фактор, или является элементом системы, которая содержит человеческий фактор подобным образом. Следовательно, *любая эффективная методология идентификации должна включать процесс человеческого выбора*, т.к. именно в результате выбора вырабатывается текущее управление процессом идентификации.

1 Описание и постановка задач

Нижеуказанный подход используется при решении задач идентификации в весьма *разных* областях приложений:

– разработка и управление качеством материалов специального назначения [3];

– разработка авиакосмических тренажеров для подготовки операторов [4];

– анализ экологической опасности, возникающей в связи с деятельностью объектов по хранению и уничтожению химического оружия [5,6].

Работы выполнены по заданиям министерств, Российской академии архитектуры и строительных наук, по Федеральной программе уничтожения химического оружия в соответствии с межведомственными программами сотрудничества и Международной конвенцией.

Во *всех* рассматриваемых задачах в *иерархической структуре критериев* эффективности системы на верхнем (*первом*) уровне находятся: полезность системы (выходные характеристики, важность, актуальность, перспективность, область применения – критерии *второго* уровня); качество функционирования (помехозащищенность, точность, надежность, чувствительность, качество управления); организация системы (совершенство структуры, сложность и т.д.); эволюционная эффективность (осуществимость, ресурсы, возможности модификаций и другие характеристики развития); экономическая эффективность.

Декомпозиция системы продолжается до тех пор, пока на нижнем уровне не будут получены элементы, принадлежащие разработанным типам, или сформулированы задачи создания необходимых элементов [7].

Зависимости между критериями выявлялись методами факторного анализа и математической статистики и др.; они представляют собой эмпирические закономерности или получаются на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов.

Иерархические структуры системы с оценками ее элементов строились в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач (являются основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем).

При синтезе материалов специального назначения, связанном с выбором рецептуры, технологии и способов управления качеством, использовались различные способы оптимизации параметров системы, в том числе *векторная* оптимизация [3].

Неопределенность целей преодолевалась путем использования линейной свертки, введения некоторых контрольных показателей, построения множеств Парето и т.д.

При участии в процессе управления человека-оператора, как в случае авиационных тренажеров (АТ), задача осложнялась трудностями формализа-

ции деятельности оператора по управлению объектом, оценки переноса навыков управления с АТ на летательный аппарат (ЛА) и т.д.

2 Методы решения задач

При разработке **единой концепции проектирования сложных управляемых в пространстве технических систем** решается комплекс взаимосвязанных задач:

– формализуется понятие управляющих движений оператора;

– определяются параметры управляющих движений летчика как непрерывного, дискретного, импульсного процессов, потока заявок, временного ряда и др.;

– разрабатываются функционалы качества, позволяющие операторам дать объективную оценку пилотажных характеристик самолета;

– определяются связи между техническими параметрами объекта и функционалами качества;

– с точки зрения формирования у обучаемых требуемых навыков пилотирования разрабатывается методика и выбирается структура авиационных тренажеров;

– осуществляется синтез и настройка параметров различных видов АТ;

– даются методы выбора параметров вычислительного цикла с учетом влияния временного запаздывания в имитаторах, динамических характеристик ЛА и др.;

– разрабатываются методы решения аппроксимационных задач для подготовки баз данных и т.д.

В связи с быстрым ростом стоимости тренажеров, трудностями их перенастройки и модернизации использовалась основная концепция последнего десятилетия – *модульность конструкции и программно-математического обеспечения* [8].

На *первом уровне иерархии* находятся комплексные авиационные тренажеры (КТС), *на втором* – специализированные (штурманский, бортинженера и др.), представляющие конструктивно законченные изделия, состоящие из модулей (*третий уровень*). Предусматривается возможность любого объединения модулей, например в тренажер для отработки слепого полета (без имитации визуальной обстановки), в штурманский тренажер или тренажер бортинженера, в тренажер для оператора бортовых систем и т.д.

Синтез АТ осуществлялся *из условий адекватности* управляющих воздействий оператора при управлении летательным аппаратом и на АТ. При синтезе *имитатора динамики полета* ЛА с уравнением движения вида $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f}(t)$, где $\mathbf{x}$, $\mathbf{u}$, $\mathbf{f}(t)$ – соответственно векторы фазовых координат, управляющих и возмущающих воздействий, использовался функционал следующего вида:

$$\Phi_0(S) = \frac{a}{\max\limits_i |\alpha_i|} + b\max_i \left|\frac{\beta_i}{\alpha_i}\right| + c\max_i |\beta_i| + \frac{d}{\max\limits_i |\beta_i|}.$$

Здесь $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$ – собственные числа матрицы $\mathbf{A}$, a, b, c, d – весовые константы.

Области равных оценок качества строились по экспериментальным данным в виде

$$d_{k-1} \le \Phi(S) < d_k,$$

где k – класс системы; $k = \overline{1, N}$; N – балльность шкалы ($N = 10$ *для шкалы Купера–Харпера*) [4].

Качество системы тем выше, чем меньше $\Phi(S)$.

Аналогичный подход использовался и **при синтезе материалов специального назначения с регулируемыми структурой и свойствами.** Строилась *обобщенная модель* и осуществлялась *параметрическая идентификация* наиболее распространенных видов *кинетических процессов.* В большинстве случаев *кинетический процесс* $x(t)$ *представлялся как решение некоторой задачи Коши*:

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + \omega_0^2 z = 0,\ z = x - x_m,\ x(0) = x_0,\ \dot{x}(0) = \dot{x}_0;\ n^2 - \omega_0^2 \ge 0,$$

где $x_0, \dot{x}_0, x_m$ определяются видом исследуемого кинетического процесса.

В ряде случаев использовались модели четвертого порядка. Функционал качества принимался в виде

$$\Phi(S) = f\lambda_m + a\frac{1}{\lambda_m} + br + c\frac{1}{r},$$

$$\lambda_m = \min_i\{\lambda_i\},\ r = \max_i\left\{\frac{\lambda_i}{\lambda_m}\right\},$$

где $(-\lambda)_i$ – корни характеристического полинома, $\lambda_i > 0$, $i = \overline{1, k}$; f, a, b, c – весовые константы.

При решении задач **обеспечения безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия** (ОУХО) риск от тяжелых аварий на ОУХО анализировался с точки зрения медико-биологических, экономико-экологических и глобально-социальных факторов с использованием понятия «приемлемый риск». Риск от тяжелых аварий определялся в виде

$$R(P, C) = \sum_{i=1}^{k} P_i C_i,$$

где $A = (A_1, A_2, \ldots, A_k)$ – перечень событий, соответствующих тяжелым авариям; $P = (P_1, P_2, \ldots, P_k)$ и $C = (C_1, C_2, \ldots, C_k)$ – соответственно вероятности и последствия указанных аварий; $R(P, C)$ должно стремиться к минимуму; естественно $R_{\min}(P, C) = R_0 \ne 0$ (R_0 – **допустимый** или **приемлемый риск;** $R > R_0$ определяет класс недопустимого риска).

Выбор приемлемого риска производился для общего случая, когда функции $P = P(q_1, q_2, \ldots, q_n, t)$, $C = C(c_1, c_2, \ldots, c_m, t)$ являлись неизвестными.

При составлении математической модели ОУХО, выборе и обосновании типа случайного процесса, адекватно описывающего его состояние, использовались марковские цепи, диффузионные процессы, ветвящиеся процессы, случайные процессы со стационарными приращениями и т.д. Для марковских процессов, задавая переходные вероятности с использованием уравнений Колмогорова–Смолуховского–Чепмена, получали нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных относительно плотности распределения вероятностей для непрерывных случайных процессов или распределение для дискретных случайных величин. Последствие аварий $C = C(c_1, c_2, ..., c_m, t)$ отображает физико-химические изменения в окружающей среде и, как правило, находится из решений уравнений математической физики. На основе описания объекта и экологических последствий аварий получается операторное нелинейное уравнение

$$L(C, P) = R,$$

совпадающее по форме с уравнением теории упругости (R – внешняя нагрузка).

В рассматриваемом случае оно представимо в виде двух операторных уравнений:

$$L_1(R, P, C) = P,$$
$$L_2(R, P, C) = C.$$

С введением вектор-функции $X = (P, C)^{\text{т}}$ и нелинейного оператора A первое из них представится в виде операторного уравнения

$$A(R, X) = X.$$

Так как физико-химические изменения в окружающей среде должны соответствовать экологическим нормам, а вероятность возникновения аварий должна быть близка к нулю, то последнее уравнение имеет решение $X = 0$ при всех значениях риска R. При некоторых значениях R может иметь ненулевые решения, соответствующие скачкообразным изменениям (катастрофам) в экологической обстановке окружающей среды и изменению значений вероятностей аварий. Риск $R_{\text{кр}}$ назовем **критическим**, если при некоторых значениях R, близких к $R_{\text{кр}}$, это уравнение имеет малые ненулевые решения ($R_{\text{кр}}$ – точка бифуркации оператора $A(R, X)$). Таким образом, анализ безопасности ОУХО сводится к чисто математической задаче определения точек бифуркации $A(R, X)$, например, на основе линеаризации нелинейного оператора (отыскание точек бифуркации сводится к определению характеристических значений соответствующего линейного оператора). Каждое нечетнократное (в частности, простое характеристическое значение линейного оператора) является точкой бифуркации нелинейного оператора $A(R, X)$. Если характеристическое значение линейного оператора имеет четную кратность, то требуется дополнительный анализ, который сводится к конструированию так называемого поля вращения и доказательству его невырожденности.

Определение точек бифуркации нелинейного оператора значительно сложнее. Упрощения возможны, если известны функция последствий аварий или вероятность распределения. Функция последствий аварий определяется в результате расчета экологического состояния среды при заданном количе-

стве разлитого отравляющего вещества (ОВ) и необходимого времени ликвидации последствий аварий. При известном распределении вероятностей (или плотности распределения), построив случайный процесс, можно определить вероятности изменения состояния ОУХО во времени. Далее определяется значение критического риска $R_{кр}$ и значение критического риска, для которого вероятность скачкообразного изменения экологической обстановки (экологическая катастрофа) наибольшая. Система «объект–экология» является упругой. При этом наибольшая вероятность потери ее устойчивости (катастрофа) наступает при $R_{кр}$.

В качестве иллюстрации приведем составление математической модели аварий на основе марковских процессов. Анализ процессов осуществляется с использованием производящих функций $F(t,x)=Mx^{\mu(t)}$, где M – математическое ожидание.

Предполагается, что произошла тяжелая авария с разрушением помещения и авиабомб; $\mu(t)$ – число авиабомб, находящихся в зоне аварии в неразрушенном состоянии, $\mu(0)=m_0$, $\mu m\Delta t+O(\Delta t)$ – вероятность перехода $m\to(m-1)$, $\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{O(\Delta t)}{\Delta t}=0$ (за время Δt с вероятностью $\mu m\Delta t+O(\Delta t)$ разрушается одна авиабомба и происходит разлив отравляющего вещества).

Справедливо соотношение

$$\frac{\partial F(t,x)}{\partial t}=\mu(1-x)\frac{\partial F(t,x)}{\partial x}.$$

Решение этого уравнения:

$$F(t,x)=\psi\left(t-\frac{1}{\mu}\ln(1-x)\right),$$

где ψ – функция, определяемая из начального условия

$$F(0,t)=\psi\left(\ln(1-x)^{-\frac{1}{\mu}}\right)=x^{\mu(0)}=x^{m_0}.$$

Отсюда $F(t,x)=\left(1-e^{\mu t}(1-x)\right)^{m_0}$.

Дифференцируя $F(t,x)$ m раз по x и используя производящую функцию, найдем

$$P\left(\mu(t)=m\left(\mu(0)=m_0=\frac{1}{m!}F_x^{(m)}(t,0)\right)\right.\right.$$

Вероятность того, что в момент t число неразрушенных авиабомб равно m при $\mu(0=m_0)$, имеет следующий вид:

$$P(m,t)=\frac{m_0!}{m!\,(m_0-m)!}\left(1-e^{-\mu t}\right)^{m_0-m}e^{-\mu m t}.$$

Введя $m_k = m_0 - m$ (число разрушенных авиабомб в момент *t*), найдем

$$P(m_k, t) = \frac{m_0!}{m_k!\,(m_0 - m_k)!}\left(1 - e^{-\mu t}\right)^{m_k} e^{-\mu(m_0 - m_k)t},$$

что вероятностно и описывает процесс тяжелой аварии на ОУХО. Наиболее вероятное количество разрушенных в результате аварии авиабомб определится из условий экстремума:

$$m_{k\,\max} \approx \frac{3}{4} m_0, \; (\mu t)_{\max} = \ln 4 .$$

Заключение

1. *Правильность и перспективность использования приведенных методологических принципов синтеза технических систем подтвердились*:

– разработанные с использованием предлагаемой методики авиационные тренажеры согласно результатам независимой экспертизы обладают требуемыми эксплуатационными, техническими и экономическими характеристиками;

– сверхтяжелые бетоны для защиты от радиации являются конкурентоспособными на международном рынке защитных материалов (удостоены медалей РААСН (Москва, 2003) и VII Международного салона инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2007), дипломов международных выставок в Лейпциге, Лондоне, Астане, Н. Новгороде).

2. Результаты исследований по *обеспечению безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия* прошли государственную экспертизу и положены в основу проектирования ОУХО.

Список литературы

1. **Бутковский, А. Г.** К философии и методологии проблем управления / А. Г. Бутковский // Идентификация систем и задачи управления SICPRO`03 : пленарные доклады II Международной конференции (г. Москва, 29–31 января 2003 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2003.
2. **Прангишвили, И. В.** SICPRO`03 – предварительный обзор / И. В. Прангишвили, В. А. Лотоцкий, К. С. Гинсберг, В. В. Смолянинов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO`04 : пленарные доклады III Международной конференции (г. Москва, 28–30 января 2004 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2004. – С. 109–129.
3. **Прошин, А. П.** Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемыми структурой и свойствами для защиты от радиации / А. П. Прошин, А. М. Данилов, Е. В. Королев и др. // Идентификация систем и задачи управления SICPRO`03 : пленарные доклады II Международной конференции (г. Москва, 29–31 января 2003 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2003. – С. 2437–2460.
4. **Данилов, А. М.** Методологические принципы проектирования сложных управляемых в пространстве динамических систем в приложении к разработке авиационных тренажеров / А. М. Данилов, А. Н. Анисимов и др. // Идентификация систем и задачи управления SICPRO`04 : пленарные доклады III Международной конференции (г. Москва, 28–30 января 2004 г., ИПУ РАН им. В. А.Трапезникова). – М., 2004. – С. 279–311.

5. **Еремкин, А. И.** Анализ экологической опасности от деятельности объекта по уничтожению химического оружия / А. И. Еремкин, А. П. Прошин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – Вып. 5. – Нижний Новгород, 2002. – С. 31–34.
6. **Гарькина, И. А.** Теория катастроф в решении задач безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия / И. А. Гарькина, О. А. Голованов, А. М. Данилов и др. // Вестник Волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук. – Вып. 4. – Нижний Новгород, 2000. – С. 110–115.
7. **Danilov, A.** Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / A. Danilov, E. Korolev, A. Proshin, O. Figovsky, I. Gar`kina, A. Bormotov // Scientific Israel –Technological Advantages. – 2002. – № 3 «Civil Engineering». – V. 4. – P. 36–42.
8. Авиационные тренажеры модульной архитектуры / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина и др. ; под ред. Э. В. Лапшина, А. М. Данилова. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2005. – 146 с.

Гарькина Ирина Александровна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра высшей математики,
Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства

Garkina Irina Aleksandrovna
a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
chair higher mathematics,
the Penza state university
of architecture and builing

Данилов Александр Максимович
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
высшей математики,
Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства

Danilov Alexander Maksimovich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair
of higher mathematics,
the Penza state university
of architecture and builing

Лапшин Эдуард Владимирович
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

E-mail: edlapshin@mail.ru

Lapshin Edward Vladimirovich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
chair of designing and radio
equipment manufacture,
the Penza state university

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondratevich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair of designing
and manufacture of radio equipment,
the Penza state university

УДК 519.7; 681.5.01; 691

Гарькина, И. А.

Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–11.

УДК 621.396.6

А. Б. Щербань, К. Е. Братцев, Т. В. Жашкова, М. Ю. Михеев

ОБОБЩЕННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Традиционная практика системного подхода дополняется подходом к решению задач, связанных с описанием и анализом связности элементов, идентификацией структур и подструктур, синтезом оптимальных структур, идентификацией режимов функционирования подсистем и системы в целом.

Ключевые слова: системный подход, анализ связности элементов, идентификация структур, синтез оптимальных структур.

Abstract. Traditional practice of the system approach is supplemented with the approach to the decision of the problems connected with the description and the analysis of connectivity of elements, identification of structures and substructures, synthesis of optimum structures, identification of modes of functioning of subsystems and systems as a whole.

Keywords: the system approach, the analysis of connectivity of elements, identification of structures, synthesis of optimum structures.

Введение

Термины «система», «подсистема», «структура», «моделирование», «модель» в настоящее время прочно вошли в лексикон большинства наук. Однако, несмотря на широкое применение существующих концепций системного представления, доказавших свою эффективность при решении многих проблем, сегодня испытывается дефицит методологических инструментальных средств реализации системного подхода, инвариантных относительно семантики предметной области.

Кроме традиционной практики системного подхода, заключающейся в определении параметров отдельных элементов и подсистем, организации взаимодействия между подсистемами, выборе оптимальных алгоритмов функционирования подсистем, сегодня для сложных систем необходима практика решения задач, которые в меньшей степени связаны с рассмотрением параметрических свойств, а в большей – с описанием и анализом связности элементов, идентификацией структур и подструктур, синтезом оптимальных структур, идентификацией режимов функционирования подсистем и системы в целом.

1 Анализ связности сложных структур

По мере увеличения сложности систем вопросам системной связности как комплексным общесистемным вопросам требуется все большее внимание в рамках совершенствования системного подхода. В этих условиях чрезвычайно актуальными являются задачи разработки новых методологических инструментальных средств структурного представления сложных систем, обеспечивающих реализацию системного подхода путем решения проблем анализа системной связности [1]. В качестве такого методологического инструментального средства предлагается идентификационно-структурный анализ (*IS*-анализ) как инструментальное средство реализации структурного

подхода к решению задач анализа, синтеза и управления информационными объектами на основе принципа идентификационно-структурного управления (*S*-принципа) [2].

Реализация *S*-принципа в процессе структурного подхода обеспечивается процедурами идентификации структурных моделей различных видов, которые предназначены для решения задач поиска различных видов структурных отображений структурных моделей, идентифицирующих их структурную связность. Такие задачи структурной идентификации объединены под общим названием «задачи *IS*-анализа», разработаны варианты их классификации [3]. Сформулированное понятие структурной идентификации [2] как положительное решение одной из задач *IS*-анализа определяется как нахождение одного из видов изоморфных, частично изоморфных, гомоморфных или автоморфных структурных отображений в пространствах структурных моделей. Следовательно, структурный подход и потребность в реализации *S*-принципа в первую очередь обусловливают необходимость формирования структурных моделей системного описания информационных объектов. Для решения задач *IS*-анализа необходимы структурные представления текущих и эталонных состояний и ситуаций исследуемого информационного объекта с использованием единых структурных моделей, обеспечивающих возможности разработки формализованных процедур выявления интегративных (целостных) структурных свойств моделируемых объектов с целью их идентификации. Обобщенная структурная модель и ее интерпретации в рамках конкретного математического аппарата должны обладать возможностями описания как формальных, так и параметрических структур. Под формальными структурами будем понимать структуры, описывающие обобщенные свойства связности элементов объекта (системы) без конкретизации аспекта структурного описания, т.е. семантики этой связности. Такие структуры будем в дальнейшем изложении называть синтаксическими структурами, а их обобщенные модели – обобщенными синтаксическими структурными моделями (ОСМ). Структуры, отражающие не только обобщенную связность элементов системы, но и параметры (атрибуты) элементов и связей, т.е. специфику предметной области системного описания, будем называть семантическими структурами, а обобщенные модели таких структур – обобщенными семантическими структурными моделями (ОССМ).

2 Синтез обобщенной структурной модели

Обобщенную структурную модель представим кортежем вида

$$S = \langle E, V, P, R \rangle,$$

где $E = \langle E_S, E_I \rangle$ – носитель модели; E_S – подмножество основных элементов носителя, задающих элементы (сущности) моделируемой системы на выбранном уровне глубины структурного описания; $E_I \subset I$ – подмножество вспомогательных элементов носителя, идентифицирующих элементы подмножества E_S и их связи; I – универсальное множество элементов; $V = \langle V_E, V_S \rangle$ – сигнатура модели; V_E – подмножество предикатов, задающих виды отношений на множестве $E_S \cup E_I$; V_S – подмножество предикатов,

задающих виды отношений на множестве E_S; P – синтаксические правила формирования обобщенной структурной модели; R – семантические правила формирования обобщенной структурной модели.

Подмножество E_S представляет конечное (счетное) множество элементов любой природы. Поскольку элемент является первичным понятием структуры, он выбирается таким образом и на такой глубине детализации, чтобы обеспечить решение поставленной задачи исследования структуры. На элементы структурной модели E_S не накладываются никакие ограничения в рамках ОСМ, т.к. их формирование осуществляется с помощью средств, не принадлежащих самой структурной модели.

Средства описания элементов и их отношений в рамках обобщенной структурной модели разделим на средства синтаксического описания, определяемые синтаксическими правилами P формирования ОСМ, и средства семантического описания R, определяемые семантическими правилами формирования ОССМ.

Синтаксические правила P задают формальные конструктивные процедуры, позволяющие идентифицировать элементы в множестве E, т.е. определить их принадлежность к E_S. Кроме того, синтаксические правила позволяют идентифицировать виды связей между элементами подмножества E_S, которые по аналогии с [4] назовем синтаксически правильными структурными совокупностями.

Синтаксические правила P не позволяют описать в рамках ОСМ на содержательном уровне сущности элементов структуры и видов отношений между ними. Синтаксические правила – это набор аксиом, позволяющих формально описывать в рамках ОСМ элементы структуры и множество отношений между ними, абстрагируясь от содержательного описания их качественных и количественных характеристик, определяемых предметной областью.

Синтаксические правила описания элементов ОСМ формализуем как правила формирования подмножества синтаксических предикатов:

$$V_E^P = \left\{ v_{E_1}^P, v_{E_2}^P, \ldots, v_{E_r}^P \right\}.$$

Определение 1. Подмножество основных элементов носителя обобщенной структурной модели E_S будем считать синтаксически заданным (определенным), т.е. идентифицируемым в множестве E, если на множестве $E = E_S \cup E_I$, где $E_I = \pi \cup E_I^{'}$, а $\pi \in E_I$ – некоторый элемент номинальной шкалы, задан двухместный предикат v_π, так что

$$\forall e_i \in E_S \;\; \forall e_j \in E_I^{'} \left(v_\pi^P \left(e_i, \pi \right) = 1 \;\&\; v_\pi^P \left(e_j, \pi \right) = 0 \right).$$

Введенное определение формулирует синтаксическое правило, задающее формальную процедуру описания принадлежности $e_i \in E$ подмножеству основных элементов E_S, описывающих элементы моделируемой структуры.

Определение 2. Каждый основной элемент носителя структурной модели $e_i \in E_S$ будем считать синтаксически заданным (идентифицированным) в подмножестве E_S, если на подмножестве $E_S \cup N \in E$, где $N \subset E_I$ – под-

множество элементов номинальной шкалы, задан двухместный предикат v_n^P, так что

$$\forall e_i \in E_S \;\; \forall e_j \in E \setminus N \; \exists n_k \in N \left(v_n^P\left(e_i, n_k\right) = 1 \;\&\; v_n^P\left(e_i, e_j\right) = 0 \right).$$

Приведенное определение 2 задает синтаксическое правило, согласно которому основной элемент носителя обобщенной структурной модели $e_i \in E_S$ считается синтаксически заданным, если ему поставлена в соответствие точка *N*-мерного евклидова пространства, где *N* – число заданных (сформированных) элементов моделируемой структуры.

Поскольку в соответствии с введенным определением подмножество E_S счетное, то простейшим способом синтаксического задания его элементов является формирование эквивалентного множества $N = \{1, 2, k, n\}$, т.е. множества натуральных чисел, для которого отображение $f : E_S \to N$ биективно (существует биекция E_S на N, описываемая v_n^P). Таким образом, синтаксические правила описания элементов ОСМ формализуются введением в сигнатуру модели подмножества $V_E^P = \left\{ v_\pi^P, v_n^P \right\}$.

Для описания синтаксически правильных структурных совокупностей на множестве элементов носителя ОСМ введем подмножество синтаксических предикатов $V_S^P = \left\{ v_{S_1}^P, \ldots, v_{S_i}^P, \ldots, v_{S_m}^P \right\}$ и формализуем с их помощью *i*-ю синтаксически правильную структурную совокупность на множестве E_S.

Определение 3. Подмножество основных элементов носителя ОСМ E_S, заданное с помощью $V_E^P = \left\{ v_\pi^P, v_n^P \right\}$, образует *i*-ю синтаксически правильную структурную совокупность, если на E задан двухместный предикат $v_{S_i}^P \in V_S^P$, определяющий *i*-е отношение связности между парами элементов E_S, так что

$$\forall e_p, e_q \in E_S$$

$$\forall e_k \in E_I \left[\left(v_{S_i}^P\left(e_p, e_q\right) = 1 \vee v_{S_i}^P\left(e_p, e_q\right) = 0 \right) \;\&\; v_{S_i}^P\left(e_p, e_k\right) = 0 \;\&\; v_{S_i}^P\left(e_q, e_k\right) = 0 \right].$$

Из определения 3 следует, что введение подмножества синтаксических предикатов V_S^P позволяет использовать ОСМ в качестве моделей формальных структур, состоящих из m синтаксически правильных структурных совокупностей, где m – мощность подмножества V_S^P. На подмножество V_S^P не накладывается никаких ограничений, и это подмножество определяет систему аксиом формирования синтаксически правильных структурных совокупностей [3].

Таким образом, совокупность синтаксических правил P формирования ОСМ, задаваемая в виде системы аксиом описания элементов и синтаксически правильных структурных совокупностей на множестве элементов, формализуется в виде синтаксической сигнатуры ОСМ $V^P = \left\langle V_E^P, V_S^P \right\rangle$.

Все вышеизложенное позволяет сформулировать следующее формализованное определение ОСМ.

Определение 4. Обобщенную структурную модель $S = \langle E, V, P \rangle$, построенную в виде множества синтаксически правильных структурных совокупностей с использованием исходной системы аксиом P и представленную кортежем $S_P = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, v_{S_1}^P, \ldots, v_{S_i}^P, \ldots, v_{S_m}^P \right\rangle$, назовем обобщенной синтаксической структурной моделью (ОСМ).

В процессе реализации структурного подхода, т.е. решения задач структурного анализа в соответствии с *S*-принципом, ОСМ вида $S = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, v_{S_1}^P, \ldots, v_{S_i}^P, \ldots, v_{S_m}^P \right\rangle$ предлагается использовать в качестве обобщенной структурной модели для формализации модификаций ОСМ сложных структур различных порядков сложности и инвариантных методов решения задач *IS*-анализа.

Весь класс синтаксических структур в зависимости от структурной сложности разделим на четыре подкласса:

– вырожденные синтаксические структуры (C_{-1});

– синтаксические структуры нулевого порядка сложности (C_0);

– синтаксические структуры первого порядка сложности (базовые синтаксические структуры (C_1));

– синтаксические структуры произвольного *k*-го порядка сложности (C_k).

Синтаксические структуры, в отличие от семантических, описывают нечто общее, присущее системам (совокупность элементов и их связность), имеющим различные качественные описания атрибутов элементов и видов связей.

Формализуем типы ОСМ, которые предлагаются для структурного оценивания в соответствии с *S*-принципом и соответствуют синтаксическим структурам выделенных подклассов.

Определение 5. ОСМ вида $S_p^{-1} = \langle E, v_\pi \rangle$ назовем вырожденной, а моделируемую структуру C_{-1} вырожденной синтаксической структурой.

В соответствии с введенным определением вырожденная ОСМ представлена кортежем, в котором $E = \langle E_S, \pi \rangle$ – носитель модели; E_S – подмножество основных элементов носителя, задающих элементы моделируемой системы на выбранном уровне глубины структурного описания; π – некоторый элемент номинальной шкалы; v_π – двухместный предикат, заданный так, что

$$\forall e_i \in E_S \left(v_\pi \left(e_i, \pi \right) = 1 \right).$$

Очевидно, что введенное формализованное структурное описание можно назвать ОСМ лишь теоретически. Практического применения вырожденные ОСМ не имеют и вводятся лишь для общности классификации.

Определение 6. ОСМ вида $S_p^0 = \langle E, v_\pi, v_n \rangle$ или вида $S^0 = \langle E, v_n \rangle$ назовем обобщенной синтаксической структурной моделью нулевого порядка, а моделируемую ею структуру C_0 – синтаксической структурой нулевого порядка сложности.

В кортеже S_p^0 содержатся: $E = \langle E_S, E_I \rangle$ – носитель модели, где $E_I \subset I$ – подмножество вспомогательных элементов, идентифицирующих подмножество E_S вцелом и его элементы; I – универсальное множество элементов; $E_I = \pi \cup N$; N – подмножество элементов номинальной шкалы, для которого существует биекция на E_S; v_n – двухместный предикат, определяющий биекцию E_S на N и заданный так, что

$$\forall e_i \in E_S \;\; \forall e_j \in E \setminus N \; \exists n_k \in N \left(v_n\left(e_i, n_k\right) = 1 \;\&\; v_n\left(e_i, e_j\right) = 0 \right).$$

Введенную ОСМ нулевого порядка условно можно назвать структурной моделью «параметрического» объекта, поскольку здесь в явном виде отсутствуют отношения на множестве элементов носителя. Однако такие отношения можно неявно задать значениями параметров элементов, используя подмножество N. Варианты ОСМ нулевого порядка $S_p^0 = \langle E, v_\pi, v_n \rangle$ и $S^0 = \langle E, v_n \rangle$ эквивалентны с точки зрения формализованного структурного описания C_0, однако $S^0 = \left\langle E, v_n^P \right\rangle$ имеет меньшую мощность сигнатуры, а следовательно, более предпочтительна в качестве базовой для последующей интерпретации.

Определение 7. ОСМ вида $S_p^1 = \left\langle E, v_\pi, v_n, v_S^P \right\rangle$ или $S^1 = \left\langle E, v_n, v_S^P \right\rangle$ назовем обобщенной синтаксической структурной моделью первого порядка, а моделируемую структуру C_1 – синтаксической структурой первого порядка сложности. Сигнатуры ОСМ S_p^1, S^1 содержат по сравнению с S_p^0, S^0 дополнительный элемент – двухместный предикат $v_{S_1}^P$, определяющий отношение связности между парами элементов E_S, так что

$$\forall e_p, e_q \in E_S \;\; \forall e_k \in E_I \left[\left(v_S^P\left(e_p, e_q\right) = 1 \vee v_S^P\left(e_p, e_q\right) = 0 \right) \;\&\; v_S^P\left(e_p, e_k\right) = 0 \right].$$

ОСМ вида $S_p^1\left(S^1\right)$ позволяет задавать одну синтаксически правильную структурную совокупность на подмножестве E_S. Ее можно использовать в качестве базовой для формализации постановок задач реализации *S*-принципа и методов структурной идентификации. ОСМ первого порядка можно считать базовой, потому что, с одной стороны, ее обобщение позволяет определить ОСМ более высоких порядков, с другой стороны, обобщения формализаций постановок задач структурной идентификации и методов их решения, рассмотренных для C_1, позволяют интерпретировать получаемые результаты для структур произвольных порядков сложности.

Определение 8. ОСМ вида $S_p^k = \left\langle E, v_\pi, v_n, V_S^P \right\rangle$ или $S^k = \left\langle E, v_n, V_S^P \right\rangle$, где $\left| V_S^P \right| = k$, назовем ОСМ *k*-го порядка, а моделируемую структуру – синтаксической структурой *k*-го порядка сложности $\left(C_k \right)$.

Синтаксическая структура *k*-го порядка сложности содержит *k* видов отношений на множестве элементов, в нашем случае на подмножестве E_S, поэтому сигнатуры ОСМ S_P^k и S^k включают множества синтаксических предикатов $V_S^P = \left\{ v_{S_1}^P, v_{S_2}^P, \ldots, v_{S_i}^P, \ldots, v_{S_k}^P \right\}$.

Синтаксическая структура *k*-го порядка сложности представляет собой наиболее распространенный вид структур, используемый при интерпретации структурного представления систем, поскольку большинство исследуемых сегодня систем являются сложными системами, для которых характерно наличие различных видов отношений на множествах элементов.

ОСМ S_P^k и S^k предлагаются в качестве рабочих моделей при формализации постановок и методов решения задач *IS*-анализа, а также при интерпретации обобщенных семантических структурных моделей (ОССМ).

Семантические правила R расширяют формальные конструктивные процедуры описания элементов и отношений P с учетом количественных и качественных характеристик элементов E_S и видов отношений между ними, определяемых конкретным первичным описанием моделируемой системы.

Семантические правила описания элементов ОССМ предлагается формализовать путем введения подмножества семантических предикатов $V_E^R = \left\{ v_{E_1}^R, v_{E_2}^R, \ldots, v_{E_k}^R \right\}$.

Определение 9. Основные элементы носителя структурной модели $e_i \in E_S$ будем считать семантически заданными (идентифицированными) в пространстве по *k*-му подмножеству атрибутов $A_k = \left\{ a_1^k, a_2^k, \ldots, a_l^k, \ldots, a_m^k \right\}$, где в общем случае $\left| E_S \right| \neq m$, если на множестве $E_S \cup A_k \subset E$, где $A_k \subset E_I$, задан двухместный предикат $v_{E_k}^R$, так что

$$\forall e_i \in E_S \;\; \forall e_j \in E_I \setminus A_k \; \exists a_l^k \in A_k \left(v_{E_k}^R \left(e_i, a_l^k \right) = 1 \;\&\; v_{E_k}^R \left(e_i, e_j \right) = 0 \right).$$

Приведенное определение указывает, что любому элементу структуры, представленному основным элементом носителя обобщенной структурной модели $e_i \in E_S$, может быть поставлено в соответствие в рамках модели количественное или качественное значение a_l^k любого конкретного *k*-го атрибута, задаваемого множеством своих значений A_k, определяемым спецификой предметной области в процессе системного описания. Следовательно, семантические правила описания элементов структуры могут быть формализованы в рамках обобщенной структурной модели путем введения в сигнату-

ру модели подмножества семантических предикатов V_E^R. Тогда составляющая сигнатуры ОССМ, предназначенная для описания подмножества основных элементов носителя E_S, будет иметь вид $V_E = \left\langle V_E^P, V_E^R \right\rangle$.

Для описания множества конкретных видов отношений на подмножестве основных элементов носителя, семантически заданных по различным подмножествам атрибутов, используются семантические правила формирования семантически правильных структурных совокупностей. Семантически правильные структурные совокупности на подмножестве E_S будем задавать семантическими правилами описания отношений между элементами этого подмножества, которые формализуются с использованием подмножества семантических предикатов

$$V_S^R = \left\{ v_{S_1}^R, v_{S_2}^R, \ldots, v_{S_r}^R, \ldots, v_{S_m}^R \right\},$$

где $v_{S_r}^R\left(e_i, e_j\right)$ – двухместный предикат, задающий *r*-й вид отношения, на подмножестве E_S и определяемый семантикой предметной области.

Определение 10. Подмножество семантических заданных элементов обобщенной структурной модели E_S, описанное с помощью $V_E = \left\{ v_E^P, v_E^R \right\}$, образует *r*-ю семантически правильную структурную совокупность, если на E_S задан двухместный предикат $v_{S_r}^R$, определяющий *r*-й вид отношения связности между парами элементов E_S, так что

$$\forall e_p, e_q \in E_S$$

$$\forall e_k \in E_I \left[\left(v_{S_r}^R\left(e_p, e_q\right) = 1 \vee v_{S_r}^R\left(e_p, e_q\right) = 0 \right) \& \, v_{S_R}^R\left(e_p, e_k\right) = 0 \, \& \, v_{S_r}^R\left(e_q, e_k\right) = 0 \right].$$

Совокупность семантических правил описания модели определяет семантическую составляющую сигнатуры модели $V^R = \left\langle V_E^R, V_S^R \right\rangle$.

Семантические правила формирования обобщенной структурной модели R, включающие правила семантического описания основных элементов носителя и правила задания семантически правильных структурных совокупностей на подмножестве E_S, расширяют исходный набор аксиом обобщенной структурной модели P и позволяют строить обобщенные структурные модели, учитывающие семантику предметной области.

Определение 11. Обобщенную структурную модель, построенную в виде множества семантически правильных структурных совокупностей на основе расширения семантическими правилами исходного множества аксиом, назовем обобщенной семантической структурной моделью (ОССМ).

Таким образом, ОССМ может быть представлена кортежем вида

$$S_R = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, V_E^R, V_S^R \right\rangle.$$

Сравнение кортежа $S_P = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, V_S^P \right\rangle$, представляющего ОСМ, с кортежем $S_R = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, V_E^R, V_S^R \right\rangle$ показывает, что их различия определяются наличием в сигнатуре ОССМ компонентов дополнительного (семантического) описания атрибутов элементов $V_E^R = \left\{ v_{E_1}^R, v_{E_2}^R, \ldots, v_{E_k}^R \right\}$, а также компонентов $V_S^R = \left\{ v_{S_1}^R, v_{S_2}^R, \ldots, v_{S_r}^R, \ldots, v_{S_m}^R \right\}$ описания семантически правильных структурных совокупностей, используемых вместо компонентов $V_S^P = \left\{ v_{S_1}^P, v_{S_2}^P, \ldots, v_{S_i}^P, \ldots \right\}$ описания синтаксически правильных структурных совокупностей.

Выводы

Детальное рассмотрение конструктивных процедур формирования V_E^R и V_S^R как процедур, расширяющих множество аксиом ОСМ, показывает, что применение таких процедур формально приводит к увеличению числа синтаксически правильных структурных совокупностей на множестве E и интерпретации семантически правильных структурных совокупностей на подмножестве E_S в виде синтаксически правильных структурных совокупностей. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности формального включения V_E^R в V_E^P и формировании подмножества V_E^P в виде $V_E^P = \left\{ v_\pi^P, v_n^P, v_{E_1}^P, v_{E_2}^P, \ldots, v_{E_k}^P \right\}$, а также о возможности представления V_S^R в виде V_S^P. Тогда кортеж $S_R = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, V_E^R, V_S^R \right\rangle$ будет представлен в виде $S_R = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, v_{E_1}^P, \ldots, v_{E_k}^P, \ldots, V_S^P \right\rangle$, следовательно, ОССМ можно формально заменить ОСМ.

Приведенные рассуждения являются формальным доказательством следующего утверждения.

Утверждение. Любая ОССМ *k*-го порядка вида $S_R^k = \left\langle E, v_\pi^P, v_n^P, V_E^R, V_S^R \right\rangle$ или вида $\bar{S}_R^k = \left\langle E, v_n^P, V_E^R, V_S^R \right\rangle$ *q*-атрибутной семантической структуры *k*-го порядка сложности CC_k^q может быть интерпретирована в системе аксиом ОСМ и представлена ОСМ вида $S_{pq}^k = \left\langle E, \bar{V}_\pi^P, V_S^P \right\rangle$ или $S_p^k = \left\langle E, V_E^P, V_S^P \right\rangle$.

Здесь $\bar{V}_\pi^P = \left\{ v_\pi^P, v_n^P, v_1^P, v_2^P, \ldots, v_h^P, \ldots, v_q^P \right\}$ – множество синтаксических предикатов, расширяющее базовую систему аксиом ОСМ с целью возможности описания *q*-атрибутности элементов подмножества E_S, а $V_E^P = \left\{ v_{E_0}^P, v_{E_1}^P, \ldots, v_{E_n}^P, \ldots, v_{E_q}^P \right\}$ – модификация $\bar{V}_\pi^P$ при $V_{E_0}^P = V_n^P$.

Следовательно, в процессе исследования способов структурного представления текущих и эталонных состояний исследуемых информационных объектов и возможностей решения задач структурного анализа в соответствии с *S*-принципом можно в качестве обобщенной структурной модели использовать ОСМ, представленную кортежем вида $S_P = \left\langle E, V_E^P, V_S^P \right\rangle$.

При этом рассмотренная интерпретация ОССМ в виде ОСМ фактически означает переход от содержательного (предметного) описания структуры к ее формализованному аналогу, обладающему структурной реальностью, необходимой для формализованного решения задач структурного анализа. Если какие-либо системные описания будут представлены ОССМ, то описанные интерпретации в виде ОСМ могут обрабатываться методами реализации *S*-принципа, инвариантными по отношению к предметной области, в рамках которой формировались ОССМ.

Список литературы

1. **Касти, Дж.** Большие системы. Связность, сложность и катастрофы : пер. с анг. / Дж. Касти. – М. : Мир, 1982. – 216 с.
2. **Михеев, М. Ю.** Ситуационно-структурный подход к анализу информационных объектов / М. Ю. Михеев, А. Б. Щербань // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006. – № 6. – С. 128–135. – (Технические науки).
3. **Щербань, А. Б.** Задачи *IS*-анализа информационных структур / А. Б. Щербань // Информационные системы и технологии «ИСТ – 2006» : материалы международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород : НГТУ, 2006. – С. 148–150.
4. **Поспелов, Д. А.** Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 288 с.

Щербань Александр Борисович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных
технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Shcherban Alexander Borisovich
a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
chair information technologies
and systems,
the Penza state technological academy

Братцев Константин Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных
технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Bratcev Konstantin Evgenevich
a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
chair information technologies
and systems,
the Penza state technological academy

Жашкова Татьяна Валерьевна
аспирант,
Пензенская государственная
технологическая академия

Zhashkova Tatyana Valerevna
the post-graduate student,
the Penza state technological academy

Михеев Михаил Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Mikheyev Michail Jurevich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair
of information technologies and systems,
the Penza state technological academy

E-mail: mix@pgta.ac.r

УДК 621.396.6

Щербань, А. Б.

Обобщенные структурные модели информационных объектов / А. Б. Щербань, К. Е. Братцев, Т. В. Жашкова, М. Ю. Михеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 12–22.

УДК 681.3.25:621:382

Ю. Д. Пальченков

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВЫЧИСЛИМЫХ ФУНКЦИЙ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В ПРОЕКТИРОВАНИИ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. Обсуждается ассоциативный нейрон фон Неймана и электронный нейрон Хопфилда и их использование в проектировании непрерывно-дискретных вычислительных систем и нейронных сетей.

Ключевые слова: вычислимый анализ, нейронная сеть, аналого-цифровой нейрон, сигнальный процессор.

Abstract. Association neuron, Knopfield electron neuron, neurocomputer on basis of signal processors and their usage in designing of hybrid computing systems and neural network are under discussion.

Keywords: computable analysis, neural network, analogous-digital neuron, signal processor.

Введение

Теория информации, предложенная в 40-х гг. К. Шенноном, основанная на анализе последовательностей символов, поступающих из источника данных в приемник с двоичными (булевыми) точно заданными значениями, не работает в тех случаях, когда речь заходит об информационных сообщениях (запросах – телефон, радио, речь, телевидение, компьютер и т.д.), на много порядков превосходящих по своей мощности возможности приемника [1–3].

Среди работ, лежащих в основе теоретических представлений об информации, следует особо отметить труды академика А. Н. Колмогорова. В статье «Три подхода к определению понятия «Количество информации» Колмогоров примеряет теорию алгоритмов к определению «количества информации» в чем-либо (x) о чем-либо (y). Колмогоров предлагает оценить сложность, а стало быть, и информативность объектов через минимальную длину программы, необходимой для получения y из x.

Будем придерживаться определения нейрокомпьютера, приведенного А. И. Галушкиным. Он рассматривает его как вычислительную систему с MSIMD-архитектурой, в которой процессорный элемент однородной структуры упрощен до уровня нейрона, резко усложнены связи между элементами и программирование перенесено на изменение весовых коэффициентов связей между процессорными элементами.

Если в физике используются аналитические методы, которые позволяют легко переходить от математических моделей к упрощенным представлениям, доступным для инженеров и ученых, то в теории вычислений такого пока нет [3]. В отличие от строгих математических моделей концептуальные представления занимают особое место, т.к. в них учитывается различие в точках зрения и интерпретациях разных людей с одними и теми же наборами данных.

1 Нейронная архитектура фон Неймана

XX столетие было ознаменовано практическим созданием функциональной схемы ЭВМ фон Неймана (1945) («First Draft of a Report on the EDVAC») и гипертекстовой модели знаний Вэннивера Буша (1945) («As We May Think»). Эти две работы предопределили развитие вычислительной техники на несколько десятилетий вперед.

На сегодняшний день развитие вычислительной техники условно можно разделить на три временных периода [1–3]:

1. Вычислительный (расчеты и алгоритмы): с 1940 по 1970 гг.
2. Логический (обработка символов и текстов): с 1970 по 2000 гг.
3. Познавательный (накопление и обработка знаний): с 2000 г. по настоящее время.

В архитектуре ЭВМ фон Неймана изначально заложена различная интерпретация одних и тех же данных. Один и тот же байт может интерпретироваться как код операции, двоичное число, буква алфавита и яркость световой точки. Фон Нейман использует нейрон в качестве прототипа для базовых вычислительных элементов, а модель биологической нервной системы лежит в основе более общих рассуждений о вычислительных структурах.

Однако в книге «Компьютер и мозг» фон Нейман утверждает, что язык мозга – это не язык математики. Поэтому нейронные модели основаны на очень небольшом наборе аксиоматических понятий. В своей архитектуре ЭВМ фон Нейман рассматривает в первую очередь арифметические свойства нейрона и использует его как цифровой двоичный элемент, который выполняет базовые функции.

Первоначально фон Нейман объединял устройство управления (УУ), арифметико-логическое устройство (АЛУ) и сверхоперативную память (СОЗУ) в один блок, который был назван ассоциативным нейроном или центральным процессором. Сразу следует оговориться, что, хотя ассоциативный нейрон напоминает физиологический, он не предназначен для хранения больших объемов данных и оперативная память содержит множество однотипных элементов, которые в отличие от биологической системы являются пассивными.

Вторым существенным отличием ассоциативного нейрона от физиологического является его самостоятельная активность и динамические свойства (количество нейронов и связи между ними постоянно изменяются).

Компьютер на множестве активных нейронов так и не был построен, а классический компьютер состоял из множества пассивных ячеек памяти, связанных с единственным центральным процессором (рис. 1).

На рис. 2 представлена схема формального нейрона, состоящая из сумматора и функционального преобразователя.

Попытка использования ассоциативных нейронов в качестве базовых элементов была предпринята в гибридном процессоре (рис. 3).

На основе обобщенной схемы гибридного процессора был разработан специализированный гибридный процессор для решения навигационных задач (рис. 4).

Термины «программное» и «структурное» введены фон Нейманом. Если программное управление задает последовательность выбора команд из памяти и их модификацию, то структурное – осуществляет настройку ГОУ

и АОУ на требуемую гибридную и аналоговую операции. Под настройкой понимается не только переход к новым параметрам, другому режиму работы, но также и изменение набора аналоговых схем.

Элементы аналоговых ЭВМ ведут себя подобно нейронам, которые могут самостоятельно изменять свое состояние. Нейронные модели в отличие от жестких коммутационных структур способны в аналоговых ЭВМ динамически добавлять новые элементы, устанавливать новые связи и изменять их характеристики.

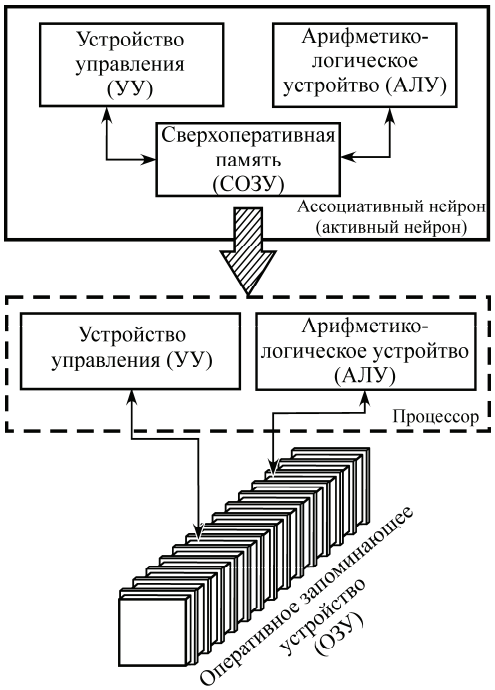


Рис. 1 Нейронная архитектура фон Неймана

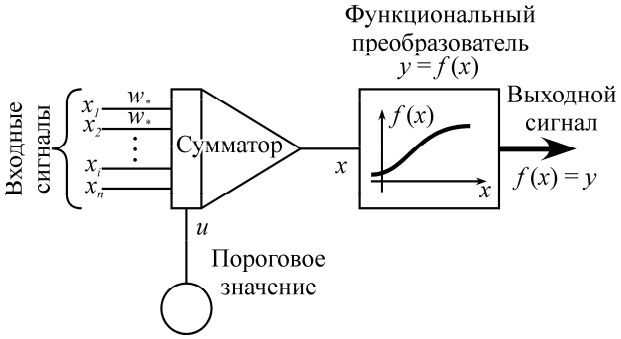


Рис. 2 Схема формального нейрона

Нейрон как элемент памяти обладает еще одним важным свойством: он способен нести значительно большее количество информации, чем 1 бит, хранимый в одной двоичной ячейке оперативной памяти. Состояние нейрона может быть представлено как действительное число, что существенно увеличивает его информативность.

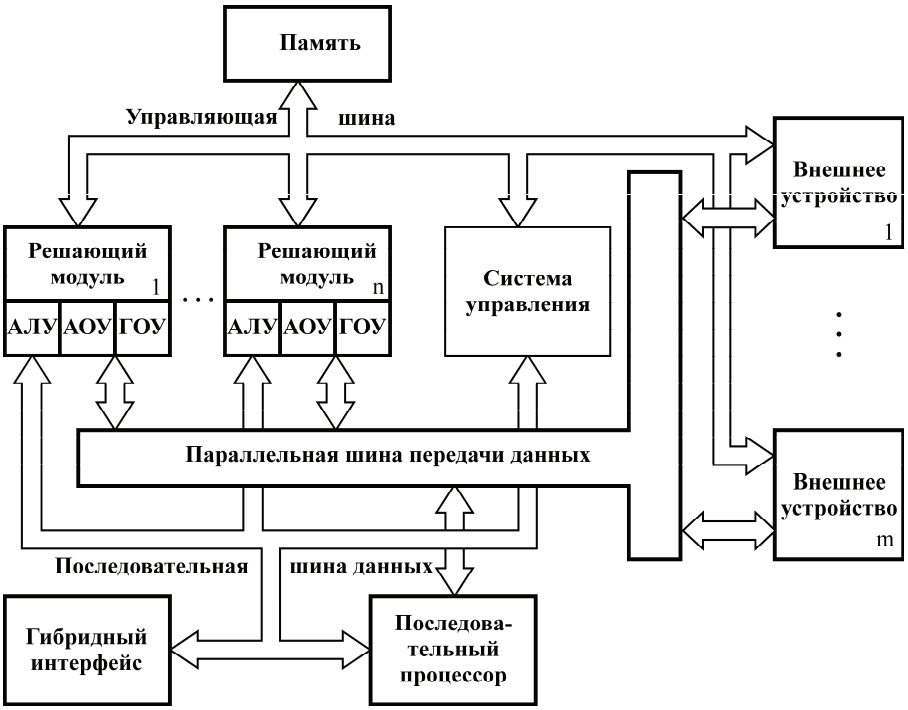


Рис. 3 Обобщенная структурная схема гибридного процессора:
АЛУ – арифметико-логическое устройство; АОУ – аналоговое операционное устройство (для решения обыкновенных дифференциальных уравнений);
ГОУ – гибридное операционное устройство (алгебраические преобразования, связанные с обработкой информации, поступающей с датчиков и из других смежных систем в аналоговой и цифровой формах)

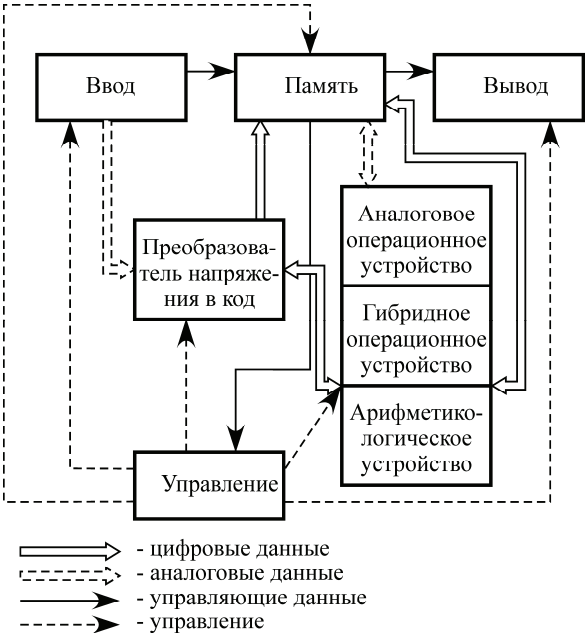


Рис. 4 Структурная схема специализированного гибридного процессора для решения навигационных задач

2 Вычислимое действительное число

Состояния нейронов зависят от времени. Можно предположить, что биологический нейрон также является запоминающим элементом с более чем двумя состояниями, тогда оценки объемов данных, которые способен хранить головной мозг, должны быть пересмотрены в сторону их увеличения.

Существует четыре определения действительного числа (ДЧ):

– принцип непрерывности Дедекинда;

– канторовское понятие фундаментальной последовательности рациональных чисел;

– тьюрингово определение через две последовательности сегментов с рациональными концами, названными эквивалентными;

– определение посредством возрастающих и убывающих сходящихся последовательностей рациональных чисел, предложенных Коши.

Необходимо ввести отличие вычислимого действительного числа (ВДЧ) от ДЧ. Оно заключается в том, что определяющая последовательность ВДЧ должна быть охарактеризована конечным количеством информации, функциональной схемой, соответствующей машине Тьюринга. Определение ДЧ такого ограничения не содержит.

Идея вычислимого (рекурсивного) анализа состоит в том, чтобы расширить классическую теорию вычислимости от целых до реальных чисел.

Частичная функция $f : N^n \to N^k$ есть вычислимая (рекурсивная), если она может быть вычислена тьюринговой машиной.

Множество $A \subseteq N^n$ есть рекурсивное, если существует такая общая вычислимая функция $\chi_A : N^n \to \{0,1\}$, что:

$$\chi_A = \begin{cases} 0, \text{ если } \chi \notin \text{A}, \\ 1, \text{ если } \chi \in \text{A}. \end{cases}$$

Функция χ_A называется характеристической функцией *A*.

Множество $A \subseteq N^n$ называется рекурсивно счетным (далее – р.с.), если $A \neq \varnothing$ или есть такая общая вычислимая функция $f : N \to N^n$, что:

$$A = \left\{ f(x) \in N^n : x \in N \right\}.$$

Множество $A \in N^n$ называется рекурсивно счетным, если и только если $N^n \setminus A$ есть р.с. [4, 5].

Последовательность $\{r_n\}$ рациональных чисел называют ρ-именем реального числа *x*, если существуют такие три функции $a, b, c : N \to N$, что для всех

$$n \in N, r_n = (-1)^{a(n)} \frac{b(n)}{c(n)+1} \text{ и } |r_n - x| \le \frac{1}{2^n}. \quad (1)$$

Понятие ρ-имени может быть расширено на R^l: последовательность $\{(r_{1n}, r_{2n}, ..., r_{ln})\}_{n \in N}$ рациональных векторов есть ρ-имя $x = (x_1, x_2, ..., x_l) \in R^l$, если $\{r_{jn}\}_{n \in N}$ есть ρ-имя x_j, $1 \le j \le l$.

Реальное число x называется вычислимым, если a, b, c в (1) есть вычислимые (рекурсивные) функции.

Последовательность $\{x_k\}_{k\in N}$ для реальных чисел есть вычислимая, если существуют такие три вычислимые функции $a, b, c : N^2 \to N$, что для всех $k, n \in N$:

$$\left|(-1)^{a(k,n)}\frac{b(k,n)}{c(k,n)+1} - x_k\right| \le \frac{1}{2^n}.$$

Базовым вычислительным устройством аналогового типа является электронный нейрон Хопфилда, показанный на рис. 5.

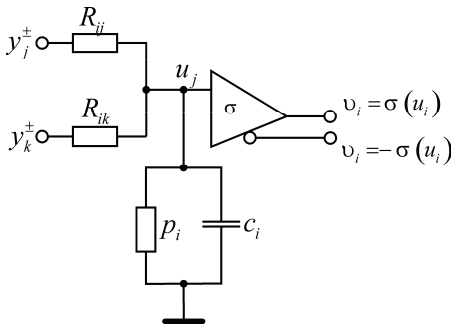


Рис. 5 Электронный нейрон Хопфилда

Нейроны хопфилдского типа выполнены из резисторов, емкостей и усилителей. Однако на этот раз предполагается, что усилители имеют такую насыщающуюся нелинейную характеристику отклика σ, как

$$\sigma(u) = \alpha \tanh(u) + \beta.$$

Рассмотрим поведение нейрона i в нейронной сети из n-го количества таких нейронов. Пусть p_i и c_i соответственно будут входными сопротивлением и емкостью усилителя в нейроне i. Обозначим входное напряжение усилителя через u_i и выходное напряжение через υ_i.

Для установления запрещающих соединений между нейронами нужно инвертированное выходное напряжение $\overline{\upsilon}_i = -\upsilon_i$. Нейрон i, как показано на рис. 5, вытягивает ввод из других нейронов, обозначенных как j и k на рисунке, через резисторы (R_{ij}, R_{ik}). Напряжения $\upsilon_j^{\pm}$ и $\upsilon_k^{\pm}$ получены из соответствующих нейронов j и k в зависимости от того, являются ли соединения возбуждающими или подавляющими.

Контурные уравнения для сети из n нейронов могут быть записаны так:

$$C_i\frac{du_i}{dt} + \frac{u_i}{\rho_i} = \sum_{j=1}^{n}\frac{1}{R_{ij}}\left(\upsilon_j^{\pm} - u_i\right), \text{ при } i = 1, \ldots, n. \qquad (2)$$

Выбирая параметры контура и нормализуя RC-постоянные до 1, можно использовать такую сеть для решения любой системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка формы:

$$\frac{du_i}{dt} = -u_i + \sum_{j=1}^{n} h_{ij}\sigma\left(u_j\right), \text{ при } i = 1, \ldots, p,$$

где $R_{ij} = 1/h_{ij}$.

Хопфилд при помощи функции Ляпунова показал, что если соединения между нейронами являются симметричными, то $R_{ij} = R_{ji}$ для каждой пары $i, j = 1, ..., n$, тогда система (2) является глобально асимптотически стабильной, т.е. из любого состояния напряжения $\left(u_1, ..., u_n\right)$ сеть расслабляется навстречу некоторому стабильному состоянию. Отсюда можно рассмотреть сеть, производящую «ввод-вывод»-преобразование из начальных состояний к их соответствующим состояниям.

Хопфилд предложил применение таких сетей для ассоциативной памяти и комбинаторной оптимизации.

Была изучена вычислительная мощность модели Хопфилда и показано, что произвольные полиномно пространственно-ограниченные машины Тьюринга могут моделироваться полиномно-размеренными сетями с кусочно-линейной функцией отклика усилителя:

$$\sigma\left(u\right) = \begin{cases} -1, \text{ для } u < -1, \\ u, \text{ для } -1 \le u < 1, \\ 1, \text{ для } u > 1. \end{cases}$$

Заключение

Предложена методика проектирования обобщенного гибридного процессора с учетом принципа неопределенности Гейзенберга для расчета динамических переменных, характеризующих вычислительные системы, такие как временные и аппаратурные затраты и длина программы.

Решениями уравнения Беллмана являются параллельные формы алгоритма, которые используются в методике совместного исследования структуры решаемых задач, алгоритмов и архитектуры.

Список литературы

1. **Толкачев, С. Ф.** Нейронное программирование диалоговых систем / С. Ф. Толкачев. – СПб. : Корона-Век, 2006. – 192 с.
2. **Борисов, В. В.** Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
3. **Пальченков, Ю. Д.** Об одном подходе к аналоговой, цифровой и аналого-цифровой технологиям обработки / Ю. Д. Пальченков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 44–55.
4. **Burnez, O.** The general Purpose Analog Computer and Computable Analysis two equivalent paradigms of analog computation / O. Burnez, M. L. Campagnolo, D. S. Graca, E. Hainry // Theory and Applications of Models of Computation TAMC' 06, LNCS 3959 / J.-Y. Cai, S. B. Cooper and A. Li, editors. – Springer – Verlag, 2006. – P. – 631–643.
5. **Пальченков, Ю. Д.** Основы теории вычислимых функций действительных переменных и их применение в проектировании гибридных систем и нейронных сетей : монография / Ю. Д. Пальченков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – Ч. I. – 176 с.

Пальченков Юрий Дмитриевич
кандидат технических наук, профессор,
кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный
университет

Palchenkov Jury Dmitrievich
a Cand.Tech.Sci., the professor,
chair of a radio engineering
and radio-electronic systems,
the Penza state university

УДК 681.3.25:621:382

Пальченков, Ю. Д.

Основы теории вычислимых функций действительных переменных в проектировании непрерывно-дискретных вычислительных систем и нейронных сетей / Ю. Д. Пальченков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 23–30.

УДК 681.3.013.2: 62-192

О. В. Абрамов

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ*

Аннотация. Рассмотрена проблема проектирования аналоговых технических устройств и систем с учетом требований параметрической надежности при различных уровнях исходной информации о параметрических возмущениях. Обсуждены параллельные алгоритмы решения возникающих при этом задач многовариантного анализа и оптимизации.

Ключевые слова: надежность, параллельный алгоритм, случайные изменения параметров, метод Монте-Карло, оптимизация.

Abstract. The problem of designing of analogue technical devices and systems taking into account requirements of parametrical reliability is considered at various levels of the initial information on parametrical indignations. Parallel algorithms of the decision of problems of the multiple analysis arising thus and optimisation are discussed.

Keywords: reliability, parallel algorithm, random parameters variations, Monte Carlo method, optimization.

Введение

Основные трудности, возникающие при проектировании технических систем и устройств с учетом отклонений их параметров от расчетных значений и требований надежности, связаны с необходимостью решения целого ряда сложных и трудоемких задач. К их числу относится и задача оптимального выбора номинальных значений параметров проектируемых систем (параметрического синтеза) по критериям надежности, основные проблемы решения которой обусловлены вероятностным характером критерия оптимальности и дефицитом информации о случайных закономерностях процессов изменения параметров проектируемых схем.

В последние годы стал активно развиваться достаточно радикальный путь сокращения трудоемкости решения сложных вычислительных задач, в основе которого лежит идея распараллеливания процессов поиска конечного результата. Развитие сетевых технологий, соответствующего программного обеспечения, удешевление элементной базы делает вычислительные комплексы массивно-параллельного и кластерного типа доступными все большему числу пользователей.

1 Параметрический синтез технических систем по критерию надежности

Параметрическая надежность (надежность по постепенным отказам) характеризует способность системы (устройства) сохранять уровень рабочего параметра $\boldsymbol{Y}(t)$ (в общем случае векторного) в допустимых пределах ($\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$) в течение требуемого времени T при заданных режимах и условиях работы. Критерием постепенного (параметрического) отказа в данном случае будет нарушение условия работоспособности

$$\boldsymbol{A} \le \boldsymbol{Y}(t) \le \boldsymbol{B},$$

* Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 06-III-А-03-070 и 06-I-ЭММПУ-054 Программы № 15 отделения ЭММПУ РАН.

а количественной мерой надежности – вероятность выполнения этого условия в течение времени T, т.е.

$$P(T) = P\{\, \boldsymbol{A} \le \boldsymbol{Y}(t) \le \boldsymbol{B} \ \forall\ t \in [0, T]\}. \qquad (1)$$

Выходные (рабочие) параметры $\boldsymbol{Y}(t)$ связаны некоторым известным оператором с параметрами элементов системы $\boldsymbol{Y}(t) = F(\boldsymbol{X}(t))$. Информация об изменениях параметров доступна обычно на уровне параметров элементов (внутренних параметров), а сам процесс проектирования, связанный с обеспечением необходимой (или оптимальной) параметрической надежности, реализуется путем выбора номинальных значений внутренних параметров $\boldsymbol{x}_{\text{ном}}$.

Задача параметрического синтеза по критерию надежности [1] состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров исследуемого устройства $\boldsymbol{x}_{\text{ном}} = (x_{1\ \text{ном}}, \ldots, x_{n\ \text{ном}})$, обеспечивающих максимум вероятности его безотказной работы в течение заданного времени:

$$\boldsymbol{x}_{\text{ном}} = \arg\max P\{\boldsymbol{X}(\boldsymbol{x}_{\text{ном}}, t) \in D_x, \forall t \in [0,T]\}\,, \qquad (2)$$

где $\boldsymbol{X}(\boldsymbol{x}_{\text{ном}}, t)$ – случайный процесс изменения внутренних параметров; D_x – область работоспособности; T – заданное время эксплуатации устройства.

Область работоспособности D_x, как правило, неизвестна, поэтому условия работоспособности обычно задаются следующей системой неравенств:

$$a_j \le y_j(\boldsymbol{x}) \le b_j,\ \ j = \overline{1,m}\,, \qquad (3)$$

где $\boldsymbol{y} = \{y_j\}_{j=1}^{m}$ – вектор выходных параметров устройства, причем $y_j = F_j(x_1, ..., x_n)$, а $F_j(\bullet)$ – известный оператор, зависящий от топологии исследуемого устройства.

В качестве количественного показателя надежности принимается вероятность

$$P(\boldsymbol{Y}(t) \in D_y\ , \forall t \in [0,T]) = P(\boldsymbol{y}(\boldsymbol{X}(t)) \in D_y\ , \forall t \in [0,T]) =$$

$$= P(\bigcap_{j=1}^{m} y_j(\boldsymbol{X}(t)) \in [a_j, b_j], \forall t \in [0,T]).$$

При $t = 0$ данное выражение можно использовать для оценки серийнопригодности (выхода годных).

Каждый шаг оптимизации требует проведения статистического анализа для получения оценки критерия оптимальности. При этом на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло) многократно рассчитывается исследуемая система (устройство) для различных реализаций случайных значений параметров элементов. Если условия работоспособности выполняются, то реализация относится к числу «хороших». Оценкой вероятности выполнения условий работоспособности (серийнопригодности, параметрической надежности) служит отношение числа «хороших» реализаций к общему числу реализаций случайных значений параметров элементов. Число расчетов N, равное числу реализаций случайного вектора параметров, определяется из условия обеспечения необходимой точности оценки критерия [2]. Обычно

для этого на каждом шаге поиска проводится полный расчет системы от нескольких сотен до тысячи раз. Заметим, что в процессе статистических испытаний и на каждом шаге поиска экстремума приходится проверять выполнение условий работоспособности (3).

2 Расчет параметрической надежности методом критических сечений

Для расчета целевой функции (вероятности безотказной работы) будем использовать метод критических сечений [3], который основан на возможности представления случайного процесса $\boldsymbol{Y}(t)$ конечным числом случайных величин Y_t, получаемых во временных t-сечениях исследуемого процесса. Использование данного метода позволяет отнести реализацию системы к «хорошим» или «плохим» для заданного времени эксплуатации.

Будем считать характер случайного процесса $\boldsymbol{Y}(t)$ таким, что для нахождения любой его реализации в области допустимых значений в течение заданного времени необходимо и достаточно, чтобы эта реализация принадлежала области допустимых значений в ограниченном (и небольшом) числе t-сечений процесса $\boldsymbol{Y}(t)$, которые назовем критическими. Изучение закономерностей необратимых изменений параметров элементов систем и устройств (резисторов, конденсаторов, транзисторов), а также различных видов аппаратуры (например, измерительных устройств, усилительных блоков и др.) показывает, что для большинства из них принятое предположение является справедливым, причем число критических сечений не превышает трех.

Если реализация процесса обладает вышеописанным свойством, то

$$P(T) = P\{[\boldsymbol{a} \le \boldsymbol{Y}(t_0) \le \boldsymbol{b} \cap \boldsymbol{a} \le \boldsymbol{Y}(t_1) \le \boldsymbol{b} \cap \ldots \cap \boldsymbol{a} \le \boldsymbol{Y}(t_K) \le \boldsymbol{b}]\},$$

где $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ – заданные границы допуска; t_0, t_1, …, t_K – точки локальных экстремумов реализации на интервале $[0, T]$ (критические сечения), $t_0 = 0$, $t_K = T$.

Для монотонных случайных процессов изменения выходных параметров системы $\boldsymbol{Y}(t)$ вероятность невыхода $\boldsymbol{Y}(t)$ за пределы $[\boldsymbol{a}; \boldsymbol{b}]$ в течение заданного времени определится следующим образом:

$$P(T) = P\{[\boldsymbol{a} \le \boldsymbol{Y}(0) \le \boldsymbol{b} \cap \boldsymbol{a} \le \boldsymbol{Y}(T) \le \boldsymbol{b}]\}.$$

Аналогично получаются соотношения для оценки параметрической надежности и при аппроксимации случайных процессов более сложного вида.

Таким образом, вначале рассчитываются выходные параметры устройства для реализации случайной величины $\boldsymbol{X}_0(\boldsymbol{x}_{\text{ном}})$ и проверяются условия (3). Если эти условия выполняются, то моделируется реализация случайного процесса $\boldsymbol{X}(\boldsymbol{X}_0(\boldsymbol{x}_{\text{ном}}, t_i))$ изменения параметров элементов для следующего временного сечения, вычисляются выходные параметры, проверяются условия работоспособности и т.д. в зависимости от числа критических сечений. Как было показано выше, для того чтобы отнести реализацию к числу «хороших», необходимо, чтобы она удовлетворяла условиям (3) во всех критических временных сечениях.

Оценкой параметрической надежности (серийнопригодности) служит отношение числа «хороших» реализаций к общему числу N реализаций случайного процесса изменения параметров элементов, которое определяется из условия обеспечения необходимой точности оценки надежности [2].

3 Выбор номиналов параметров в условиях дефицита информации

Часто необходимая априорная информация о вероятностных свойствах случайных процессов изменения параметров отсутствует или является недостаточно полной. Могут быть известны лишь числовые характеристики (моменты распределений) отклонений параметров (математические ожидания и дисперсии), отсутствовать данные об эксплуатационных (временных) изменениях параметров или полностью какая-либо информация о закономерностях параметрических возмущений. В последнем случае в качестве критерия оптимальности принимаемых решений будем использовать «запас работоспособности» [4].

Запас работоспособности можно рассматривать на уровне внутренних параметров (параметров элементов) или выходных параметров системы.

Запас работоспособности *первого типа* (на уровне внутренних параметров) позволяет оценить степень удаленности вектора внутренних параметров от границ области работоспособности, а следовательно, пределы возможных вариаций параметров элементов, при которых не нарушаются условия работоспособности. Задача оптимального параметрического синтеза в этом случае сводится к нахождению таких точек внутри области работоспособности D_x (выбору таких номиналов параметров), которые находятся на максимальном в смысле выбранного критерия расстоянии от ее границ.

Если область работоспособности D_x неизвестна, то выполнение условий работоспособности при выбранных внутренних параметрах проверяется в результате вычисления соответствующих выходных параметров и сравнения их с требованиями технического задания (областью допустимых значений выходных параметров D_y).

Можно говорить о запасе работоспособности *второго типа*, представляющем собой меру удаленности вектора выходных параметров $\boldsymbol{y} = (y_1(\boldsymbol{x}), y_2(\boldsymbol{x}), ..., y_m(\boldsymbol{x}))$ от заданных требованиями технического задания границ области D_y.

Поскольку задача параметрического синтеза состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров, будем называть выбор значений параметров по критерию запаса работоспособности первого типа *прямой задачей*, а выбор по критерию запаса работоспособности второго типа – *обратной*.

При решении прямой задачи оптимального выбора номиналов параметров по критерию запаса работоспособности необходимо иметь информацию о конфигурации и параметрах области работоспособности D_x.

Если известно, что область D_x выпуклая, задача сводится к нахождению ее центра тяжести. Можно показать, что полученное решение обеспечивает также максимум вероятности нахождения параметров в области допустимых значений в фиксированный момент времени, если плотность распределения параметров симметрична относительно математического ожидания (номинальной точки).

Во многих случаях прямая задача сводится к так называемой задаче центрирования расчетной области, которая состоит в том, что требуется вписать в область D_x замкнутое компактное множество (n-мерный параллелепипед, эллипсоид, шар), центр которого принимают за искомое решение.

При произвольной конфигурации области работоспособности необходимо решать минимаксную (максиминную) задачу: найти такую номиналь-

ную точку $\boldsymbol{x}_{\text{ном}} = (x_{1\ \text{ном}}, \ldots, x_{n\ \text{ном}})$, для которой достигает максимума минимальный запас работоспособности (расстояние от этой точки до границ области D_x).

Любая комбинация внутренних параметров $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ однозначно определяет некоторую совокупность выходных величин $\boldsymbol{y} = (y_1(\boldsymbol{x}), y_2(\boldsymbol{x}), ..., y_m(\boldsymbol{x}))$ и, таким образом, некоторую точку $\boldsymbol{y} \in R^m$ в m-мерном пространстве выходных параметров. При этом обратное отображение не всегда является однозначным: одному и тому же набору значений выходных параметров могут соответствовать несколько различных векторов внутренних параметров.

Будем говорить, что совокупность внутренних параметров представляет допустимое решение (удовлетворяющее условиям работоспособности), если соответствующий им вектор выходных параметров лежит в m-мерном полиэдре D_y, задаваемом выходными ограничениями (3).

Рассмотрим более подробно задачу выбора оптимальных значений номиналов параметров по критерию запаса работоспособности на уровне выходных параметров.

Пусть условия работоспособности исследуемой системы заданы интервалом допустимых значений выходного параметра $y(\boldsymbol{x})$:

$$y_{\min} \le y(\boldsymbol{x}) \le y_{\max}. \tag{4}$$

При отсутствии какой-либо информации о закономерностях отклонений выходного параметра от номинального значения оптимальным будет такое значение y, при котором обеспечивается максимальный запас работоспособности. Очевидно, что в рассматриваемом случае, это будет

$$y_{\text{н}}^0 = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}, \tag{5}$$

при котором запас работоспособности равен половине интервала допустимых значений.

Для нахождения номинальных значений внутренних параметров необходимо решить следующую оптимизационную задачу:

$$\boldsymbol{x}_{\text{н}}^0 = \arg\min_{\boldsymbol{x}} \left| y_{\text{н}}^0 - y(\boldsymbol{x}) \right| \tag{6}$$

или

$$\boldsymbol{x}_{\text{н}}^0 = \arg\min_{\boldsymbol{x}} \left(y_{\text{н}}^0 - y(\boldsymbol{x}) \right)^b, \tag{7}$$

где b – положительное целое четное число.

Можно показать, что номинальное значение параметра, соответствующее середине поля допуска (5), будет оптимальным и в случае любого симметричного закона распределения вероятностей рассматриваемого параметра (например, нормального или равномерного). Оно гарантирует не только максимальный запас работоспособности, но и максимальную вероятность нахождения параметра $y(\boldsymbol{x})$ в пределах поля допуска $[y_{\min}, y_{\max}]$.

4 Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации надежности

Как отмечалось выше, расчет параметрической надежности базируется на использовании метода Монте-Карло, который представляет собой многократное повторение типовой процедуры с различными данными. Этот метод обладает потенциальным параллелизмом, при этом единицей распараллеливания выступает однократный расчет выходных параметров и проверка выполнения условий работоспособности.

При организации параллельных вычислений методом Монте-Карло возможны два подхода – централизованный и распределенный. Структура типовой параллельной процедуры метода, количество межпроцессорных пересылок, эффективность и применимость данных подходов зависят от организации получения псевдослучайных чисел для проведения моделирования системы.

В случае вычисления оценки параметрической надежности методом Монте-Карло при использовании метода критических сечений типовая процедура может иметь различную вычислительную емкость для разных реализаций случайного вектора параметров. Это обусловлено следующим. Если для первого временного сечения условия работоспособности не выполняются, то нет необходимости формировать реализацию случайного процесса для последующих временных сечений, т.к. реализация не относится к числу «хороших». Такая структура типовой процедуры метода обусловливает разбалансировку параллельного вычислительного процесса при использовании централизованного подхода.

Распределенный параллельный метод статистического оценивания предпочтительнее, т.к. он позволяет получить ускорение, близкое к линейному, поддерживать масштабируемость вычислительного алгоритма, обеспечивает равномерность вычислительной нагрузки всех компонентов комплекса вне зависимости от временных характеристик типовых процессов. Является обоснованным использование библиотеки параллельных псевдослучайных чисел для параллельных вычислителей с распределенной памятью.

Универсальным и достаточно эффективным средством решения оптимизационных задач по критерию надежности (2) или запаса работоспособности (6), (7) может стать применение параллельного аналога метода сканирования (слепого поиска).

Сущность метода заключается в том, что вся допустимая область пространства параметров разбивается на элементарные ячейки, в каждой из которых по определенному алгоритму выбирается точка: в центре ячейки, на ребрах или вершинах. В каждой ячейке осуществляется последовательный просмотр значений целевой функции и нахождение среди них экстремального значения. Точность метода, естественно, определяется тем, насколько плотно располагаются выбранные точки в области поиска.

Основным достоинством метода сканирования является то, что при его использовании с достаточно густым расположением точек всегда гарантируется то, что глобальный экстремум будет найден. Однако для этого в данном методе требуется значительный объем вычислений, снизить который можно путем распараллеливания алгоритма. Наиболее простой алгоритм поиска экстремума методом сканирования (поиска на сетке переменных) заключается в том, что по каждой независимой переменной задаются приращения в соот-

ветствующем порядке, обеспечивающем заполнение всей исследуемой области равномерной и достаточно густой сеткой.

Поскольку номинальные значения параметров схемных элементов должны принадлежать ряду стандартных значений, регламентированных техническими условиями или ГОСТами, иногда предпочтительнее искать оптимальный вектор номиналов параметров на дискретном множестве номиналов $D_{\text{н}}$, соответствующем стандартным значениям и ограниченном областью допустимых значений D_x. В случае, когда эта область неизвестна, для каждого из параметров x_i необходимо задать пределы их возможных изменений. Делается это, например, путем построения описанного гиперпараллелепипеда [5] или на основе известных допусков на каждый из внутренних параметров.

Пусть известны множества номиналов для каждого из n выбираемых параметров схемных элементов исследуемой системы:

$$nom_1 = \{ x_1^1, x_1^2, ..., x_1^{r_1} \},\ x_1^1 < x_1^2 < ... < x_1^{r_1};\ \ldots;$$

$$nom_n = \{ x_n^1, x_n^2, ..., x_n^{r_n} \},\ x_n^1 < x_n^2 < ... < x_n^{r_n}.$$

Решение данной задачи предлагается провести как двухэтапную параллельную процедуру.

На первом этапе предлагается ограничить пространство поиска брусом допусков, проведя аппроксимацию области работоспособности путем построения описанного параллелепипеда. Используя изложенный в [5] параллельный алгоритм построения описанного бруса, построим брус $B_0 \subseteq B_d$:

$$B_0 = \{\boldsymbol{x} \in R^n \mid a_i^0 \le x_i \le b_i^0,\ i = \overline{1,n}\},$$

где $a_i^0 = \min\limits_{\boldsymbol{x} \in D_x} x_i$; $b_i^0 = \max\limits_{\boldsymbol{x} \in D_x} x_i$.

Важно отметить, что при построении описанного параллелепипеда нет необходимости нахождения области работоспособности в пространстве внутренних параметров D_x, что существенно уменьшает трудоемкость предлагаемого алгоритма [5].

На втором этапе сформируем дискретное множество номиналов внутренних параметров

$$D_{\text{н}}^{\text{вн}} = \{ \boldsymbol{x}_{\text{н}}^{\text{вн}} :\ a_i^0 \le x_i^1 \le b_i^0,\ x_i \in nom_i,\ i = \overline{1,n} \},$$

в каждой точке $\boldsymbol{x}_{\text{н}}^{\text{вн}}$ которого необходимо найти значение целевой функции. Искомый оптимальный вектор номиналов $\boldsymbol{x}_{\text{н}}^{\text{опт}}$ находим, решая задачу (2) или (7).

В простейшем случае нахождение решения этих задач сводится к полному перебору элементов множества $D_{\text{н}}^{\text{вн}}$, для каждого из которых осуществляется расчет соответствующей целевой функции. Учитывая цикличность процедуры вычисления целевой функции, несложно применить параллелизм по данным.

Множество $D_{\text{н}}^{\text{вн}}$ разбивается на непересекающиеся подмножества $D_{\text{н}}^{\text{вн}} = \bigcup_{i=1}^{k} \{D_{\text{н}}^{\text{вн}}{}_i\}$, при этом каждому j-му процессору назначается свое подмножество $D_{\text{н}}^{\text{вн}}{}_j$ исходных данных. Таким образом, каждый j-й процессор осуществляет расчет целевой функции для всех элементов множества $D_{\text{н}}^{\text{вн}}{}_j$ и находит оптимальный вектор номиналов параметров для своей подобласти. Результаты передаются главному процессору, который производит выбор оптимального вектора номиналов по всей области $D_{\text{н}}^{\text{вн}}$. Такое разбиение всего множества поиска на непересекающиеся подмножества составляют суть блока диспетчеризации параллельного распределенного процесса.

Для симметричного вычислительного кластера, состоящего из k равных по мощности вычислительных узлов, общее число точек разбивается на равные количества для каждого из подчиненных процессов. В случае несимметричного кластера необходимо провести предварительную оценку трудоемкости типовой процедуры метода оптимизации, в качестве которой выступают однократное моделирование работы системы, проверка условий работоспособности и вычисление значений критерия запаса работоспособности. При этом вычислительная нагрузка делится между компонентами комплекса пропорционально их производительности.

По окончании работы программы диспетчеризации вычислительного процесса каждому вычислительному компоненту комплекса рассылаются границы его подмножества $D_{\text{н}}^{\text{вн}}{}_j$ исходных данных. По окончании счета главный процессор получает результаты от подчиненных и проводит формирование окончательных результатов дискретной оптимизации на всем множестве $D_{\text{н}}^{\text{вн}}$.

Заключение

Параллельный подход обладает достаточно высокими характеристиками производительности, т.к. обмен между процессорами сводится к минимуму – назначению заданий и заключительной передаче результатов. Выполнение испытаний на процессорах не синхронизируется. При одинаковых мощностях подобластей $D_{\text{н}}^{\text{вн}}{}_j$ и равных временных затратах на вычисление целевой функции на симметричных кластерах ускорение параллельного алгоритма сканирования практически достигает линейного. Наличие внутренних циклов порождает высокую масштабируемость алгоритма, главным условием эффективной реализации которого является пропорциональная загрузка всех участвующих в вычислениях процессоров.

Список литературы

1. **Абрамов, О. В.** Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности / О. В. Абрамов. – М. : Наука. 1992.
2. **Бусленко, Н. П.** Метод статистических испытаний / Н. П. Бусленко, Ю. А. Шрейдер. – М. : Наука, 1961.

3. **Абрамов, О. В.** Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации параметрической надежности / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева // Надежность. – № 4. – 2005. – С. 19–26.
4. **Абрамов, О. В.** Оптимальный параметрический синтез по критерию запаса работоспособности / О. В. Абрамов, Я. В. Катуева, Д. А. Назаров // Проблемы управления. – № 6. – 2007. – С. 64–69.
5. **Абрамов, О. В.** Параллельные алгоритмы построения области работоспособности / О. В. Абрамов, Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, Я. В. Катуева // Информатика и системы управления. – № 2. – 2004. – С. 121–133.

Абрамов Олег Васильевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий отделом проблем
надежности и качества,
Институт автоматики
и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН

Abramov Oleg Vasilevich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
the head of department of problems
of reliability and quality,
Institute of automatics
and managerial processes
of Far East branch of the Russian
Academy of Sciences

E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

УДК 681.3.013.2: 62-192

Абрамов, О. В.

Параллельные алгоритмы расчета и обеспечения параметрической надежности / О. В. Абрамов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 31–39.

УДК 550.34

О. А. Никонорова

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ПРИЛИВНЫМ ВАРИАЦИЯМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Аннотация. Проведен системный анализ прогнозных алгоритмов природных катастроф, в том числе оценена эффективность алгоритма прогноза землетрясений по приливным вариациям силы тяжести, которая составила от 1,56 до 1,89. Рассмотрены результаты ретроспективного анализа сейсмичности южной части Курильских островов в 2007 г. по алгоритму краткосрочного прогноза землетрясений по приливным вариациям силы тяжести согласно данным оперативного каталога Мирового центра данных за период времени с 1983 по 2006 гг. для глубин 0–60 км.

Ключевые слова: системный анализ, ретроспективный анализ, землетрясение, проноз.

Abstract. Efficiency of algorithm of the forecast of earthquakes on tidal variations of a gravity which has made from 1,56 till is estimated. Results of the retrospective analysis of seismicity of a southern part of Kuriles in 2007 on algorithm of the short-term forecast of earthquakes on tidal variations of a gravity according to the operative catalogue of the World centre of data during time with 1983 for 2006 for depths of 0–60 km are considered.

Keywords: the system analysis, the retrospective analysis, earthquake, the forecast.

Введение

Возникновение чрезвычайных ситуаций в первую очередь обусловлено объективно существующими очагами зарождения и развития неблагоприятных стихийных явлений. Своевременный прогноз землетрясений, лидирующих среди чрезвычайных ситуаций по экономическому ущербу и занимающих одно из первых мест по числу человеческих жертв, на любой стадии позволяет уменьшить возможный ущерб и предотвратить гибель людей.

В последние годы отмечен несомненный прогресс в решении проблемы прогноза сильных землетрясений. Существующие алгоритмы в основном построены на работах, связанных с поиском и использованием феноменов, предшествующих возникновению землетрясений. Разработки в этом направлении выполнены В. И. Кейлис-Бороком, В. Г. Кособоковым, Г. А. Соболевым, Ю. С. Тюпкиным, П. Н. Шебалиным, А. Д. Завьяловым и др.

В настоящее время большой интерес исследователей вызывают явления природного и техногенного воздействия на недра Земли и триггерные эффекты в глубинах в ответ на такие воздействия.

Приливные вариации силы тяжести можно рассматривать как тектонический фактор [1]. Интерес представляет сопоставление моментов землетрясений с вычисленными на этот момент времени вариациями компонент приливной силы. В настоящей работе рассматривается методика прогноза сильных землетрясений по приливным вариациям силы тяжести, вычисленным на момент землетрясений, оценена эффективность предложенной методики.

1 Методика исследования

Рассматривается каталог землетрясений, представленный значениями времени события, его географических широты и долготы, магнитуды и глубины $(t_k, \varphi_k, \lambda_k, M_k, L_k)$, $k = \overline{1, K}$. Используем оперативный сейсмологический каталог Мирового центра данных по физике твердой земли в виду его общедоступности в сети Интернет [2].

Выделяется последовательность землетрясений, произошедших за период времени с 1983 по 2006 гг. в южной части Курильских островов (так как глубоководный Курило-Камчатский желоб сейсмически чувствителен к различным компонентам приливной силы [3]) с магнитудой $M \geq 5{,}0$, глубиной до 60 км и с географическими координатами эпицентра, принадлежащими области ячейки с вершинами в точках $(\varphi^0 - 0{,}5^0; \lambda^0 - 0{,}5^0)$, $(\varphi^0 + 0{,}5^0; \lambda^0 - 0{,}5^0)$, $(\varphi^0 + 0{,}5^0; \lambda^0 + 0{,}5^0)$, $(\varphi^0 - 0{,}5^0; \lambda^0 + 0{,}5^0)$.

Пороговое значение магнитуды в данном случае обусловлено тем, что землетрясения именно с такой магнитудой могут вызвать сотрясения с интенсивностью от 7 баллов и выше, что представляет опасность для строительных конструкций, зданий и сооружений [4, с. 74].

Длина разрывов в очагах указанных землетрясений должна составлять 6–11 км [5], а линейный размер области подготовки землетрясения – примерно 10 длин разрывов, т.е. 60–110 км. Тогда рассматриваемый размер ячейки для выбранного нами региона согласуется с размерами области подготовки землетрясения, т.к. составляет примерно 80 на 111 км для ячеек 1, 2 и 3, изображенных на рис. 1.

Рис. 1 Фрагмент карты южной части Курильской гряды

Для каждой ячейки очищаем данные от группируемости и афтершоков, используя методику [6], которая заключается в следующем.

Начиная с первого события, упорядоченного по времени каталога, последовательно анализируются все события. Пусть $d(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2)$ – расстояние между точками (φ_1, λ_1) и (φ_2, λ_2). Если для пары событий с индексами i и j выполняются следующие условия:

$$t_i \le t_j,\ d\left(\varphi_i, \lambda_i, \varphi_j, \lambda_j\right) \le W_r\left(M_i\right),\ \left(t_j - t_i\right) \le W_t\left(M_i\right), \qquad (1)$$

то событие j является афтершоком, а событие i – основным толчком. Афтершоки исключаются из дальнейшего рассмотрения. Значения порогов $W_r\left(M\right)$ и $W_t\left(M\right)$ берутся согласно табл. 1.

Таблица 1

Значения порогов по времени и расстоянию

Магнитуда	$W_t\left(M\right)$, сутки	$W_r\left(M\right)$, км
$5{,}0 \le M \le 5{,}5$	193	47
$5{,}5 \le M \le 6{,}0$	415	54
$6{,}0 \le M \le 6{,}5$	790	61
$6{,}5 \le M$	915	70

Используя полученные данные, строим матрицу исследования.

Для построения матрицы исследования проводится предварительный расчет:

– t^* – местного времени в часах от начала системы отсчета (это количество дней до землетрясения, умноженное на 24 и сложенное с местным временем землетрясения в часах), причем отсчет идет от начала 1983 г. и далее нарастающим итогом в часах;

– x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – значений приливных изменений силы тяжести, скорости, ускорений, третьей и четвертой производных приливных изменений силы тяжести соответственно на час, в котором произошло каждое землетрясение из матрицы наблюдений в зависимости от географического положения.

Для расчета приливных сил используется подход, предложенный Лапласом и основанный на классической (ньютоновской) модели взаимодействия трех тел – Земли, Луны и Солнца.

Достаточно рассматривать вертикальную компоненту приливного вектора (2), поскольку она меньше подвержена влиянию океанического прилива.

$$F = k\left(3\cos^2 Z - 1\right), \qquad (2)$$

где Z – зенитное расстояние Луны (Солнца), которое можно получить из соотношения (3); $k = \dfrac{fmr}{R^3}$; f – постоянная тяготения; m – масса Луны (Солнца); r – радиус Земли; R – расстояние от Земли до Луны (Солнца).

$$\cos z = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos H, \qquad (3)$$

где φ – широта места наблюдения; δ – склонение светила; H – часовой угол Луны.

Используя выражения (2) и (3), можно рассчитать значения приливных изменений силы тяжести. Значения скорости, ускорения, третьей и четвертой производных приливной силы тяжести рассчитываются методом численного дифференцирования, методом Лагранжа.

Рассчитываем коэффициенты для математической модели (4) методом наименьших квадратов.

$$t^*\left(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\right) = \sum_{j=1}^{5}\sum_{i=0}^{4} b_{ji} x_j^i \ , \qquad (4)$$

где j – номер независимой переменной, $j = \overline{1,5}$; i – степень полинома; b_{ji} – коэффициент разложения.

Для осуществления прогноза времени землетрясений по математической модели (4) используется следующий алгоритм [7]:

1. Рассчитать x_1 – приливную силу тяжести, x_2 – скорость, x_3 – ускорение, x_4 – третью и x_5 – четвертую производные приливной силы тяжести на прогнозируемый период для центра ячейки, для которой были рассчитаны коэффициенты рассматриваемой математической модели.

2. Значения x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 в ноль часов первого дня прогнозируемого периода подставить в математическую модель (4) и вычислить модельное время землетрясения.

3. Если вычисленное по модели время будет отличаться от времени отсчета «ноль часов» первого дня прогнозируемого периода в задаваемых границах, то промежуток времени от первого дня прогнозируемого периода до дня, полученного по модели, принимается как время тревог.

4. Аналогично рассмотреть все остальные часы и дни отсчета прогнозируемого периода и выделить время тревог.

Оценку эффективности осуществляем, используя подход, использованный А. А. Гусевым [8]. Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность J_t данного метода определяется по формуле

$$J_t = \frac{n}{N\dfrac{T_{tr}}{T_{all}}} \ , \qquad (5)$$

где n – количество землетрясений, соответствующих успешному прогнозу; N – общее количество произошедших землетрясений с параметрами (местоположение – энергия), соответствующими прогнозу, т.е. землетрясений, которые должны бы предсказываться; T_{tr} – общее время тревоги, т.е. суммарная длительность всех прогнозов; T_{all} – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу.

В этом случае знаменатель дроби отражает среднее число возникновений землетрясений за время T_{tr} в случае отсутствия связи прогнозов с землетрясениями. Соответственно, эффективность J_t показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в тревожное время случайным образом. Очевидно, что при случайном угадывании эффективность $J_t = 1$.

Интерпретацию полученных значений показателя эффективности проводим согласно [4, с. 73], т.е. опираясь на данные, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Качественная характеристика
информативности показателя эффективности J_t

Характеристика информативности прогностического признака	Эффективность, J_t
Бесполезный (использование данного признака, как правило, не приведет к заметному улучшению прогноза)	< 1,2
Не очень полезный (признак не очень информативен, но его не следует сразу отбрасывать, т.к. он, возможно, окажется эффективным в сочетании с другими признаками)	≅1,5
Полезный	1,5–2,0
Весьма полезный	> 2,7

2 Результаты исследования

Проведем оценку эффективности прогнозов по рассмотренной выше методике исключительно формально, не обращая внимания на физическую обоснованность используемого подхода к прогнозированию.

После проведения ряда подготовительных процедур из начального набора ячеек выделены те, в которых количество наблюдений составляло не менее 25 (обозначены цифрами на рис. 1). Построены матрицы исследования средствами программного комплекса для прогноза геофизических параметров по приливным вариациям силы тяжести [9]. В качестве примера на рис. 2 приведена матрица наблюдений, составленная по данным произошедших землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ и глубиной до 60 км без афтершоков и группируемости для ячейки 3.

Для рассматриваемых ячеек 1, 2, и 3 средствами того же программного комплекса получены математические модели соответственно (6), (7) и (8) по данным, не включая данные прогнозируемого года. Согласно описанной выше методике проведен ретроспективный прогноз на 2007 г. по моделям (6) и (8) и на 2005 г. по модели (7).

$$t^*(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5) = (-0,000327)x_1^4 + 0,533x_1^3 + (-104,944)x_1^2 + 8263,49x_1 +$$
$$+0,0078x_2^4 + 0,343x_2^3 + (-13,815)x_2^2 + (-671,73)x_2 + 0,795x_3^4 + 14,47x_3^3 +$$
$$+(-65,34)x_3^2 + (-738,3)x_3 + 1,905x_4^4 + (-13,97)x_4^3 + (-107,52)x_4^2 + 145,61x_4 +$$
$$+(-206,9)x_5^4 + 937,79x_5^3 + 755,23x_5^2 + (-7445,5)x_5 - 103479,55. \qquad (6)$$

$$t^*(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5) = (-0,00007)x_1^4 + (-1,976)x_1^3 + 15,66x_1^2 +$$
$$+(-2321,38)x_1 + (-0,013)x_2^4 + (-1,07)x_2^3 + (-42,32)x_2^2 + 2025,117x_2 +$$
$$+5,09x_3^4 + 104,6x_3^3 + (-366,98)x_3^2 + (-19183,9)x_3 + (-13,22)x_4^4 +$$
$$+(-199,08)x_4^3 + 1925,82x_4^2 + 16853,93x_4 + (-2616,138)x_5^4 +$$
$$+7477,91x_5^3 + 24182,75x_5^2 + (-88623,68)x_5 + 181668,5. \qquad (7)$$

$$t^*(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5)=0,00052x_1^4+(-0,24)x_1^3+17,5x_1^2+1256,08x_1+$$
$$+(-0,0258)x_2^4+1,078x_2^3+(-81,86)x_2^2+447,28x_2+(-7,38)x_3^4+(-100,9)x_3^3+$$
$$+1796,9x_3^2+1604,84x_3+36,85x_4^4+(-212,4)x_4^3+3186,93x_4^2+12401,7x_4+$$
$$+6607,6x_5^4+(-3740,57)x_5^3+(-48437,95)x_5^2+(-18613,86)x_5-7250,03. \quad (8)$$

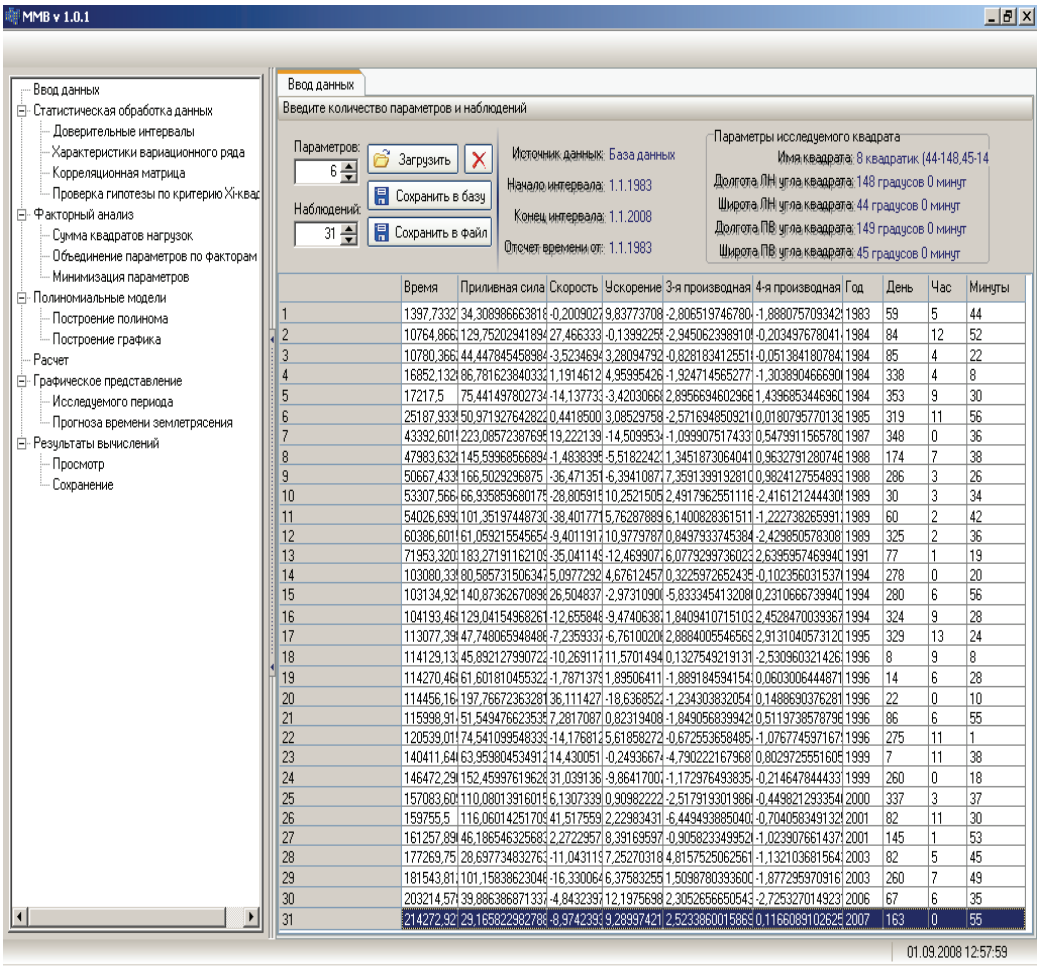


Рис. 2 Матрица наблюдений для ячейки 3

В ячейке 1 в 2007 г. зафиксировано с рассматриваемыми параметрами магнитуды $M \geq 5$ и глубиной до 60 км три землетрясения, произошедшие на 70, 228 и 238-й день от начала года. При проведении ретроспективного прогноза для этой ячейки по модели (6) согласно алгоритму прогноза, описанному выше, где в качестве задаваемых границ в п. 3 рассматривалось значение 1200 ч, которое получено эмпирическим путем, определено следующие время тревог: с 3 по 15-й, с 80 по 84-й, с 91 по 153-й и с 182 по 260-й день 2007 г. Таким образом, имеем один пропуск цели – это землетрясение, которое было на 70-й день.

Для ячейки 2 землетрясений в 2007 и 2006 гг. с указанными параметрами не было, поэтому рассмотрен ретроспективный прогноз времени землетрясения на 2005 г., в котором землетрясение было на 269-й день от начала этого года. По модели (7) получено следующее время тревог: с 1 по 60-й, с 81 по 96-й, с 129 по 146-й, с 202 по 205-й, с 247 по 346-й день 2005 г.

Для ячейки 3 землетрясение с рассматриваемыми параметрами было на 163-й день от начала 2007 г. Путем применения описанного алгоритма и построенной математической модели (8) выделено следующее время тревог для этой ячейки на 2007 г.: с 2 по 22-й, с 26 по 92-й и с 134 по 272-й день.

Рассчитаем эффективность алгоритма прогноза для рассматриваемых ячеек по формуле (5).

Для ячейки 1 получаем общее время тревоги $T_{tr} = 156$ дней, общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу $T_{all} = 365$ дней, два землетрясения из трех произошедших считаем спрогнозированными, поэтому эффективность прогноза составляет $J_t = 1{,}56$.

Для ячейки 2 $T_{tr} = 193$ дня, $T_{all} = 365$ дней, спрогнозировано одно землетрясение из одного произошедшего с рассматриваемыми параметрами, следовательно, эффективность в данном случае составляет $J_t = 1{,}89$.

Для ячейки 3 $T_{tr} = 224$ дня, $T_{all} = 365$ дней, спрогнозировано одно землетрясение из одного произошедшего с рассматриваемыми параметрами, следовательно, эффективность в данном случае составляет $J_t = 1{,}63$.

Полученные результаты являются обнадеживающими: из рассмотренных пяти землетрясений лишь одно было пропущено при использовании данной методики, причем показатель эффективности принимает значения от 1,56 до 1,89, что свидетельствует, согласно качественной характеристике информативности показателя эффективности J_t, представленной в табл. 2, о полезности предложенной модели прогноза сильных землетрясений по приливным вариациям силы тяжести.

Список литературы

1. **Авсюк, Ю. Н.** Приливные силы и природные процессы / Ю. Н. Авсюк. – М. : ОИФЗ, 1997. – 188 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/hp/seismology.ru.html
3. **Юрков, Е. Ф.** О связи сейсмичности с фазами приливных волн / Е. Ф. Юрков, В. Г. Гиттис // Физика Земли. – 2005. – № 4. – С. 4–15.
4. **Завьялов, А. Д.** Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация / А. Д. Завьялов ; Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – М. : Наука, 2006. – 254 с.
5. **Ризниченко, Ю. В.** Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент / Ю. В. Ризниченко // Исследования по физике землетрясений. – М. : Наука, 1976. – С. 9–27
6. **Шебалин, П. Н.** Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания менее года / П. Н. Шебалин // Алгоритмы прогноза землетрясений. – М. : ГЕОС, 2006. – С. 87. – (Вычислительная сейсмология; вып. 37).
7. **Чепасов, В. И.** Прогноз землетрясений по приливным вариациям силы тяжести / В. И. Чепасов, О. А. Никонорова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 10. – Ч. 2. – С. 370–373.

8. **Гусев, А. А.** Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности / А. А. Гусев // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. – Новосибирск : Наука, 1974. – С. 109–119.
9. **Чепасов В. И., Никонорова О. А.** Программный комплекс для прогноза геофизических параметров по приливным вариациям силы тяжести. – Св. об официальной регистрации программы для ЭВМ, зарегистрировано в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2007614269, 08.10.2007.

Никонорова Олеся Александровна
старший преподаватель,
кафедра информационных
систем и технологий,
Оренбургский государственный
университет

Nikonorova Olesya Aleksandrovna
the senior teacher,
chair of information systems
and technologies,
the Orenburg state university

E-mail: onical@yandex.ru

УДК 550.34

Никонорова, О. А.

Оценка эффективности алгоритма прогноза землетрясений по приливным вариациям силы тяжести / О. А. Никонорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 40–47.

УДК 368.3.068

В. Б. Алмаметов, А. В. Затылкин,
И. Д. Граб, В. С. Зияутдинов, С. В. Щербакова

МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ С ВНЕШНИМ ОБЪЕКТОМ ИЗУЧЕНИЯ

Аннотация. Дан анализ современных подходов к формированию профессиональных знаний и навыков у специалистов, деятельность которых связана с разработкой сложных технических объектов. Предложена архитектура интеллектуальной компьютерной обучающей системы, отличающейся наличием внешнего объекта изучения, который объединяет процессы обучения и тренинга и позволяет не только передавать обучаемым профессиональные знания, но и формировать у них профессиональные навыки и умения.

Ключевые слова: методология, интеллектуальная компьютерная система обучения, архитектура системы, новые информационные технологии.

Abstract. The analysis of modern approaches to development (of) the professional knowledge and skills for specialists is given, theirs activities are connect with working out of difficult technical objects. The architecture of the intellectual computer training system is offered. The architecture differs to availability external object of studying. Its integrate learning and training processes, allowing transfer professional skills and develop professional knowledge and skills to trainees.

Keywords: methodology, intellectual computer system of training, architecture of the system, new information technologies.

Введение

Сейчас уже можно с полной уверенностью утверждать, что развитие информационных технологий создало необходимую основу для превращения компьютерных средств обучения из информационного приложения традиционных методик преподавания в новое средство обучения, радикально изменяющее технологию подготовки современных специалистов. Качественные изменения инструментария разработки компьютерных средств обучения предполагают разработку новых методических подходов к организации процессов подготовки специалистов в различных областях знаний. Это позволит, с одной стороны, систематизировать уже накопленный опыт в данной области, с другой – сформулировать основные требования ко вновь разрабатываемым системам автоматизированного обучения.

Очевидно, что развитие компьютерных средств учебного назначения на базе новых информационных технологий должно естественным образом опираться на практику существующих результатов в области разработки электронных средств обучения. По мнению авторов, одной из важнейших проблем компьютерного обучения на сегодняшний день является проблема создания интеллектуальных компьютерных обучающих систем (ИКОС), способных обеспечить эффективную организацию процессов теоретического обучения и получения практических навыков. Данная работа посвящена именно этой проблематике.

1 Постановка задачи

В настоящее время существует множество обучающих систем по самым различным предметным областям. Возможности таких систем колеблются от простейших (позволяют проводить тестирование, сохранять его результаты, а затем предоставлять их) до достаточно сложных. Они могут быть снабжены различными средствами анализа результатов обучения (например, статистическая обработка результатов), оформления отчетов по различным критериям, установки параметров вопросов (например, коэффициент сложности), параметров тестов (например, ограничение времени тестирования), разграничения прав доступа и т.д. Некоторые системы могут использоваться при работе в локальных и глобальной сетях.

Различаются системы и по типам вопросов. Чаще всего имеется возможность создавать только одновариантные вопросы (дается несколько вариантов ответов, из которых только один является правильным). Более сложные системы позволяют использовать несколько типов вопросов: многовариантные (несколько вариантов ответов, из которых правильных может быть несколько или все), открытые (обучаемый должен ввести ответ сам), на нахождение соответствия (дается два списка, требуется для каждого элемента первого списка установить подходящий к нему элемент второго списка). Примерами таких программ являются системы Ассистент, Мастер Тест, Система Электронного Тестирования (сетевая версия), Экзаменатор, AnyTest, SunRav TestOfficePro, Teaching Templates (система веб-тестирования), TestMaker и многие другие [1–3].

Следующим классом программ являются средства разработки самих обучающих систем, которые создают рабочую среду для процессов обучения и проведения тестов. Некоторые из них позволяют осуществлять связь тестовых вопросов с теоретическими темами: например, при неправильном ответе на вопрос обучаемый может получить объяснение, в чем состоит его ошибка, или вернуться к изучению связанного с вопросом теоретического материала. Примерами таких программ являются Адонис, Кадис, Наставник [3, 4].

Отдельно стоит отметить системы, предназначенные для создания мультимедийных справочников, энциклопедий, словарей. Основные достоинства таких систем – удобство представления информации, быстрота поиска, возможность быстро создавать сложные информационные системы, быстро объединять множество файлов в единую систему. Функции контроля и тренировки в них отсутствуют. Примером такой программы является пакет HyperMethod [5].

Анализ существующих обучающих систем показывает, что их подавляющее большинство является электронными учебниками с односторонней передачей информации от обучающей системы к обучаемому, дополненными в лучшем случае системами тестового контроля знаний. При этом в основном работы в области компьютерных средств учебного назначения имеют прикладной характер и нацелены на создание узкоспециализированных обучающих программ, являющихся либо электронными аналогами существующих учебных курсов, либо элементами технических средств обучения в рамках тех же существующих учебных курсов. Как следствие, значительная часть этих программных продуктов – это специализированные авторские разработки, отражающие сложившиеся в конкретном учеб-

ном заведении потребности практики обучения и субъективные взгляды их создателей на методы компьютерного обучения.

На начальном этапе развития средств электронного обучения наличие специализированных обучающих компьютерных систем позволяло значительно повысить эффективность традиционных методик обучения, дополнив и расширив их функциональные и дидактические возможности. Однако в настоящее время наличие широкого спектра разнородных и функционально перекрывающихся программных обучающих пакетов прикладных программ создает определенные неудобства. Во-первых, это затрудняет выбор необходимой системы обучения на рынке существующих, во-вторых, при разработке новой системы отсутствует научно обоснованная методологическая база для ее создания как элемента отдельного класса компьютерных средств учебного назначения.

2 Методология обучения

Основой разработки методологического подхода к обучению на основе использования новых информационных технологий, на взгляд авторов, должен являться концептуальный анализ характера человеческого знания как специфического объекта передачи, которая осуществляется в процессе обучения. Результаты этого анализа, в свою очередь, являются базой для формирования соответствующего инструментария обучения, позволяющего с наибольшей эффективностью осуществить передачу знаний от системы обучения к обучаемому.

В основе данного анализа лежит уже сложившееся к настоящему времени выделение в человеческом знании двух основных аспектов – декларативного и процедурного. Первый из них характеризует существующие факты и закономерности конкретной предметной области и носит повествовательный характер, второй связан с описанием способов и процедур решения задач в данной области знания. Анализ конкретной предметной области с точки зрения соотношения указанных видов знания позволяет выбрать наиболее приемлемый вариант организации автоматизированной обучающей системы (АОС).

Для большинства технических специальностей, ориентированных на приобретение обучаемым не только знаний, но также навыков и умений, необходимо создание обучающей системы, объединяющей процессы обучения и тренинга, позволяющей эффективно работать с декларативными и процедурными знаниями, формируя у обучаемых профессиональные навыки и умения. Это, в частности, касается инженерных специальностей, связанных с разработкой радиоэлектронных средств (конструкторов и технологов).

Очевидно, что при разработке концепции обучающей системы необходим комплексный подход, учитывающий различные аспекты ее создания и функционирования. К ним прежде всего относится методология обучения и особенности архитектуры системы.

В настоящее время одной из наиболее интересных, с точки зрения авторов, теорий, обосновывающих методику последовательного формирования профессиональных знаний, умений и навыков, является широко известная в современной психологической науке теория поэтапного формирования умственных действий и понятий (П. Я. Гальперин, Н. Ф. Талызина). Процесс

усвоения знаний рассматривается как учебно-познавательная деятельность обучаемого, которая осуществляется в виде четко различимых по форме действий (материальная, речевая, умственная деятельность), состоящих из психических операций в каждом упражнении и следующих друг за другом в строго определенной последовательности согласно установленной системе. В соответствии с этим процесс обучения разбит на ряд этапов, каждый из которых предназначен для решения конкретной дидактической задачи по формированию определенного навыка (табл. 1) [6].

Таблица 1

Этапы формирования профессиональных навыков

Название этапа	Основные задачи этапа	Средства обучения	Уровень обученности (по Маркварду)
Начальный	Мотивация, целеполагание, общая ориентировка	Доска, плакаты, кино- и аудиовизуальные средства	Предвосхищение, смутное понимание
Ключевой	Создание схемы ООД (ориентировочные основы действий)	АОС	Смутное достигнутое понимание
Материальный	Знания производственного процесса, принципов управления, нормативных документов	АОС, динамические модели, функциональные тренажеры	Достигнутое понимание
Речевой	Умения решать стандартные производственные задачи	Процедурные тренажеры	Воспроизведение
Умственный	Умения решать нестандартные производственные задачи	Процедурные тренажеры	Освоение-творчество
Завершающий	Навыки сложных действий	Комплексные тренажеры	Творчество по отношению к сложному действию
Коррекции	Доводка и коррекция умений и навыков	Рабочее место	

На первых этапах обучения доминирующее положение занимает декларативная составляющая профессионального знания, при этом делается акцент на основных понятиях, формируется общее представление об объектах предметной области, их свойствах и отношениях между ними. По мере овладения обучаемым основными элементами конкретного знания на последующих этапах все большее внимание уделяется элементам процедурного характера, позволяющим использовать уже полученные знания для решения типовых задач. На заключительных этапах обучения знания и навыки используются обучаемым для решения реальных задач, возникающих в конкретной предметной области.

Развитие современных информационных технологий предоставило в распоряжение разработчиков средств автоматизированного обучения целый ряд принципиально новых средств, позволяющих значительно расширить инструментарий обучения и тем самым кардинально повысить эффективность реализации рассмотренных этапов обучения.

Прежде всего, следует отметить методы и технологии построения систем визуализации и обработки информации – мультимедиа, гипертекста, геоинформационных систем. Использование данных технологий позволяет не только изменить форму, количество и темпы предоставления информации обучаемым, но и качественно изменить методологию обучения, дополнив традиционные методы передачи знаний новыми, ранее не используемыми.

Кроме этого, активно развиваются методы инженерии знаний, позволяющие оперировать не только фактическими данными, но и знаниями специалистов. При этом указанные методы предполагают рассмотрение знаний в динамике, в соответствии с реальными изменениями знаний в конкретной профессиональной области. Данные методы уже получили практическую реализацию в рамках экспертных систем. Методы инженерии знаний представляют в настоящее время реальную методологическую основу для накопления, организации и передачи знаний в конкретных областях профессиональной деятельности, обеспечивая преемственность развития этих областей.

Следует также отметить значительное развитие различных систем моделирования на основе традиционных математических методов и моделей. В частности, стало возможным использование сложных математических и имитационных моделей различных объектов и процессов вследствие значительного увеличения вычислительной мощности компьютеров.

Наконец, развитие средств телекоммуникации позволило снять пространственные ограничения на доступ к источникам информации и сделать ее доступной всем заинтересованным категориям пользователей.

3 Внедрение методики обучения

Использование результатов применения новых информационных технологий и методологии теории поэтапного формирования умственных действий и понятий позволило авторам разработать архитектуру интеллектуальной компьютерной системы (рис. 1) [7].

Отличием архитектуры ИКОС является использование концепции выделения внешнего объекта изучения (ОИ), состоящего из базы знаний (БЗ) предметной области, лабораторного блока и системы автоматизированного проектирования (CAD-системы), в отдельный внешний блок. Объект изучения информационно обособлен от собственно системы обучения, реализующей управление процессом формирования знаний и умений обучаемого.

Взаимодействие ОИ и ИКОС осуществляется через единый объектный интерфейс технических систем или напрямую (работа с БЗ предметной области). Объект изучения, реализованный внешним подключаемым модулем, позволяет перепрофилировать ИКОС на другую предметную область, лишь заменяя один ОИ на другой.

Интеллектуальный интерфейс пользователя ИКОС отвечает за организацию диалога с пользователем, оптимальным образом приводя к достиже-

нию цели общения человека и ИКОС. Через него обучаемый получает учебный материал в виде текста, мультимедиа.

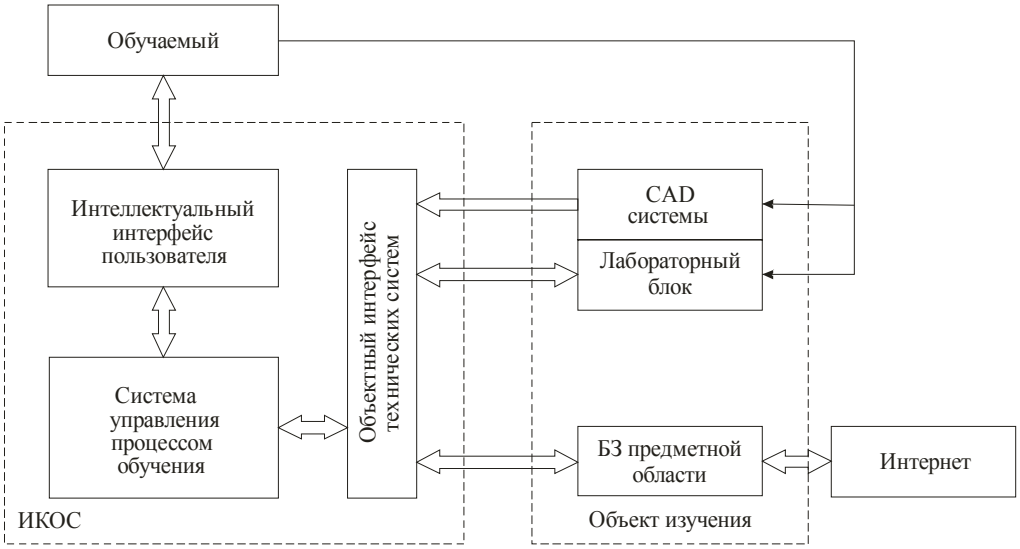


Рис. 1 Архитектура ИКОС с внешним объектом изучения

Объектный интерфейс технических систем служит для анализа информации, полученной от БЗ предметной области, лабораторного блока и CAD-системы, и принятия решения о действиях обучаемого, помогая системе управления процессом обучения вырабатывать ту или иную стратегию обучения и контроля.

Заключение

Таким образом, разработка архитектуры ИКОС с внешним объектом изучения, реализующей методологию поэтапного формирования профессиональных знаний и умений, позволяет создать новое средство обучения, качественно изменяющее технологию подготовки современных специалистов.

Список литературы

1. **Бобров, Л. К.** Адаптивная система компьютерного тестирования [Электронный ресурс] / Л. К. Бобров, Р. Т. Сунгатулин. – Режим доступа: http://www.gpntb.ru/win/interevents/crimea2000/doc/tom1/333/Doc10.HTML
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:www.http://www.sunrav.ru
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:www.alltest.ru
4. **Соловов, А. В.** Дидактика и технология электронного обучения в системе КАДИС [Электронный ресурс] / А. В. Соловов. – Режим доступа: http://cnit.ssau.ru/do/articles/kadis/kadis.htm
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:www.HyperMethod.com
6. **Талызина, Н. Ф.** Педагогическая психология : учебное пособие / Н. Ф. Талызина. – М. : Академия, 1998. – 288 с.
7. Архитектура ИКОС с внешним объектом изучения / Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов, А. В. Затылкин и др. // Надежность и качество : труды Международного симпозиума / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – Т. 1.

Алмаметов Валерий Борисович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

Almametov Valery Borisovich
a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
chair of designing
and radio equipment manufacture,
the Penza state university

Затылкин Александр Валентинович
аспирант,
Пензенский государственный
университет

Zatylkin Alexander Valentinovich
the post-graduate student,
the Penza state university

Граб Иван Дмитриевич
аспирант,
Пензенский государственный
университет

Grab Ivan Dmitrievich
the post-graduate student,
the Penza state university

Зияутдинов Владимир Сергеевич
кандидат педагогических наук, доцент,
кафедра электроники телекоммуникаций
и компьютерных технологий,
Липецкий государственный
педагогический университет

E-mail: zvs@lspu.lipetsk.ru

Zijautdinov Vladimir Sergeevich
the candidate of pedagogical sciences,
the senior lecturer,
chair of electronics of telecommunications
and computer technologies,
Lipetsk state pedagogical university

Щербакова Светлана Владимировна
доцент, кафедра русского языка
как иностранного,
Институт международных отношений
Пензенского государственного
университета

Shcherbakova Svetlana Vladimirovna
the senior lecturer,
Russian chair as foreign,
Institute of the international relations of
the Penza state university

УДК 368.3.068

Алмаметов, В. Б.

Методология формирования профессиональных навыков в интеллектуальной компьютерной системе обучения с внешним объектом изучения / В. Б. Алмаметов, А. В. Затылкин, И. Д. Граб, В. С. Зияутдинов, С. В. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 48–54.

УДК 681.3.068

С. М. Аванский, С. В. Щербакова

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. Показано, что обучение человека может быть представлено как процесс подстраивания весов синапсов. При этом некоторые алгоритмы изменяют структуру сети, т.е. количество нейронов и их взаимосвязи. По аналогии с известными принципами самоорганизации нервных клеток построены алгоритмы обучения Хебба.

Ключевые слова: искусственный интеллект, обучающие системы, нейронные сети.

Abstract. It is shown, that training of the person can be presented, as process подстраивания scales синапсов. Thus some algorithms change network structure, that is quantity нейронов and their interrelations. By analogy to known principles of self-organising of nervous cages, algorithms of training Хебба are constructed.

Keywords: an artificial intellect, training systems, neural networks.

Введение

Термин «интеллект» (intelligence) происходит от латинского intellectus – ум, рассудок, разум, мыслительные способности человека. Соответственно, искусственный интеллект (ИИ) (artificial intelligence) обычно толкуется как свойство автоматических систем брать на себя отдельные функции интеллекта человека, например выбирать и принимать оптимальные решения на основе ранее полученного опыта и рационального анализа внешних воздействий.

Интеллектом называется способность мозга решать задачи (интеллектуальные) путем приобретения, запоминания, целенаправленного преобразования знаний в процессе обучения и адаптации к разнообразным обстоятельствам.

1 Психофизиологические особенности человека

Деятельность мозга (обладающего интеллектом), направленную на решение интеллектуальных задач, мы будем называть мышлением, или интеллектуальной деятельностью. Интеллект и мышление органически связаны с решением таких задач, как доказательство теорем, логический анализ, распознавание ситуаций, планирование поведения, игры и управление в условиях неопределенности. Характерными чертами интеллекта, проявляющимися в процессе решения задач, являются способность к обучению, обобщению, накоплению опыта (знаний и навыков) и адаптации к изменяющимся условиям в процессе решения задач. Благодаря этим качествам интеллекта мозг может решать разнообразные задачи, а также легко перестраиваться с решения одной задачи на другую. Таким образом, мозг, наделенный интеллектом, является универсальным средством решения широкого круга задач (в том числе неформализованных), для которых нет заранее известных стандартных методов решения.

Следует иметь в виду, что существуют и другие, чисто поведенческие (функциональные), определения. Так, по А. Н. Колмогорову, любая матери-

альная система, с которой можно достаточно долго обсуждать проблемы науки, литературы и искусства, обладает интеллектом. Другим примером поведенческой трактовки интеллекта может служить известное определение А Тьюринга. Его смысл заключается в следующем. В разных комнатах находятся люди и машина. Они не могут видеть друг друга, но имеют возможность обмениваться информацией (например, с помощью электронной почты). Если в процессе диалога между участниками игры людям не удается установить, что один из участников – машина, то такую машину можно считать обладающей интеллектом.

Кстати, интересен план имитации мышления, предложенный А. Тьюрингом. «Пытаясь имитировать интеллект взрослого человека, – пишет Тьюринг, – мы вынуждены много размышлять о том процессе, в результате которого человеческий мозг достиг своего настоящего состояния… Почему бы нам вместо того, чтобы пытаться создать программу, имитирующую интеллект взрослого человека, не попытаться создать программу, которая имитировала бы интеллект ребенка? Ведь если интеллект ребенка получает соответствующее воспитание, он становится интеллектом взрослого человека… Наш расчет состоит в том, что устройство, ему подобное, может быть легко запрограммировано…». Таким образом, создание интеллектуальной компьютерной обучающей системы (ИКОС) разделяется на две части: построение «программы-ребенка» и «воспитание» этой программы. Причем «воспитание» происходит как при заполнении программы данными, так и непосредственно в процессе работы с программой ИКОС обучаемого.

Забегая вперед, можно сказать, что именно этот путь используют практически все системы ИИ. Ведь понятно, что практически невозможно заложить все знания в достаточно сложную систему. Кроме того, только при использовании этого пути проявятся перечисленные выше признаки интеллектуальной деятельности (накопление опыта, адаптация и т.д.).

Так как создание искусственного интеллекта движется по пути копирования природных прообразов, ученые не прекращают спор на тему, можно ли считать алгоритмы обучения с учителем натуральными или же они полностью искусственны. Например, обучение человеческого мозга, на первый взгляд, происходит без учителя: на зрительные, слуховые, тактильные и прочие рецепторы поступает информация извне, внутри нервной системы происходит некая самоорганизация. Однако нельзя отрицать и того, что в жизни человека не мало учителей (и в буквальном, и в переносном смысле), которые координируют внешние воздействия. Вместе с тем, чем бы ни закончился спор приверженцев этих двух концепций обучения, они обе имеют право на существование.

2 Особенности компьютеризации обучения

Для высшего образования актуальной становится задача использования возможностей информационных технологий в моделировании исследовательской и профессиональной деятельности. Реформирование процесса обучения рассматривается в контексте создания таких педагогических технологий, которые бы обеспечивали переход от формально-дисциплинарного к проблемно-активному типу обучения. Эта задача напрямую связана с концептуальным обоснованием системной целостности учебно-предметной деятельности, сохраняющей в условиях информационной технологии обучения основные

этапы формирования умственных действий с использованием конструктивного анализа и моделирования предметных сред. В основе системного подхода к реформированию содержания и методов обучения лежит использование в образовательном процессе обучающей среды.

Общепринятый смысл обучения состоит в следующем: методом проб и ошибок или экспериментов с одной и той же исходной совокупностью данных происходит модификация системы, которая при этом демонстрирует на каждом следующем этапе экспериментов лучшие результаты, чем на предыдущем.

Центральной проблемой компьютерного обучения является проблема создания машинных обучающих программ, способных обеспечить эффективную организацию учебного курса, стратегий усвоения и режимов активного взаимодействия ученика с машиной.

Проблема обучения в дальнейшем рассматривается с нескольких точек зрения – с точки зрения самой функции обучения, анализа свойств окружающей среды и, наконец, взаимодействия обучающегося и среды.

При обучении ставятся, по крайней мере, две цели: извлечение информации из среды; повышение уровня данной информации и структурирование. С повышением уровня данных возрастает их универсальность в плане применения.

Помимо функций обучающегося, связанных с получением информации об объекте и повышением ее уровня, необходимы также функции управления процессом обучения.

Главное в обучении – повышение уровня обученности или достижение определенных навыков и даже развитие интеллекта или формирование личности. Основное – это научить человека мыслить самостоятельно.

Интеллектуальная обучающая среда должна быть основана на следующих эвристических правилах: констатация правильности ответа, подробная диагностика ошибок, обсуждение родственных задач, переход к новой теме. Более общие принципы должны быть выделены на уровне метаправил, определяющих возможность и порядок применения эвристических правил обучения. Блок обучения должен быть построен по принципу блока решения задач, причем база знаний его содержит правила, действующие на двух уровнях, а также включает в качестве аргументов правил данные, представленные в модели пользователя.

Разработка «правил обучения», не зависящих от семантики предметной области, в совокупности с инструментальными средствами проектирования систем решения задач на основе модели предметной области позволяет снизить трудозатраты на создание интеллектуальных обучающих систем.

Сегодня вопросам информатизации образования уделяется большое внимание на государственном уровне: выполняется приоритетный национальный проект «Образование», действуют различные федеральные целевые программы, привлекаются международные инвестиции. Благодаря этой поддержке в образовательные учреждения поставляется современная компьютерная техника, обеспечивается доступ к образовательным информационным ресурсам, предоставляется выход в Интернет, осуществляются научно-исследовательские работы.

Развитие компьютерных технологий в образовании привело к появлению множества педагогических программных средств различного назначе-

ния: компьютерных обучающих систем, электронных учебных пособий, электронных средств контроля знаний, вычислительных экспериментов, моделирующих компьютерных программ, компьютерных деловых игр и т.д.

Как известно, подготовка разных специалистов требует усвоения знаний в предметной среде учебных дисциплин на различных уровнях. В связи с этим необходимо четко представлять, на каких уровнях усвоения знаний возможно использование программных средств различного назначения.

3 Применение сигнального метода обучения Хебба

Главная черта, делающая обучение без учителя привлекательным, – это его «самостоятельность». Процесс обучения, как и в случае обучения с учителем, заключается в подстраивании весов синапсов. Некоторые алгоритмы, правда, изменяют и структуру сети, т.е. количество нейронов и их взаимосвязи, но такие преобразования правильнее назвать более широким термином «самоорганизация», в рамках данной работы они рассматриваться не будут. Очевидно, что подстройка синапсов может проводиться только на основании информации, доступной в нейроне, т.е. его состояния и уже имеющихся весовых коэффициентов. Исходя из этого соображения и, что более важно, по аналогии с известными принципами самоорганизации нервных клеток построены алгоритмы обучения Хебба.

Сигнальный метод обучения Хебба заключается в изменении весов по следующему правилу:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha y_i^{(n-1)} y_j^{(n)}, \qquad (1)$$

где $y_i^{(n-1)}$ – выходное значение нейрона i слоя $(n-1)$; $y_j^{(n)}$ – выходное значение нейрона j слоя n; $w_{ij}(t)$ и $w_{ij}(t-1)$ – весовой коэффициент синапса, соединяющего эти нейроны, на итерациях t и $t-1$ соответственно; α – коэффициент скорости обучения. Здесь и далее для общности под n подразумевается произвольный слой сети. При обучении по данному методу усиливаются связи между возбужденными нейронами.

Существует также и дифференциальный метод обучения Хебба:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha\left[y_i^{(n-1)}(t) - y_i^{(n-1)}(t-1)\right]\left[y_j^{(n)}(t) - y_j^{(n)}(t-1)\right], \qquad (2)$$

где $y_i^{(n-1)}(t)$ и $y_i^{(n-1)}(t-1)$ – выходное значение нейрона i слоя $(n-1)$ соответственно на итерациях t и $t-1$; $y_j^{(n)}(t)$ и $y_j^{(n)}(t-1)$ – то же самое для нейрона j слоя n.

Как видно из формулы (2), сильнее всего обучаются синапсы, соединяющие те нейроны, выходы которых наиболее динамично изменились в сторону увеличения.

Полный алгоритм обучения с применением вышеприведенных формул будет выглядеть так:

1. На стадии инициализации всем весовым коэффициентам присваиваются небольшие случайные значения.

2. На входы сети подается входной образ, и сигналы возбуждения распространяются по всем слоям согласно принципам классических прямопо-

точных (feedforward) сетей [1], т.е. для каждого нейрона рассчитывается взвешенная сумма его входов, к которой затем применяется активационная (передаточная) функция нейрона, в результате чего получается его выходное значение $y_i^{(n)}$, $i = 0...M_i - 1$, где M_i – число нейронов в слое i; $n = 0...N - 1$, а N – число слоев в сети.

3. На основании полученных выходных значений нейронов по формуле (1) или (2) производится изменение весовых коэффициентов.

4. Повторяется цикл с шага 2, пока выходные значения сети не стабилизируются с заданной точностью. Применение этого нового способа определения завершения обучения, отличного от использовавшегося для сети обратного распространения, обусловлено тем, что подстраиваемые значения синапсов фактически не ограничены.

На втором шаге цикла попеременно предъявляются все образы из входного набора.

Следует отметить, что вид откликов на каждый класс входных образов не известен заранее и будет представлять собой произвольное сочетание состояний нейронов выходного слоя, обусловленное случайным распределением весов на стадии инициализации. Вместе с тем, сеть способна обобщать схожие образы, относя их к одному классу. Тестирование обученной сети позволяет определить топологию классов в выходном слое. Для приведения откликов обученной сети к удобному представлению можно дополнить сеть одним слоем, который, например, по алгоритму обучения однослойного перцептрона необходимо заставить отображать выходные реакции сети в требуемые образы.

Другой алгоритм обучения без учителя – алгоритм Кохонена. Он предусматривает подстройку синапсов на основании их значений от предыдущей итерации:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha\left[y_i^{(n-1)} - w_{ij}(t-1) \right]. \qquad (3)$$

Из вышеприведенной формулы видно, что обучение сводится к минимизации разницы между входными сигналами нейрона, поступающими с выходов нейронов предыдущего слоя $y_i^{(n-1)}$, и весовыми коэффициентами его синапсов.

Полный алгоритм обучения имеет примерно такую же структуру, как в методах Хебба, но на шаге 3 из всего слоя выбирается нейрон, значения синапсов которого максимально приближаются к входному образу, и подстройка весов по формуле (3) проводится только для него. Эта так называемая аккредитация может сопровождаться затормаживанием всех остальных нейронов слоя и введением выбранного нейрона в насыщение. Выбор такого нейрона может осуществляться, например, расчетом скалярного произведения вектора весовых коэффициентов с вектором входных значений. Максимальное произведение дает выигравший нейрон. Другой вариант – расчет расстояния между этими векторами в p-мерном пространстве, где p – размер векторов:

$$D_j = \sqrt{\sum_{i=0}^{p-1} (y_i^{(n-1)} - w_{ij})^2}\ , \qquad (4)$$

где j – индекс нейрона в слое n; i – индекс суммирования по нейронам слоя $(n-1)$; w_{ij} – вес синапса, соединяющего нейроны; выходы нейронов слоя $(n-1)$ являются входными значениями для слоя n.

Корень в формуле (4) брать не обязательно, т.к. важна лишь относительная оценка различных D_j.

В данном случае «побеждает» нейрон с наименьшим расстоянием. Иногда слишком часто получающие аккредитацию нейроны принудительно исключаются из рассмотрения, чтобы «уравнять права» всех нейронов слоя. Простейший вариант такого алгоритма заключается в торможении только что выигравшего нейрона.

При использовании обучения по алгоритму Кохонена существует практика нормализации входных образов, а также (на стадии инициализации) нормализации начальных значений весовых коэффициентов:

$$x_i = x_i / \sqrt{\sum_{j=0}^{n-1} x_j^2}\ , \tag{5}$$

где x_i – i-я компонента вектора входного образа или вектора весовых коэффициентов; а n – его размерность.

Это позволяет сократить длительность процесса обучения.

Инициализация весовых коэффициентов случайными значениями может привести к тому, что различные классы, которым соответствуют плотно распределенные входные образы, сольются или, наоборот, раздробятся на дополнительные подклассы в случае близких образов одного и того же класса. Для избежания такой ситуации используется метод выпуклой комбинации [2]. Суть его сводится к тому, что входные нормализованные образы подвергаются преобразованию:

$$x_i = \alpha(t)x_i + (1-\alpha(t))\frac{1}{\sqrt{n}}, \tag{6}$$

где x_i – i-я компонента входного образа; n – общее число его компонент; $\alpha(t)$ – коэффициент, изменяющийся в процессе обучения от нуля до единицы, в результате чего вначале на входы сети подаются практически одинаковые образы, а с течением времени они все больше сходятся к исходным.

Весовые коэффициенты устанавливаются на шаге инициализации равными величине

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{n}}, \tag{7}$$

где n – размерность вектора весов для нейронов инициализируемого слоя.

Заключение

На основе рассмотренного выше метода строятся нейронные сети особого типа – так называемые самоорганизующиеся структуры (self-organizing feature maps). Этот устоявшийся перевод с английского, на наш взгляд, не очень удачен, т.к. речь идет не об изменении структуры сети, а только о подстройке синапсов. Для них после выбора из слоя n нейрона j с минимальным

расстоянием D_j (4) обучается по формуле (3) не только этот нейрон, но и его соседи, расположенные в окрестности R. Величина R на первых итерациях очень большая, так что обучаются все нейроны, но с течением времени она уменьшается до нуля. Таким образом, чем ближе конец обучения, тем точнее определяется группа нейронов, отвечающих каждому классу образов.

Список литературы

1. **Суровцев, И. С.** Нейронные сети / И. С. Суровцев, В. И. Клюкин, Р. П. Пивоварова. – Воронеж : ВГУ, 1994.
2. **Горбань, А. Н.** Нейронные сети на персональном компьютере / А. Н. Горбань, Д. А. Россиев. – Новосибирск : Наука, 1996.

Аванский Сергей Михайлович
аспирант,
Пензенский государственный университет

Avanskij Sergey Mihajlovich
the post-graduate student,
the Penza state university

Щербакова Светлана Владимировна
доцент, кафедра русского языка как иностранного,
Институт международных отношений Пензенского государственного университета

Shcherbakova Svetlana Vladimirovna
the senior lecturer,
Russian chair as foreign,
Institute of the international relations of the Penza state university

---

УДК 681.3.068

Аванский, С. М.

Методология формирования профессиональных навыков в интеллектуальной компьютерной системе обучения с внешним объектом изучения / С. М. Аванский, С. В. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 55–61.

УДК 658.014.1.011.56:378(043)

Г. А. Воробьев, В. Н. Малыш

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ УЧЕБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. В статье рассматривается одна из методик разработки и оценки семантической сложности графовых моделей учебных элементов. Полученные результаты используются при планировании изучения базовых понятий математической статистики.
Ключевые слова: методика, семантика, модель, обучение, измерение.

Abstract. In article one of techniques of working out and an estimation of semantic complexity графовых models of educational elements is considered. The received results are used at planning of studying of base concepts of mathematical statistics.
Keywords: a technique, semantics, model, training, measurement.

Введение

Основным принципом формализации педагогических знаний, обеспечивающей переход педагогики на следующие ступени научного развития, является корректность применения научных положений дисциплин более высокого уровня методологического знания.

Для разработки методов формализации рассматриваются две модели расчета трудоемкости усвоения учебного объекта (УО) как информационного продукта, отображающего те или иные стороны структуры или функционирования, на которые направлено конкретное обучающее воздействие: модель Л. П. Леонтьева [1] и модель В. М. Мизинцева [2].

В основе обеих моделей лежат идеи А. И. Уемова [3], в соответствии с которыми информационная мера сложности графовой модели обусловливается:

1) количеством дуг графа как отношений между его вершинами;

2) конфигурацией графа, которая оценивается коэффициентом относительной энтропии.

1 Постановка задачи оценки семантической сложности

Для разработки и оценки семантической сложности графовых моделей учебного элемента (УЭ) как информационного продукта, представляющего собой отображение логически завершенного элемента содержания программы обучения в соответствии с целями его изучения [4], предлагается методика, использующая модель В. П. Мизинцева [3].

Методика включает три этапа:

1) разработку альтернативных моделей УО;

2) оценку семантической сложности альтернативных графовых моделей;

3) выбор оптимальной модели УО.

Целью *первого этапа* является выявление таких моделей УО, которые соответствуют системе предпочтений преподавателя и не включают в себя вершин, избыточных в отношении рассматриваемых целей или содержания обучения.

Второй этап включает оценку семантической сложности альтернативных моделей УО:

1. Определяется средний ранг связности пучка в графовой модели УЭ:

$$z_{\text{ср}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} z_i m_i = \frac{p}{m}, \tag{1}$$

где $z_{\text{ср}}$ – средний ранг связности пучка (связь/пучок); m – общее число пучков; m_i – число пучков с рангом связности z_i; p – количество связей в модели.

Здесь под пучком дуг понимается множество дуг, направленных к соответствующей вершине.

2. Определяются абсолютные значения приведенной степени абстрагирования для каждой из вершин X_j модели:

$$\Phi(X_j) = \log_2\left\{\left[z(X_j) - 1\right] y(X_j) + 1\right\}, \tag{2}$$

где $\Phi(X_j)$ – приведенная степень абстрагирования вершины X_j (эсед/сем.ед.); $z(X_j)$ – средний ранг связности пучка в той части структуры, в вершине которой находится вершина X_j; $y(X_j)$ – число вершин в той ветви графа, в вершине которой расположена семантическая единица X_j. Здесь введено понятие «элементарная семантическая единица» (эсед) как понятие, которое усвоено обучающимися на предыдущих этапах обучения и не имеет связей с вершинами графовой модели, лежащими на более низком уровне абстракции.

Если X_j не имеет нисходящих связей, то она является исходной: $X_j = X_0$, при этом степень абстрагирования $\Phi(X_0) = 1$.

3. Рассчитываются значения $\left[\Phi(X_j)\right]^{-1}$ для всех X_j.

4. На основании функции распределения определяются вероятности для всех вершин графа:

$$q(X_j) = q(X_z)\left[\Phi(X_j)^{-1}\right]\left[\sum_{l=1}^{z}\Phi(X_l)^{-1}\right]^{-1}, \tag{3}$$

где $q(X_j)$ – вероятность рассматриваемой вершины X_j; $q(X_z)$ – вероятность вышестоящей вершины, образующей пучок связей, в который входит рассматриваемая вершина X_j; $\Phi(X_j)$ – приведенная степень абстрагирования рассматриваемой вершины; $\Phi(X_l)$ – приведенные степени абстрагирования всех вершин X_j, связанных с вышестоящей единицей X_z, включая и рассматриваемую ($l = 1, z$).

Вероятность графообразующей вершины X_1: $q(X_1) = 1$.

5. Рассчитывается показатель конфигурации (коэффициент относительной энтропии) графовой модели:

$$E = \frac{H}{H_{\max}}, \tag{4}$$

$$H_{\max} = \log_2 m\,, \tag{5}$$

$$H = \sum_{i=1}^{m} \left(-q_i \log_2 q_i \right), \tag{6}$$

где E – коэффициент относительной энтропии графа; $H_{\max}$ – величина максимальной энтропии числа m исходных элементов графа; H – величина энтропии исходных m элементов рассматриваемой модели; q_i $(i = \overline{1, m})$ – рассчитанное значение вероятности i-го исходного элемента графовой модели.

6. Определяется количество семантической информации, содержащейся в структуре рассматриваемой модели:

$$S(y) = y \log_2 y\,, \tag{7}$$

$$S(y) = y \log_2 \left[\left(z_{\text{ср}} - 1 \right) y + 1 \right], \tag{8}$$

$$S(E) = y(1 - E) \log_2 \left(\frac{z_{\text{ср}} - 1}{z_{\text{ср}}} y + \frac{1}{z_{\text{ср}}} \right), \tag{9}$$

$$S(y, V, E) = S(y) + S(V) + S(E)\,, \tag{10}$$

где $S(y, V, E)$ – количество информации, содержащейся в структуре графовой модели; $S(y)$ – количество информации, образующейся при изменении ранга связности пучка от 0 до 1; $S(V)$ – количество информации, образующейся при изменении ранга связности пучка от 1 до $z_{\text{ср}}$; $S(E)$ – количество информации, заключенное в конфигурации данной системы; y – число вершин в графе.

Интегральное изменение состояния рассматриваемой графовой модели в процессе ее образования выражается формулой (10).

Третий этап включает выбор оптимальной модели УЭ.

В соответствии с [4] оптимальная графовая модель УЭ должна представлять собой логико-смысловую структуру, полностью отвечающую целям обучения и содержащую наименьший объем семантической информации по отношению к другим возможным вариантам модели:

$$S_{\text{опт}} = \min\left\{ S_i(y_i, V_i, E_i) \right\}, \tag{11}$$

где $S_i(y_i, V_i, E_i)$ – оценки семантической сложности конкурирующих моделей.

Приведенная выше методика позволяет произвести выбор модели изучаемого УЭ с учетом объективных оценок трудоемкости его усвоения, состояния обученности студента и системы предпочтений преподавателя.

При любой разбивке упорядоченного избыточного графа (дерева) $V(X_j)$ суммарная семантическая сложность множества $\{M(X_i)\}$ полученных ветвей всегда меньше семантической сложности дерева.

$$\forall \{M(X_i)\} \left\{ \{M(X_i)\} \sim V(X_i) \right\} \to \sum_{i=1}^{n} I(X_i) < I(X_j)\,. \tag{12}$$

Таким образом, в случае разбиения УЭ на ряд УО совокупное количество семантической информации, содержащейся в моделях УО, значительно меньше информации, заключенной в модели УЭ.

2 Приложение методики к конкретной предметной области

Покажем справедливость выражения (12) на примере. Разобьем все дерево $V(X_1)$, приведенное на рис. 1, на ветви $M(X_1)$, $M(X_2)$, $M(X_3)$, обозначенные по имени порождающих их вершин. При этом $V(X_1) \sim \{M(X_1), M(X_2), M(X_3)\}$.

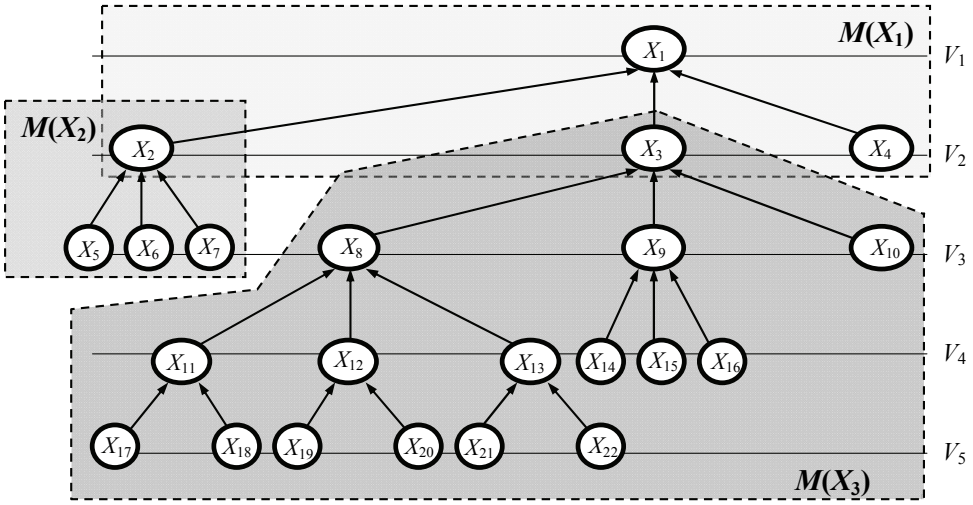


Рис. 1 Дерево и его ветви

В соответствии с приведенной выше методикой оценим характеристики вершин (табл. 1), семантическую сложность дерева и его ветвей (табл. 2).

Таблица 1

Характеристики вершин рассматриваемого дерева и его ветвей

Вершина	Дерево $V(X_1)$		Ветвь $M(X_1)$		Ветвь $M(X_2)$		Ветвь $M(X_3)$	
	$\Phi(X_i)$	$q(X_i)$	$\Phi(X_i)$	$q(X_i)$	$\Phi(X_i)$	$q(X_i)$	$\Phi(X_i)$	$q(X_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1	5,200	1	3,170	1	–	–	–	–
X_2	3,170	0,2061	1,000	0,3333	3,170	1	–	–
X_3	4,644	0,1407	1,000	0,3333	–	–	4,644	1
X_4	1	0,6533	1,000	0,3333	–	–	–	–
X_5	1	0,0687	–	–	1,000	0,3333	–	–
X_6	1	0,0687	–	–	1,000	0,3333	–	–
X_7	1	0,0687	–	–	1,000	0,3333	–	–
X_8	3,755	0,0237	–	–	–	–	3,755	0,1684
X_9	3,170	0,0281	–	–	–	–	3,170	0,1994
X_{10}	1	0,0703	–	–	–	–	1	0,6322
X_{11}	2,000	0,0079	–	–	–	–	2,000	0,0561
X_{12}	2,000	0,0079	–	–	–	–	2,000	0,0561
X_{13}	2,000	0,0079	–	–	–	–	2,000	0,0561

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_{14}	1	0,0094	–	–	–	–	1	0,0665
X_{15}	1	0,0094	–	–	–	–	1	0,0665
X_{16}	1	0,0094	–	–	–	–	1	0,0665
X_{17}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281
X_{18}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281
X_{19}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281
X_{20}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281
X_{21}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281
X_{22}	1	0,0039	–	–	–	–	1	0,0281

Таблица 2

Характеристики семантической сложности дерева и его ветвей

Характеристики графа	Дерево $\boldsymbol{V(X_1)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_1)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_2)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_3)}$
y	22	4	4	16
m	14	3	3	10
$z_{ср}$	2,625	3	3	2,50
H	1,845	1,585	1,585	2,066
H_{max}	3,807	1,585	1,585	3,322
E	0,485	1,000	1,000	0,622
$S(y)$	98,11	8,00	8,00	64,00
$S(V)$	114,39	12,68	12,68	74,30
$S(E)$	43,17	0,00	0,00	20,09
$S(y, V, E)$	255,67	20,68	20,68	158,39

Расчеты свидетельствуют, что семантическая сложность рассмотренного дерева на 55,92 эсед выше суммарной сложности составляющих его ветвей. Данное положение определяется тем, что количество семантической информации, определяемое конфигурацией логической структуры (коэффициентом ее относительной энтропии E), с ростом иерархической организации этой структуры растет лавинообразно.

Разбиение УЭ на совокупность УО, образующих рассматриваемый УЭ, существенно снижает уровень абстракции каждого УО относительно УЭ, т.е. уменьшает совокупную трудоемкость усвоения этих УО в сравнении с трудоемкостью усвоения УЭ. Приведенное свойство известно в педагогике: если обучающийся не способен усвоить сложный объект целиком, то обучающий организует его изучение по частям.

3 Оценка эффективности разработанной методики

Эффективность внедрения описанной модели и методики определяется следующими положениями:

1) соотношением трудоемкости процедур предъявления и проверки усвоения УЭ $G_A(X_j)$, $G_B(X_j)$ или семантической сложности $S(X_j)$ изучаемых УЭ со свойством обучаемости конкретного обучающегося, т.е. с тем количеством семантической информации $I_{об}$, которое он способен усваивать с первого предъявления;

2) степенью соответствия индивидуальных неформализованных особенностей обучающихся тем приемам (способам) обучения, которые лежат в основе процедур $G_A(X_j)$ предъявления изучаемых УЭ;

3) степенью валидности процедур $G_B(X_j)$ контроля усвоения УЭ;

4) степенью наглядности информационных моделей УЭ, предъявляемых обучающимся в процессе реализации процедур $G_A(X_j)$;

5) степенью соответствия математических моделей, лежащих в основе адаптивных информационных моделей УЭ, целям обучения и природе изучаемых объектов;

6) исходным уровнем подготовки и степенью мотивации обучающихся на достижение целей обучения и т.д.

Первое из них (соотношение трудоемкости процедур $G_A(X_j)$, $G_B(X_j)$ и свойства обучаемости) имеет непосредственное отношение к задаче планирования предъявления содержания обучения, поскольку определяет первоначальный план преподавателя.

Структура графовой модели одного и того же содержания обучения вариативна и зависит от системы предпочтений ее разработчика. Если целью разработки является оценка семантической сложности УЭ, то структура соответствующего графа должна отображать без исключения все умственные действия, совершаемые в процессе предъявления данного УЭ. Выполнение этого условия обеспечивает адекватность оценки трудоемкости усвоения УЭ. Однако для решения задач, связанных с планированием предъявления содержания обучения, данное требование является избыточным.

Для целей планирования содержания обучения любой граф или его ветвь могут быть представлены в виде пучка связей, что практически реализуется путем создания кадра сценария предъявления обучения.

Пусть одной из целей учебного курса по математике, определенной понятийной сетью знания, является усвоение понятия «математическая статистика» (X_1), граф которого приведен на рис. 2.

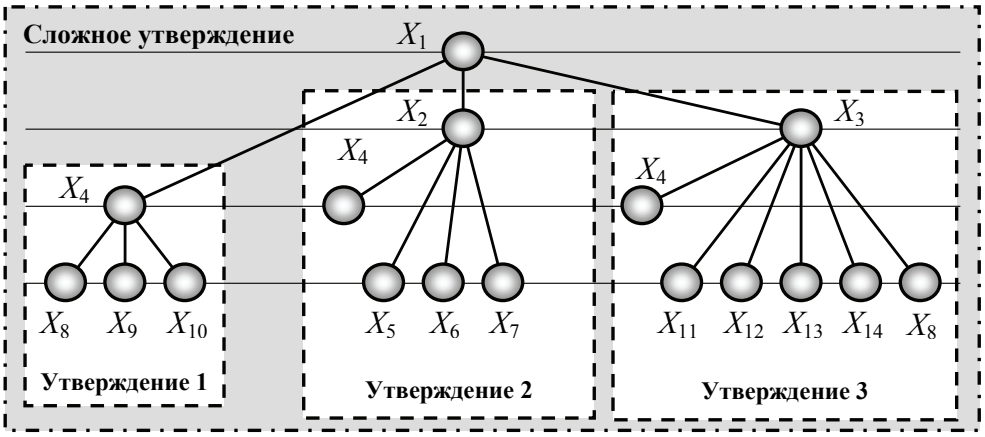


Рис. 2 Упорядоченный избыточный граф (дерево)

Рассмотрим три утверждения. В математической статистике (X_1) объем (X_8) выборки генеральной совокупности (X_4) является важным параметром (X_9) оценки статистических данных (X_{10}) (утверждение 1). Важнейшим инст-

рументом в математической статистике (X_1) является выборка (X_2) генеральной совокупности (X_4), которая может быть выражена при помощи гистограммы (X_5) и охарактеризована эмпирической (X_6) или теоретической (X_7) функцией распределения (утверждение 2). В математической статистике (X_1) для оценки результатов экспериментов широко применяются оценки параметров (X_3) выборок генеральной совокупности (X_4). Методы получения подобных оценок (X_{11}) зависят не только от объема (X_8) выборки. Оценки могут быть точечными (X_{12}) и доверительными (X_{13}). Свойства (X_{14}) точечных и доверительных оценок существенно различаются (утверждение 3).

Каждое из приведенных на рис. 2 утверждений является логически завершенным. Оценки семантической сложности (трудоемкости усвоения) приведенных утверждений по (7)–(10) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики семантической сложности понятия «математическая статистика» и составляющих его утверждений

Характеристики графа	Сложное утверждение	Утверждение 1	Утверждение 2	Утверждение 3
	Граф $\boldsymbol{M(X_1)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_4)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_2)}$	Ветвь $\boldsymbol{M(X_3)}$
$Z_{\text{ср}}$	4,25	3,0	5,0	6,0
H	3,622	1,585	2,322	2,585
$H_{\max}$	3,807	1,585	2,322	2,585
E	0,951	1,00	1,00	1,00
$S_v(X_i)$	75,06	8,00	15,51	19,65
$S_I(X_i)$	106,11	12,68	27,86	36,19
$S_E(X_i)$	3,33	0,00	0,00	0,00
$S(X_i)$	184,49	20,68	43,37	55,84

Указанные оценки определяют трудоемкость соответствующих процедур $G_A(X_j)$, $G_B(X_j)$. Они рассчитываются на основе упорядоченного избыточного графа (дерева) УЭ X_1, который включает все без исключения трансформации исходных понятий $X_5 \ldots X_{14}$. Методика обсчета подобных графов подробно описана в [5].

Рассматриваемые оценки не изменяются в зависимости от тех изменений, которые совершаются с деревом УЭ X_1 в процессе разработки плана предъявления содержания УЭ X_1 (представление дерева в виде неупорядоченного графа, сокращения числа уровней абстракции за счет представления ветви в виде пучка связей исходных элементов и т.д.). Если $\{X_0\} = \{X_5, \ldots, X_{14}\} \in B$, то для целей планирования процедур $G_A(X_j)$, $G_B(X_j)$ корректны варианты, приведенные на рис. 3, а также их сочетания.

Для квантификации имеющегося содержания обучения и компоновки плана преподавателя необходимо иметь: 1) варианты компоновки информационных кадров сценария предъявления обучения (рис. 3); 2) оценки трудоемкости усвоения рассматриваемых вариантов компоновки; 3) общее представление о закономерностях изменения свойства обучаемости; 4) оценки этих закономерностей в отношении контингента обучающихся.

Оценки трудоемкости вариантов компоновки плана преподавателя, приведенных на рис. 3, представлены в табл. 4.

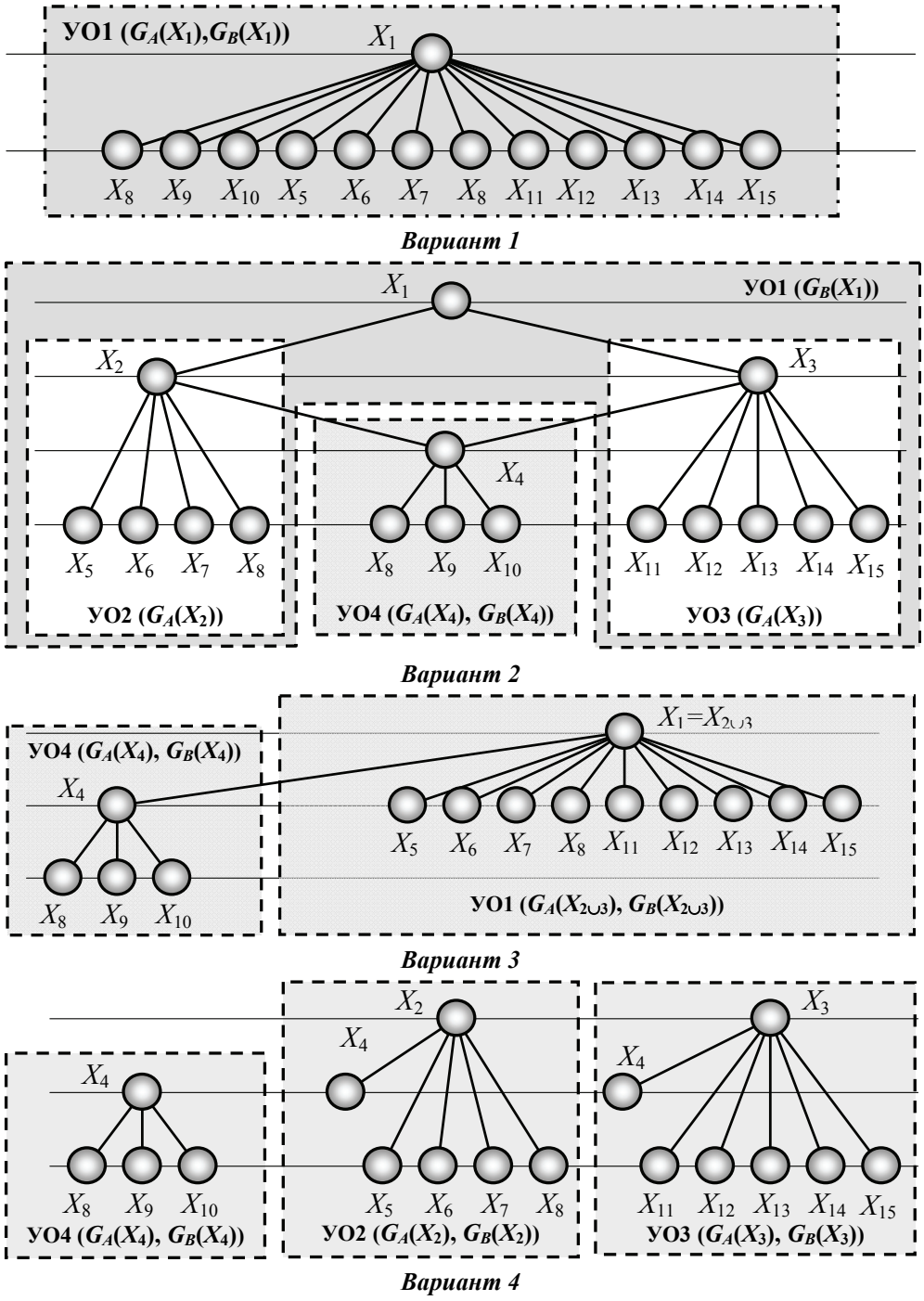


Рис. 3 Варианты компоновки рассматриваемого УЭ X_1

Установлено и экспериментально подтверждено, что приведенные в табл. 4 оценки обеспечивают возможность сравнения вероятности усвоения альтернативных вариантов по соотношению

$$S(X_k) > S(X_l) \rightarrow P\left[G_B(X_l)\right] > P\left[G_B(X_k)\right]. \qquad (13)$$

Качественная формулировка данного соотношения: чем проще изучаемый объект, тем выше вероятность его усвоения.

Таблица 4

Трудоемкость усвоения вариантов сценария предъявления УЭ X_1

Сложность	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
УО1	184,49	136,79	136,79	—
УО2	—	43,37	—	43,37
УО3	—	55,84	—	55,84
УО4	—	20,68	20,68	20,68
$\sum S\left[G_A(X_j)\right]$	184,49	119,89	157,47	119,89
$\sum S\left[G_B(X_j)\right]$	184,49	157,47	157,47	119,89
$\sum$	368,98	277,36	314,94	239,78

Заключение

Условие (13) не определяет обязательность выбора варианта 4 (см. рис. 3 и табл. 4), потому что наряду с ним необходимо учитывать ряд других условий:

1) частый контроль усвоения простых с точки зрения обучающегося УЭ неминуемо вызывает у него раздражение и психологическое отторжение содержания обучения (понятия);

2) при делении УЭ на множество УО, трудоемкость которых обеспечивает их безусловное усвоение с первого предъявления, обучение теряет свое развивающее значение;

3) деление УЭ на УО должно обеспечивать логическую завершенность УО, а значит, не может быть беспредельным.

Данные условия не формализованы. Поэтому и сама задача квантификации (декомпозиции) содержания обучения на информационные кадры и разработки плана преподавателя является слабо формализованной. Для ее обоснованного решения необходимы количественные оценки возможностей усвоения контингентом обучающихся УЭ различной семантической сложности.

Список литературы

1. **Леонтьев, Л. П.** Проблемы управления учебным процессом (математические модели) / Л. П. Леонтьев, О. Г. Гохман. – Рига : Зинанте, 1984. – 239 с.
2. **Мизенцев, В. П.** Проблема аналитической оценки качества и эффективности учебного процесса в школе / В. П. Мизенцев. – Куйбышев : Куйбышевский государственный педагогический институт, 1979.
3. **Уемов, А. И.** Системный подход и общая теория систем / А. И. Уемов. – М. : Мысль, 1978. – 272 с.
4. **Печников, А. Н.** Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем / А. Н. Печников. – Петродворец : ВВМУРЭ им. Попова, 1995. – 322 с.
5. **Евстигнеев, В. А.** Теория графов : алгоритмы обработки деревьев / В. А. Евстигнеев, В. Н. Касьянов. – Новосибирск : Наука, 1994. – 360 с.

Воробьев Григорий Алексеевич
старший преподаватель,
кафедра прикладной математики
и информационных технологий,
Липецкий государственный
педагогический университет

Vorobjev Grigory Alekseevich
the senior teacher,
chair of applied mathematics
and information technologies,
Lipetsk state pedagogical university

E-mail: vorobjev_g_a@mail.ru

Малыш Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
электроники телекоммуникаций
и компьютерных технологий,
Липецкий государственный
педагогический университет

Maljesh Vladimir Nikolaevich
a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair of electronics
of telecommunications
and computer technologies,
Lipetsk state pedagogical university

E-mail: mal@pedinst.lipetsk.su

УДК 658.014.1.011.56:378(043)

Воробьев, Г. А.

Методика оценки семантической сложности графовых моделей учебных элементов / Г. А. Воробьев, В. Н. Малыш // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 62–71.

УДК 005.6 (075.8)

В. А. Мещеряков, Г. В. Суровицкая, В. В. Чугунова

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ САМООЦЕНКИ УНИВЕРСИТЕТА

Аннотация. Поставлена и решена задача факторного анализа с использованием данных самооценки эффективности функционирования системы управления Пензенского государственного университета в области менеджмента качества. В результате подкритерии модели совершенствования деятельности отнесены к восьми укрупненным группам. На примере совершенствования системы мониторинга процессов университета показаны методологические преимущества полученных результатов для обеспечения принятия управленческих решений.

Ключевые слова: система менеджмента качества, самооценка, критерии, факторный анализ, регрессионный анализ.

Abstract. We set and solved the problem of the factor analysis with the application of the data on the self-animation of the effective-ness of the Penza State University management systems functioning in the field. As a result the subcriteria of the activity improvement model were attributed to enlarged factors. The example of the improvement of the university processes monitoring system revealed of the methodological advantages of the results obtained to provide making management decisions.

Keywords: quality management system, self-estimation, criteria, factor analysis, regression analysis.

Введение

В 90-х гг. развитие средств и методов обработки данных привело к появлению *Data Mining*. *Data Mining* представляет собой процесс аналитического исследования больших массивов данных с целью выявления определенных закономерностей и систематических взаимосвязей между переменными, которые затем можно применить к новым совокупностям данных. Одним из методов *Data Mining* является факторный анализ данных. Цель факторного анализа состоит в сокращении числа рассматриваемых факторов и определении структуры взаимосвязей между ними.

Возможности факторного анализа при решении задач менеджмента качества образовательных услуг университетов в настоящее время изучены недостаточно. В этой связи целесообразно исследовать аспекты применения факторного анализа при самооценке университета. Для обеспечения достоверности выводов в состав критериев самооценки включают большое число факторных признаков. Последнее обстоятельство обусловило целесообразность постановки и решения задачи оптимизации самооценки на основе компонентного и факторного анализа данных.

1 Получение исходных данных

В настоящее время для проведения самооценки университетам России рекомендовано использовать «Методические рекомендации для вузов и ссузов по организации и проведению самооценки эффективности функционирования систем управления в области менеджмента качества на основе Модели совершенствования деятельности» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». Предложенная в них Модель

совершенства содержит 9 критериев, включающих 55 подкритериев, каждый из которых относят к одной из двух групп – группе «Возможности» (критерии 1–5) и группе «Результаты» (критерии 6–9). Значения подкритериев определяются экспертным путем. Хотя разработчики Модели совершенства допускают самооценку на основе оценок одного единственного эксперта, по мнению авторов, более информативной и перспективной в плане дальнейшего анализа данных методами *Data Mining* является самооценка на основе оценок группы экспертов, имеющих достаточную подготовку в области менеджмента вообще и менеджмента качества в частности. При этом целесообразно создать условия для обеспечения репрезентативности экспертных оценок с тем, чтобы массивы значений подкритериев Модели совершенства можно было рассматривать как массивы случайных чисел и для их анализа применять аппарат математической статистки.

Специфика решаемой задачи обусловливает использование только значений подкритериев группы «Возможности». Это связано с тем, что совершенствование системы менеджмента качества (СМК) университета обеспечивается мероприятиями в рамках видов деятельности университета (группа критериев «Возможности»), а не результатами деятельности университета в предыдущем периоде (группа критериев «Результаты»). Формирование массивов экспертных оценок осуществляется в группе критериев Модели совершенства «Возможности» в соответствии с ее структурой, а именно:

– для критериев 1–4: $Xij, i = 1...4,\ j = \begin{cases} 1...5 \text{ при } i = 1, 3, 4, \\ 1...4 \text{ при } i = 2; \end{cases}$

– для критерия 5: $X5ij, i = 1...3,\ j = \begin{cases} 1...8 \text{ при } i = 1, 2, \\ 1...9 \text{ при } i = 3. \end{cases}$

Максимальные значения критериев по всем группам 10 баллов.

Содержание всех подкритериев группы «Возможности» и результаты экспертной оценки, полученные при проведении самооценки Пензенского государственного университета в 2007 г., СМК которого сертифицирована на соответствие международным стандартам ИСО серии 9000, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные самооценки Пензенского государственного университета

Подкритерий самооценки		Экспертные оценки										
Содержание	Обозначение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.1 Личное участие руководства университета в формировании и развитии миссии, видения, основных ценностей, политики, основных целей и задач в области качества	$X11$	7	4	7	7	8	7	8	6	8	6	6
1.2 Личное участие руководства в обеспечении постоянного совершенствования СМК университета	$X12$	7	6	8	7	8	7	6	8	8	5	6
1.3 Личное участие руководства университета в работе с внешними заинтересованными сторонами (потребителями, поставщиками, партнерами, представителями общественности и др.)	$X13$	6	3	8	8	6	8	10	7	8	4	8

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.4 Личное участие руководства университета в обеспечении обратной связи с персоналом для улучшения своей деятельности	*X*14	5	4	7	6	8	6	6	5	7	5	6
1.5 Личное участие руководства университета в подготовке и организации проведения лицензирования, аттестации, государственной и общественно-профессиональной аккредитации	*X*15	3	3	4	3	7	3	3	5	8	8	3
2.1 Разработка и совершенствование политики и стратегии и степень участия в этих процессах заинтересованных сторон (студентов, персонала университета, потребителей, поставщиков, партнеров, представителей общественности и др.)	*X*21	5	4	5	6	6	6	8	5	7	3	6
2.2 Механизмы сбора и анализа разносторонней информации о результативности и эффективности функционирования университета при формировании его политики и стратегии	*X*22	5	5	6	5	5	5	6	7	7	4	6
2.3 Механизмы проекции внедрения политики и стратегии на все уровни управления, структурные подразделения и ключевые процессы университета	*X*23	5	2	6	5	6	5	5	6	6	5	6
2.4 Механизмы информирования персонала университета и студентов о проводимой политике и стратегии	*X*24	5	5	7	6	6	6	6	7	7	3	6
3.1 Кадровая политика и принципы управления развитием персонала	*X*31	4	3	5	4	6	4	6	6	6	6	3
3.2 Механизмы определения квалификационных требований к персоналу, его подготовке и повышению квалификации	*X*32	5	5	6	5	7	5	5	6	7	5	6
3.3 Механизмы мотивации, вовлечения и поощрения персонала за деятельность по улучшению качества функционирования университета	*X*33	7	4	6	7	9	7	6	7	8	4	5
3.4 Обеспечение обратной связи и диалога между персоналом, студентами и руководством университета	*X*34	4	2	5	6	8	6	4	7	7	3	5
3.5 Повышение качества рабочей среды, обеспечение социальной защиты и повышение благосостояния персонала	*X*35	3	3	5	4	6	4	4	5	7	6	3
4.1 Управление финансовыми ресурсами	*X*41	3	4	4	5	4	5	4	5	7	3	5
4.2 Управление материальными ресурсами	*X*42	5	4	6	7	8	7	8	7	8	4	5
4.3 Управление эффективностью технологий обучения и контроля знаний	*X*43	7	4	7	7	6	7	4	7	7	6	6
4.4 Управление информационными ресурсами	*X*44	5	4	7	5	5	5	4	6	7	8	5

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4.5 Взаимодействие с внешними партнерами (работодателями, школами и лицеями, средними специальными учебными заведениями, другими вузами)	*X*45	6	5	8	7	10	7	6	8	8	3	7
5.1.1 Внедрение процессного подхода	*X*511	4	5	6	5	4	5	5	4	6	6	5
5.1.2 Управление документацией	*X*512	6	6	7	7	7	7	6	8	7	4	5
5.1.3 Управление записями	*X*513	6	5	5	6	5	6	6	4	6	5	5
5.1.4 Планирование и построение организационной структуры системы качества, распределение ответственности и полномочий	*X*514	8	7	6	9	8	9	5	9	8	3	7
5.1.5 Построение, поддержание и развитие системы измерений и мониторинга процессов университета	*X*515	3	5	3	4	5	4	5	3	6	5	2
5.1.6 Планирование процессов университета	*X*516	4	4	3	5	6	5	4	7	6	7	4
5.1.7 Внутренние аудиты (проверки) и самооценка университета и его структурных подразделений	*X*517	7	5	6	7	8	7	6	6	8	4	7
5.1.8 Процессы, связанные с постоянным улучшением, корректирующие и предупреждающие действия	*X*518	7	5	7	8	6	8	4	7	8	5	8
5.2.1 Маркетинговые исследования рынка научных, образовательных услуг и рынка труда	*X*521	4	5	7	5	6	5	4	3	6	7	5
5.2.2 Проектирование и разработка образовательных программ	*X*522	5	4	6	5	8	5	2	6	6	4	6
5.2.3 Довузовская подготовка и прием студентов	*X*523	7	5	10	10	10	9	5	9	10	8	10
5.2.4 Реализация основных образовательных программ	*X*524	6	4	7	8	8	8	5	7	8	6	8
5.2.5 Воспитательная и внеучебная работа с обучаемыми	*X*525	6	7	5	7	8	7	7	8	8	5	7
5.2.6 Проектирование и реализация программ дополнительного образования	*X*526	6	6	5	7	8	7	5	7	7	5	8
5.2.7 Подготовка кадров высшей квалификации (аспирантура, докторантура)	*X*527	6	3	6	7	8	7	7	8	8	8	8
5.2.8 Научно-исследовательская и инновационная деятельность	*X*528	5	5	6	5	6	5	5	7	8	7	6
5.3.1 Бухгалтерско-финансовое обеспечение научно-образовательного процесса	*X*531	6	3	7	6	6	6	5	5	6	6	5
5.3.2 Кадровое обеспечение	*X*532	6	4	6	5	6	5	4	8	6	4	5
5.3.3 Закупки и взаимодействие с поставщиками материальных ресурсов	*X*533	5	4	7	6	6	6	7	7	7	3	5
5.3.4 Управление образовательной средой	*X*534	3	4	6	5	10	5	5	8	6	4	4
5.3.5 Издательская деятельность	*X*535	7	5	3	8	8	8	5	8	8	8	8
5.3.6 Библиотечное и информационное обеспечение	*X*536	4	3	4	5	5	5	5	7	6	8	5
5.3.7 Управление инфраструктурой и производственной средой	*X*537	5	6	5	6	5	6	5	8	7	7	5

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5.3.8 Обеспечение безопасности жизнедеятельности	*X*538	5	4	6	6	7	6	7	8	6	5	6
5.3.9 Социальная поддержка студентов и сотрудников университета	*X*539	4	5	6	5	7	5	5	5	8	8	6

Экспертные оценки получены от 11 экспертов из числа менеджеров высшего и среднего звена университета. Ошибка результата прогнозирования b определена по методу Дельфи [1]:

$$b = \frac{3}{2N-5} = \frac{3}{2 \cdot 11 - 5} = 0{,}18,$$

где N – число экспертов.

2 Построение факторной матрицы

Для решения поставленной задачи используем метод анализа главных компонент [2]. Основная идея этого метода состоит в том, что коррелированные между собой переменные объединяются в один фактор.

Для корреляционной матрицы, построенной с использованием пакета SPSS, найдем собственные значения и соответствующие им собственные векторы, для определения которых используются так называемые относительные дисперсии простых факторов – оценочные значения диагональных элементов матрицы (табл. 2).

Таблица 2

Полная объясненная дисперсия

Компонента	Начальные собственные значения			Суммы квадратов нагрузок извлечения		
	Всего	Процент дисперсии	Кумулятивный процент	Всего	Процент дисперсии	Кумулятивный процент
1	2	3	4	5	6	7
1	16,678	37,905	37,905	16,678	37,905	37,905
2	8,204	18,645	56,550	8,204	18,645	56,550
3	4,505	10,238	66,788	4,505	10,238	66,788
4	4,074	9,259	76,047	4,074	9,259	76,047
5	2,927	6,651	82,699	2,927	6,651	82,699
6	2,743	6,234	88,932	2,743	6,234	88,932
7	2,381	5,411	94,343	2,381	5,411	94,343
8	1,726	3,924	98,267	1,726	3,924	98,267
9	,752	1,709	99,976			
10	,011	,024	100,000			
11	1,74E–015	3,96E–015	100,000			
12	1,54E–015	3,49E–015	100,000			
13	9,50E–016	2,16E–015	100,000			
14	6,06E–016	1,38E–015	100,000			
15	5,80E–016	1,32E–015	100,000			

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
16	4,36E–016	9,91E–016	100,000			
17	4,03E–016	9,15E–016	100,000			
18	3,66E–016	8,32E–016	100,000			
19	3,31E–016	7,53E–016	100,000			
20	2,73E–016	6,19E–016	100,000			
21	2,57E–016	5,84E–016	100,000			
22	2,21E–016	5,02E–016	100,000			
23	2,01E–016	4,57E–016	100,000			
24	1,44E–016	3,27E–016	100,000			
25	1,19E–016	2,70E–016	100,000			
26	6,22E–017	1,41E–016	100,000			
27	3,49E–017	7,94E–017	100,000			
28	1,04E–017	2,36E–017	100,000			
29	–5,14E–017	–1,17E–016	100,000			
30	–7,73E–017	–1,76E–016	100,000			
31	–9,04E–017	–2,05E–016	100,000			
32	–1,10E–016	–2,49E–016	100,000			
33	–1,34E–016	–3,05E–016	100,000			
34	–1,57E–016	–3,56E–016	100,000			
35	–2,26E–016	–5,13E–016	100,000			
36	–2,49E–016	–5,66E–016	100,000			
37	–3,43E–016	–7,80E–016	100,000			
38	–3,54E–016	–8,05E–016	100,000			
39	–3,62E–016	–8,23E–016	100,000			
40	–4,54E–016	–1,03E–015	100,000			
41	–4,89E–016	–1,11E–015	100,000			
42	–8,19E–016	–1,86E–015	100,000			
43	–1,02E–015	–2,32E–015	100,000			
44	–1,39E–015	–3,15E–015	100,000			

Собственные значения сортируются в порядке убывания, для чего обычно отбирается столько факторов, сколько имеется собственных значений, превосходящих по величине единицу. По существу, это означает, что если фактор имеет дисперсию, меньшую единицы, то он опускается. Этот критерий предложен Кайзером и является наиболее широко используемым [3].

Собственные векторы, соответствующие этим собственным значениям, образуют факторы; элементы собственных векторов получили название факторной нагрузки. Их можно понимать как коэффициенты корреляции между соответствующими переменными и факторами.

Для определения факторов были разработаны многочисленные методы, наиболее часто употребляемым из которых является метод определения главных факторов (компонент) [4]. Процедура выделения главных компонент подобна вращению, максимизирующему дисперсию (варимакс) исходного пространства переменных. Цель вращения заключается в максимизации дисперсии (изменчивости) «новой» переменной (фактора) и минимизации разброса вокруг нее.

Используем для расчетов один из методов вращения – варимакс с нормализацией Кайзера. Вращение сошлось за 13 итераций. Полученные результаты

представлены в табл. 2. Согласно ее данным восемь собственных факторов имеют значения, превосходящие единицу. Таким образом, для анализа отобрано только восемь факторов. Первый фактор объясняет 37,905 % суммарной дисперсии, второй – 18,645 %, третий – 10,238 %, четвертый – 9,259 %, пятый – 6,651 %, шестой – 6,234 %, седьмой – 5,411 %, восьмой – 3,924 %.

Матрица повернутых компонент представлена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица повернутых компонент

Подкритерии самооценки	Компонента							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
*X*11	,291	**,851**	,063	,206	,166	–,001	–,126	,283
*X*12	**,909**	,167	–,016	,093	,318	,037	,172	–,018
*X*13	,081	**,857**	–,150	–,171	,211	–,056	,387	,048
*X*14	,401	**,633**	–,154	,567	,209	,194	–,063	,002
*X*15	,126	,006	,664	**,709**	–,019	,064	–,103	,002
*X*21	,182	**,806**	–,201	–,096	–,145	,244	,355	,241
*X*22	,402	,306	,100	–,053	,014	–,013	**,777**	–,265
*X*23	,207	**,656**	,254	,219	,535	,053	,038	–,332
*X*24	**,648**	,374	–,203	–,055	,169	,069	,586	–,126
*X*31	,313	,464	**,660**	,333	–,208	–,283	–,104	–,056
*X*32	,524	,218	,111	**,594**	,092	,355	,221	–,285
*X*33	**,736**	,463	,106	,031	,226	,317	–,109	,230
*X*34	**,634**	,445	,251	,127	,348	,421	,085	–,053
*X*35	,314	,202	,604	**,694**	,043	–,069	,032	,080
*X*41	,241	,176	,156	,159	,192	,391	**,785**	,226
*X*42	,561	**,723**	,149	,025	–,070	,175	,184	,224
*X*43	,320	,046	,235	,016	**,913**	–,007	,002	,063
*X*44	–,066	–,087	,531	**,574**	,456	–,389	,048	–,109
*X*45	**,773**	,379	–,175	,136	,198	,351	,120	–,179
*X*511	–,414	–,025	,007	**,635**	,123	–,415	,391	,229
*X*512	**,893**	,126	,015	–,220	,127	,029	,275	,090
*X*513	–,190	,372	–,279	–,061	,092	,014	–,019	**,843**
*X*514	**,617**	–,064	–,096	–,409	,340	,494	,202	,191
*X*515	,089	,013	,319	,462	–,559	,033	–,007	**,601**
*X*516	,108	–,063	**,937**	,127	,009	,264	–,116	–,014
*X*517	,478	,444	–,221	,055	,313	**,560**	,105	,221
*X*518	,194	,004	–,077	–,054	**,846**	,343	,332	,101
*X*521	–,157	–,098	–,101	**,901**	,196	–,178	–,175	,090
*X*522	**,567**	–,065	–,006	,367	,471	,452	–,105	–,316
*X*523	,260	,188	,114	,380	**,752**	,298	,095	–,171
*X*524	,229	,366	,111	,221	**,711**	,454	,088	–,015
*X*525	,462	,174	,198	–,163	–,275	**,703**	,340	,061
*X*526	,263	,049	,007	–,030	,261	**,912**	,100	–,124
*X*527	–,058	**,626**	,569	,182	,362	,271	–,029	–,207
*X*528	,103	–,004	**,655**	,553	,162	,016	,351	–,216
*X*531	,170	,467	,085	,325	**,687**	–,284	–,272	,118
*X*532	**,725**	,044	,292	–,157	,405	,029	,141	–,357
*X*533	**,634**	,612	–,056	–,093	,081	–,120	,433	,004

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
*X*534	**,746**	,268	,263	,271	–,121	,240	–,100	–,299
*X*535	–,111	,045	,587	–,099	,318	**,706**	–,120	,123
*X*536	–,218	,185	**,916**	,149	,154	–,011	–,011	–,161
*X*537	,102	–,342	**,852**	–,057	,052	–,031	,352	,033
*X*538	,450	**,667**	,345	–,173	,017	,102	,131	–,379
*X*539	–,132	,066	,412	**,890**	,019	,113	,045	–,032

Проанализируем отобранные факторы. Найдем в каждой строке повернутой факторной матрицы ту факторную нагрузку, которая имеет наибольшее абсолютное значение. Как уже было сказано, эти факторные нагрузки следует понимать как корреляционные коэффициенты между переменными и факторами. Так, переменная *X*11 сильнее всего коррелирует с фактором 2 (величина корреляции составляет 0,851), переменная *X*12 – с фактором 1 (0,909), переменная *X*13 – также с фактором 2 (0,857) и т.д.

В рассматриваемых случаях включение отдельной переменной в один фактор, осуществляемое на основе коэффициентов корреляции, является однозначным. Все переменные можно отнести к одному из отобранных факторов.

3 Анализ выявленных факторов

Все подкритерии самооценки можно отнести к восьми факторам так, как это показано в табл. 4.

Таблица 4

Обобщенные факторы

Факторы	Подкритерий самооценки
1	2
Фактор 1 Влияние внешних и внутренних человеческих ресурсов на функционирование СМК университета	1.2 Личное участие руководства в обеспечении постоянного совершенствования СМК университета
	2.4 Механизмы информирования персонала университета и студентов о проводимой политике и стратегии
	3.3 Механизмы мотивации, вовлечения и поощрения персонала за деятельность по улучшению качества функционирования университета
	3.4 Обеспечение обратной связи и диалога между персоналом, студентами и руководством университета
	4.5 Взаимодействие с внешними партнерами (работодателями, школами и лицеями, средними специальными учебными заведениями, другими вузами)
	5.1.2 Управление документацией
	5.1.4 Планирование и построение организационной структуры системы качества, распределение ответственности и полномочий
	5.2.2 Проектирование и разработка образовательных программ
	5.3.2 Кадровое обеспечение
	5.3.3 Закупки и взаимодействие с поставщиками материальных ресурсов
	5.3.4 Управление образовательной средой

Продолжение табл. 4

1	2
Фактор 2 Обеспечение удовлетворенности стейкхолдеров	1.1 Личное участие руководства университета в формировании и развитии миссии, видения, основных ценностей, политики, основных целей и задач в области качества
	1.3 Личное участие руководства университета в работе с внешними заинтересованными сторонами (потребителями, поставщиками, партнерами, представителями общественности и др.)
	1.4 Личное участие руководства университета в обеспечении обратной связи с персоналом для улучшения своей деятельности
	2.1 Разработка и совершенствование политики и стратегии и степень участия в этих процессах заинтересованных сторон (студентов, персонала университета, потребителей, поставщиков, партнеров, представителей общественности и др.)
	2.3 Механизмы проекции внедрения политики и стратегии на все уровни управления, структурные подразделения и ключевые процессы университета
	4.2 Управление материальными ресурсами
	5.2.7 Подготовка кадров высшей квалификации (аспирантура, докторантура)
	5.3.8 Обеспечение безопасности жизнедеятельности
Фактор 3 Обеспечение качества инноваций	3.1 Кадровая политика и принципы управления развитием персонала
	5.1.6 Планирование процессов университета
	5.2.8 Научно-исследовательская и инновационная деятельность
	5.3.6 Библиотечное и информационное обеспечение
	5.3.7 Управление инфраструктурой и производственной средой
Фактор 4 Внутренние механизмы обеспечения позиций университета на рынке образовательных услуг	1.5 Личное участие руководства университета в подготовке и организации проведения лицензирования, аттестации, государственной и общественно-профессиональной аккредитации
	3.2 Механизмы определения квалификационных требований к персоналу, его подготовке и повышению квалификации
	3.5 Повышение качества рабочей среды, обеспечение социальной защиты и повышение благосостояния персонала
	4.4 Управление информационными ресурсами
	5.1.1 Внедрение процессного подхода
	5.2.1 Маркетинговые исследования рынка научных, образовательных услуг и рынка труда
	5.3.9 Социальная поддержка студентов и сотрудников университета
Фактор 5 Обеспечение совершенствования образовательной деятельности	4.3 Управление эффективностью технологий обучения и контроля знаний
	5.1.8 Процессы, связанные с постоянным улучшением, корректирующие и предупреждающие действия
	5.2.3 Довузовская подготовка и прием студентов
	5.2.4 Реализация основных образовательных программ
	5.3.1 Бухгалтерско-финансовое обеспечение научно-образовательного процесса

Окончание табл. 4

1	2
Фактор 6 Внутренние механизмы обеспечения дополнительных конкурентных преимуществ университета	5.1.7 Внутренние аудиты (проверки) и самооценка университета и его структурных подразделений
	5.2.5 Воспитательная и внеучебная работа с обучаемыми
	5.2.6 Проектирование и реализация программ дополнительного образования
	5.3.5 Издательская деятельность
Фактор 7 Обеспечение мониторинга функционирования университета	2.2 Механизмы сбора и анализа разносторонней информации о результативности и эффективности функционирования университета при формировании его политики и стратегии
	4.1 Управление финансовыми ресурсами
Фактор 8 Внутренние механизмы обеспечения качества процессов университета	5.1.3 Управление записями
	5.1.5 Построение, поддержание и развитие системы измерений и мониторинга процессов университета

Последний и решающий шаг факторного анализа состоит в обнаружении и описании смысловой связи выявленных факторов. Проведем анализ главных факторов, используя табл. 4.

Первый фактор собрал все переменные, характеризующие деятельность университета по вовлечению человеческих ресурсов для решения задач управления качеством. Данный фактор можно охарактеризовать как влияние внешних и внутренних человеческих ресурсов на функционирование СМК университета. На основании позитивных корреляционных коэффициентов участвующих переменных с фактором делаем вывод, что большое значение этого фактора означает, что результативность СМК университета в первую очередь зависит от действий персонала и его мотивации. Большое положительное значение первого фактора означает, что большая доля дисперсии зависимой переменной $X515$ объясняется независимыми переменным $X12$, $X24$, $X33$, $X45$, $X512$, $X514$, $X522$, $X532$, $X533$, $X534$, входящим в этот фактор.

Во второй фактор входят те признаки, которые указывают на аспекты деятельности университета, связанные с удовлетворенностью потребителей и заинтересованных сторон (стейкхолдеров). Этот фактор можно охарактеризовать как обеспечение удовлетворенности стейкхолдеров. Большое положительное значение второго фактора означает, что большая доля дисперсии зависимой переменной $X515$ объясняется независимыми переменным $X11$, $X13$, $X14$, $X21$, $X23$, $X42$, $X527$, $X538$, входящим в этот фактор.

В третий фактор включены признаки, соответствующие различным аспектам инновационной деятельности. Данный фактор можно охарактеризовать как обеспечение качества инноваций. Большое положительное значение третьего фактора означает, что большая доля дисперсии зависимой переменной $X515$ объясняется независимыми переменным $X31$, $X516$, $X528$, $X536$, $X537$, входящим в этот фактор.

В четвертый фактор вошли признаки, соответствующие различным аспектам положения университета на рынке образовательных услуг. Данный фактор можно охарактеризовать как внутренние механизмы обеспечения позиций университета на рынке образовательных услуг. Дисперсия зависимой переменной *X*515 объясняется независимыми переменным *X*15, *X*32, *X*35, *X*44, *X*511, *X*521, *X*539, входящим в четвертый фактор.

Пятый фактор вобрал в себя признаки, соответствующие внутренним механизмам оптимизации основного вида деятельности университета. Этот фактор можно охарактеризовать как обеспечение совершенствования образовательной деятельности. Дисперсия зависимой переменной *X*515 объясняется независимыми переменным *X*43, *X*518, *X*523, *X*524, *X*531, входящим в пятый фактор.

В шестой фактор вошли признаки, соответствующие дополнительным аспектам обеспечения конкурентоспособности университета. Шестой фактор можно охарактеризовать как внутренние механизмы обеспечения дополнительных конкурентных преимуществ университета. Дисперсия зависимой переменной *X*515 объясняется независимыми переменным *X*517, *X*525, *X*526, *X*535, входящим в шестой фактор.

В седьмой фактор вошли признаки, отражающие деятельность по мониторингу, в том числе и финансовому. Данный фактор можно охарактеризовать как обеспечение мониторинга функционирования университета. Дисперсия зависимой переменной *X*515 объясняется независимыми переменным *X*22, *X*41, входящим в седьмой фактор.

В восьмой фактор вошли признаки, относящиеся к методам менеджмента качества. Его можно охарактеризовать как внутренние механизмы обеспечения качества процессов университета. Дисперсия зависимой переменной *X*515 объясняется независимыми переменным *X*513, *X*515, входящим в седьмой фактор.

4 Поиск уравнения регрессии

Сгенерируем восемь новых переменных, названных fac1_1, fac2_1, fac3_1, fac4_1, fac5_1, fac6_1, fac7_1 и fac8_1, которые содержат вычисленные значения факторов. Получим нормализованные значения факторов. Для этого проведем сначала анализ методом главных компонент, затем вращение методом варимакса с нормализацией Кайзера. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Матрица преобразования компонент

Компонента	1	2	3	4	5	6	7	8
1	,622	,489	,233	,194	,368	,315	,208	–,064
2	–,266	–,123	,659	,642	,079	–,179	–,147	–,086
3	–,134	,655	–,324	,347	–,192	–,431	–,010	,323
4	,230	,115	,431	–,181	–,824	–,007	,192	–,005
5	–,386	,200	,146	–,054	–,051	,686	–,215	,517
6	–,365	,377	,394	–,583	,324	–,299	,157	–,097
7	–,175	–,234	–,026	,153	,075	,028	,884	,321
8	,397	–,256	,211	–,173	,172	–,350	–,215	,710

На основе полученных данных проведем множественный регрессионный анализ. В качестве результативного признака рассмотрим переменную *X*515, а в качестве факторных признаков – найденные главные компоненты fac1_1, fac2_1, fac3_1, fac4_1, fac5_1, fac6_1, fac7_1 и fac8_1 (см. табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	*t*	Знач.
	B	Станд. ошибка	Бета		
1 (Константа)	4,091	,032		126,082	,000
fac1_1	–,013	,034	–,010	–,370	,747
fac2_1	,465	,034	,381	13,673	,005
fac3_1	,417	,034	,341	12,246	,007
fac4_1	,650	,034	,532	19,089	,003
fac5_1	,431	,034	,353	12,665	,006
fac6_1	–,515	,034	–,422	–15,126	,004
fac7_1	,231	,034	,189	6,783	,021
fac8_1	,415	,034	,340	12,199	,007

В результате получено линейное уравнение регрессии:

$$X515 = 4{,}091 - 0{,}013F_1 + 0{,}465F_2 + 0{,}417F_3 + 0{,}650F_4 + \\ + 0{,}431F_5 - 0{,}515F_6 + + 0{,}231F_7 + 0{,}415F_8,$$

где F_1, F_2, …, F_8 – это главные компоненты, обозначенные ранее как переменные fac1_1, fac2_1, …, fac8_1 соответственно.

Полученное уравнение множественной регрессии показывает, что повышения степени совершенства в области построения, поддержания и развития системы измерений и мониторинга процессов университета (увеличения значения подкритерия *X*515) можно добиться путем увеличения значений следующих факторов:

– фактора fac4_1 за счет совершенствования внутренних механизмов обеспечения позиций университета на рынке образовательных услуг, причем увеличение значения fac4_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,65;

– фактора fac5_1 за счет совершенствования образовательной деятельности университета, причем увеличение значения fac5_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,43;

– фактора fac2_1 за счет обеспечения удовлетворенности стейкхолдеров, причем увеличение значения fac2_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,42;

– фактора fac3_1 за счет повышения качества инноваций, причем увеличение значения fac3_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,42;

– фактора fac8_1 за счет совершенствования внутренних механизмов обеспечения качества процессов, причем увеличение значения fac8_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,42;

– фактора fac7_1 за счет совершенствования мониторинга функционирования университета, причем увеличение значения fac7_1 на 1 увеличит значение *X*515 на 0,23.

Для каждого из семи коэффициентов регрессии найдены уровни значимости (вероятности ошибок). Статистически значимыми считаем те коэффициенты регрессии, для которых уровень значимости меньше 0,05, т.е. коэффициенты при переменных fac2_1, fac4_1, fac6_1.

При планировании мероприятий по совершенствованию системы мониторинга процессов СМК университета особое внимание следует уделить факторам fac1_1 и fac6_1, имеющим отрицательные множители в полученном уравнении регрессии. Совершенствование направлений деятельности, описываемых данными факторами, может конкурировать за ресурсы с совершенствованием системы мониторинга процессов университета.

Заключение

На основе проведенного факторного анализа выявлено восемь обобщающих факторов, отражающих потенциальные возможности СМК университета.

Реализация процедур регрессионного анализа с целью поиска уравнения регрессии, связывающего подкритерий самооценки «Построение, поддержание и развитие системы измерений и мониторинга процессов университета» с выявленными факторами, позволила выявить обобщающий фактор, наиболее влияющий на уровень совершенства системы мониторинга процессов университета.

Список литературы

1. **Короткова, Т. Л.** Исследование систем управления / Т. Л. Короткова. – М., 1998. – 357 с.
2. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика. Основы эконометрики : учебник: в 2 т. / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001.
3. **Дубров, А. М.** Многомерные статистические методы : учебник / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, В. И. Трошин. – М. : Финансы и статистика, 2000.
4. **Иберла, К.** Факторный анализ: пер. с нем. / К. Иберла. – М. : Статистика, 1980.

Мещеряков Виктор Афанасьевич
кандидат технических наук, профессор,
первый проректор,
Пензенский государственный
университет

Meshcherjakov Victor Afanasevich
a Cand.Tech.Sci., the professor,
the first pro-rector,
the Penza state university

Суровицкая Галина Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
начальник отдела планирования
и анализа Управления системой качества,
Пензенский государственный
университет

Surovitskaya Galina Vladimirovna
a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
the chief of department of planning
and the analysis of management
of quality system,
the Penza state university

E-mail: gvs_kachestvo@inbox.ru

Чугунова Варвара Валерьевна
кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра дискретной математики,
Пензенский государственный
университет

Ghugunova Varvara Valerevna
the candidate of physical and mathematical
sciences, the senior lecturer,
chair of discrete mathematics,
the Penza state university

УДК 005.6 (075.8)
Мещеряков, В. А.
Факторный анализ данных самооценки университета / В. А. Мещеряков, Г. В. Суровицкая, В. В. Чугунова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 72–85.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.3.087.92

М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, А. В. Куц

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ И СТРУКТУР ИНТЕГРИРУЮЩИХ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация. Проанализированы перспективы развития интегрирующих аналого-цифровых преобразователей, реализующих единичные и ступенчатые весовые функции.

Ключевые слова: интегрирующие АЦП, весовая функция, инструментальная погрешность, метод интегрирующего развертывающего преобразования, структура интегрирующего АЦП.

Abstract. Prospects of development of the integrating analog-digital converters realizing single and step weight functions are analyzed.

Keywords: Integrating ADC, Weight function, Tool error, Method of integrating developing transformation, Structure integrating ADC.

Введение

Анализ тенденций развития интегрирующих аналого-цифровых преобразователей (ИАЦП) за последние 25 лет показывает, что улучшение их метрологических характеристик было достигнуто в основном благодаря повышению технологического уровня элементной базы и, в известной мере, за счет удачных схемотехнических и структурных решений. Принципиально новых предложений по совершенствованию алгоритмов и структур интегрирующего развертывающего преобразования (ИР-преобразования), которые бы обеспечили заметный качественный скачок в соответствующих средствах измерений, не наблюдалось.

С развитием метода весового интегрирования появилась возможность целенаправленно изменять динамические свойства ИАЦП, что открывает новые перспективы создания средств измерения с существенно более высокими метрологическими характеристиками. Между тем разработанные ступенчатые и единичные весовые функции (СВФ и ЕВФ, соответственно), обладающие существенными преимуществами по простоте и точности реализации по сравнению с другими, реализуются в рамках классических структур ИАЦП без учета повышенных требований к динамическим свойствам элементной базы, что ограничивает эффективность их применения. Аналогично решенная в теоретическом плане задача фильтрации собственных шумов элементов схемы ИАЦП, позволяющая довести точность преобразования до точности воспроизведения используемой об-

разцовой меры напряжения, до сих пор практически не реализована. Это объясняется несоответствием потенциальных возможностей метода весового интегрирования и традиционных методов и средств интегрирующего преобразования.

1 Анализ влияния инструментальных погрешностей на погрешность ИАЦП

Сущность классического ИР-преобразования [1] состоит в формировании циклически изменяющейся развертывающей функции (РФ) $R(x, X_0, t)$, обеспечивающей заданную форму приращения координаты развертывания t от входной величины x (X_0 – опорная величина). В дальнейшем будем считать входной и опорной величинами напряжения $u_x(t)$ и U_0, соответственно, и обозначать развертывающую функцию $R(t)$.

Развертывание может осуществляться в координатах линейного и углового перемещения, числовой оси, времени и т.д. Для ИАЦП естественной координатой развертывания является время t, приращение которого наиболее удобно для точного преобразования в цифровую форму.

В этом случае уравнение ИР-преобразования записывается в виде

$$R(t_к) - R(t_н) = 0, \tag{1}$$

где $t_н$ и $t_к$ – координаты начала и конца цикла преобразования.

В развернутом виде уравнение (1) записывается как

$$R(t_к) - R(t_н) = \frac{1}{\tau_x}\int_{t_н}^{t_к} g_x(t)u_x(t)dt + \frac{1}{\tau_0}g_0(t)U_0 dt = 0, \tag{2}$$

и соответствующая характеристика преобразования

$$-\int_{t_н}^{t_к} g_x(t)dt = \frac{\tau_0}{\tau_x U_0}\int_{t_н}^{t_к} g_x(t)u_x(t)dt, \tag{3}$$

где $g_x(t)$ и $g_0(t)$ – весовые функции тракта преобразования входной и опорной величины; τ_x и τ_0 – постоянные времени преобразования по входам преобразуемой и опорной величин.

Следует отметить, что выражением (3) описываются все существующие алгоритмы ИР-преобразования, начиная от самого простого – двухтактного преобразования и заканчивая сигма-дельта АЦП [2].

Очевидно, что применением соответствующих весовых функций можно придать ИАЦП желаемые динамические свойства, например улучшить фильтрующие свойства по отношению к внешним периодическим помехам и (или) по отношению к внутренним шумам. Рассмотрим решение первой задачи на примере двухтактного преобразования с использованием СВФ, коэффициенты которой равны 1, 3, 3, 1.

Диаграммы работы устройства приведены на рис. 1, где на рис. 1,а показан вид РФ на выходе интегратора, на рис. 1,б – входное напряжение $u_x(t)$, а на рис. 1,в – вид СВФ в единых временных координатах.

В качестве информативной составляющей входного напряжения сформировано постоянное напряжение размером 2 В, а в качестве периодической помехи – синусоидальное напряжение амплитудой 4 В. Для определения эффективности фильтрующих свойств данной СВФ длительность фиксированного интервала времени T_0 задана размером 40 мс, а отклонение частоты помехи 50 Гц варьировалось в диапазоне от 51 до 58 Гц. В крайних точках диапазона влияние помехи на результат преобразования не превысило 0,006 и 0,04 % от информативной составляющей, соответственно.

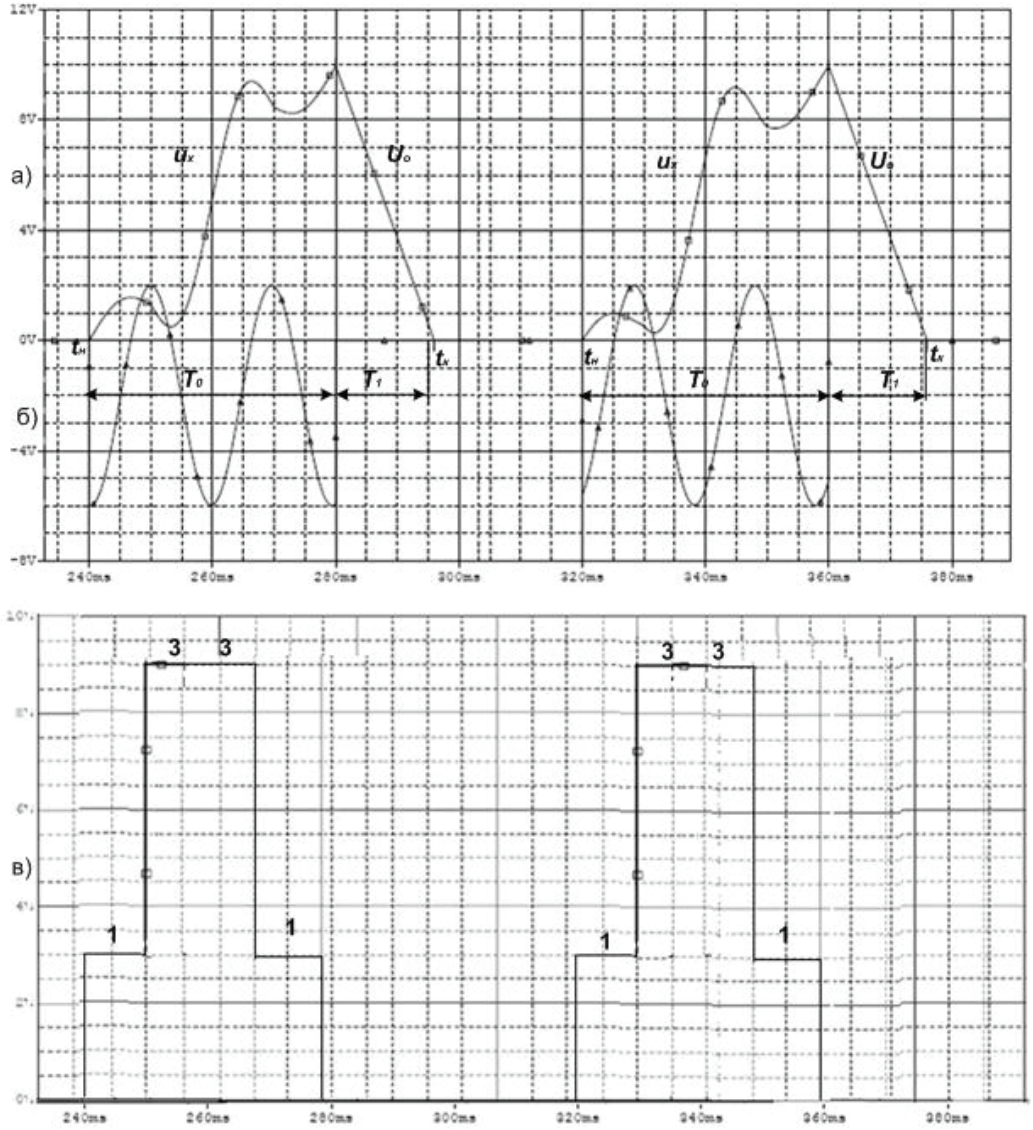


Рис. 1

Полученные результаты полностью согласуются с существующей теорией ИР-преобразования [3].

Усложним задачу, добавив к требованию улучшения фильтрующих свойств ИАЦП, по отношению к внешним помехам, одновременное обеспечение инвариантности к внутренним шумам $e_{\text{с}}(t)$.

Обеспечить подавление внутренних шумов существенно сложнее, чем внешних помех. Это объясняется тем, что спектры шумов и полезного сигнала перекрываются, а для решения указанной задачи необходимо обеспечить различие частотных характеристик трактов прохождения полезного сигнала и шума, причем каждому тракту предъявляются свои требования. Полезный сигнал необходимо преобразовать с минимальными потерями информации, а тракт прохождения шума должен обеспечить его максимальное подавление. Такая возможность в ИАЦП имеется благодаря пространственному разделению полезного сигнала и шума (они имеют разные точки приложения в тракте преобразования). Для этого достаточно подвергнуть полезный сигнал преобразованию в соответствии с некоторой простейшей ЕВФ, которую обозначим как $g_1(t)$, причем весовая функция $g_e(t)$ выбирается по критерию обеспечения заданного подавления внутренних шумов. В общем случае $g_1(t)$ должна быть такой, чтобы при данной $g_e(t)$ весовая функция $g_x(t)$ содержала наибольшую постоянную составляющую (последнее определяет чувствительность к полезному сигналу).

Вышесказанное делает целесообразным разбиение всей задачи обеспечения инвариантности к собственным шумам на две части:

1) улучшение фильтрующих свойств по отношению к низкочастотным составляющим спектра собственных шумов. Для этого достаточно, чтобы весовая функция $g_e(t)$ обеспечивала минимальный уровень АЧХ преобразователя в низкочастотной части спектра;

2) улучшение фильтрующих свойств по отношению к шумам во всей полосе частот. Для этого необходимо обеспечить минимальную площадь под кривой АЧХ тракта преобразования шума.

Первая задача теоретически достаточно эффективно решается путем применения ЕВФ $g_e(t)$ в виде первой разности от интегральных значений напряжения шумов, что позволяет достичь инвариантности результата преобразования к напряжению смещения $e_{\text{с}}$ канала преобразования. Совокупность весовых функций показана на рис. 2.

Из рисунка видно, что реализация данной задачи в рамках метода двухтактного интегрирования не дает должного эффекта из-за зависимости одного из полупериодов ЕВФ $g_e(t)(T_0 + T_1)$ от значения преобразуемого напряжения U_x, т.е. для напряжения смещения $R(t_{\text{к}}) - R(t_{\text{н}}) \neq 0$.

Решенная в теоретическом плане задача эффективной фильтрации собственных шумов и АЦП во всей полосе частот с помощью гребенчатых ЕВФ в виде многократно повторенных элементарных (например, в виде первой разности) ЕВФ до сих пор практически не реализована. Наиболее очевидный путь реализации таких ЕВФ, состоящий в многократном суммировании ряда последовательных результатов ИР-преобразования, осуществляемого в соответствии с элементарной ЕВФ, нецелесообразен из-за накопления погрешности квантования. Поэтому единственной альтернативой является реализация гребенчатых ЕВФ в аналоговом виде.

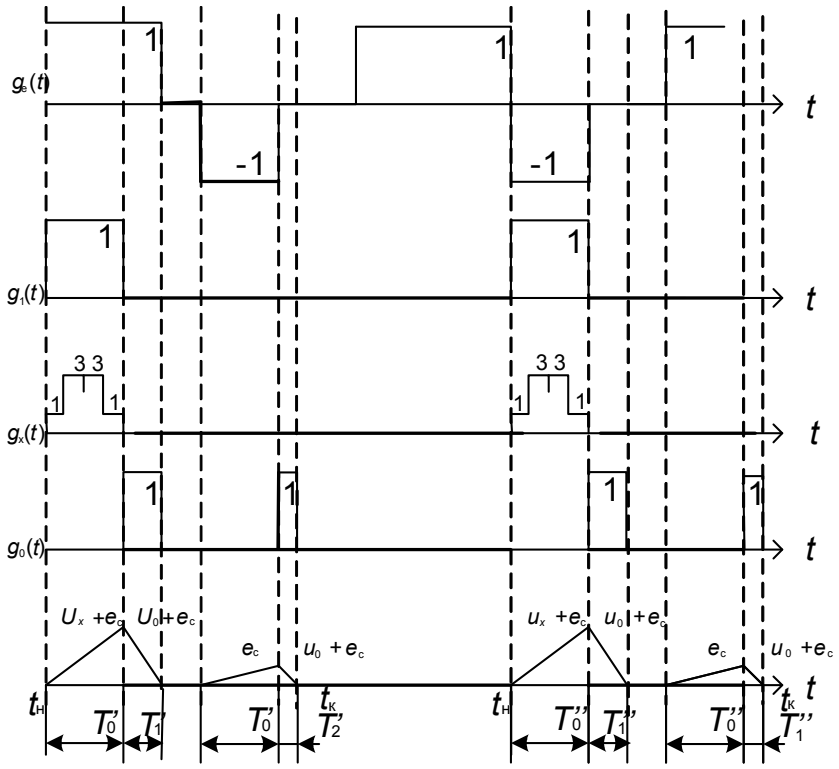


Рис. 2

2 Разработка метода интегрирующего развертывающего преобразования с фиксированным приращением развертывающей функции

Для решения вышеуказанных задач был разработан метод ИР-преобразования с фиксированным приращением развертывающей функции.

Разработанный метод в отличие от классического, предполагающего обязательное условие получения нулевого приращения развертывающей функции за цикл преобразования, описывается системой уравнений:

$$\frac{1}{\tau_x}\int_{t_н'}^{t_к'} g_x(t)u_x(t)dt + \frac{1}{\tau_e}\int_{t_н'}^{t_к'} g_e'(t)e(t)dt + \frac{1}{\tau_0}\int_{t_н'}^{t_к'} g_0'(t)U_0 dt = R_n,$$

$$\frac{1}{\tau_e}\int_{t_н''}^{t_к''} g_e''(t)e(t)dt + \frac{1}{\tau_0}\int_{t_н''}^{t_к''} g_0''(t)U_0 dt = R_n, \qquad (4)$$

из которой может быть в обобщенном виде определена характеристика преобразования:

$$\int_{t_н'}^{t_к''} g_0(t)dt = \frac{\tau_0}{\tau_x U_0}\int_{t_н'}^{t_к''} g_x(t)U_x(t)dt + \frac{\tau_0}{\tau_x U_0}\int_{t_н'}^{t_к''} g_e(t)e(t)dt, \qquad (5)$$

где $t'_н, t''_н, t'_к, t''_к$ – соответственно, моменты начала и конца первого и второго циклов преобразования; τ_e – постоянная времени канала преобразова-

ния собственных шумов $e(t)$ элементов схемы ИАЦП; $g_0(t) = g_0''(t) - g_0'(t)$ и $g_e(t) = g_e''(t) - g_e'(t)$; R_n – фиксированное приращение РФ.

Полученное выражение справедливо для общего случая произвольного изменения величины $e(t)$, т.е. $e(t)$ – обозначение реального процесса изменения во времени собственных шумов элементов схемы ИАЦП. Этим подчеркивается возможность эффективного подавления не только инфранизкочастотной составляющей спектра собственных шумов, но и высокочастотных составляющих путем надлежащего выбора функции $g_e(t)$.

Рассмотрим ряд примеров алгоритмов ИР-преобразования с использованием данного метода.

Для точного воспроизведения ЕВФ $g_e(t)$ в виде первой разности от интегральных значений напряжения шумов необходимо, чтобы конечные точки $R(t)$ имели одинаковые координаты относительно начала каждого цикла. Что касается ординат этих точек, то их равенство выполняется всегда с точностью до порога чувствительности сравнивающего устройства. Равенство абсцисс означает равенство длительностей циклов.

Один из возможных вариантов формирования соответствующей развертывающей функции $R(t)$ представлен на рис. 3 [4].

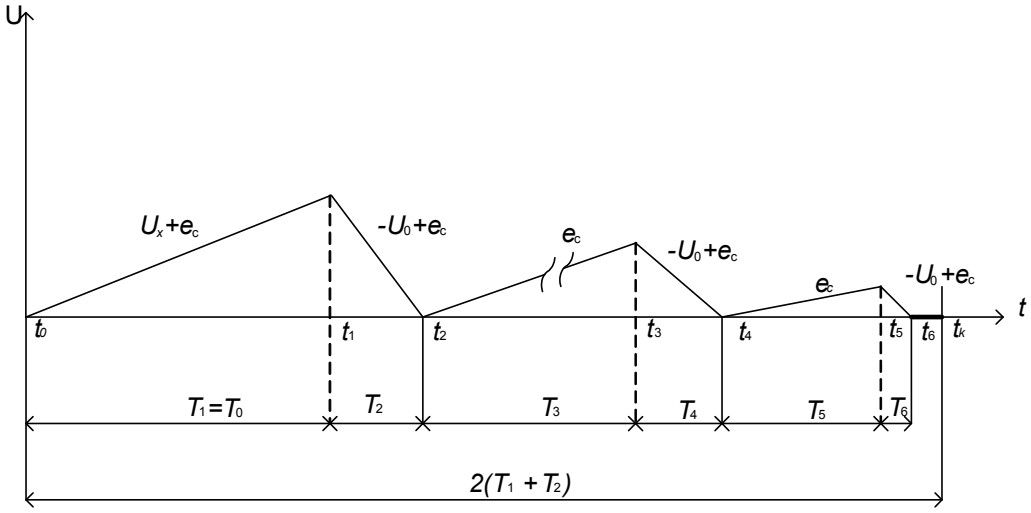


Рис. 3

В первом такте, в соответствии с рис. 3, за фиксированное время $T_1 = T_0$ интегрируют измеряемое напряжение U_x совместно с напряжением смещения e_c тракта преобразования. После этого осуществляют списывание до нуля накопленного интеграла путем интегрирования опорного напряжения U_0. Как следует из временной диаграммы (рис. 3), в течение интервала времени $[t_н, t_2] = T_1 + T_2 = T$ процесс описывается выражением

$$e_c(T_1 + T_2) + U_x T_1 - U_0 T_2 = 0 . \quad (6)$$

Далее осуществляют поочередное интегрирование напряжения смещения e_c и опорного напряжения U_0, причем интервал T_{2i+1} $(i = 1, 2, 3, ..., n)$ интегрирования смещения e_c каждый раз задают меньше оставшейся части $T_{ост.}$ суммарного интервала времени $t_k - t_2 = T_1 + T_2 = T$ на величину $kT_{ост.}$, где $k = (e_{max} / U_0)$, а e_{max} – максимальное значение напряжения смещения для используемой элементной базы в заданном температурном диапазоне работы устройства. Для $i = 1$ значение $T_{ост.1} = t_k - t_2 = T$. В соответствии с этим длительность $T_3 = (1 - k)T$, для $i = 2$ длительность $T_5 = (1 - k)T_{ост.2} = (1 - k)(T - T_3 - T_4)$. На рис. 3 показаны только два интервала. Этот процесс продолжается до тех пор, пока оставшийся интервал $T_{ост.i}$ не станет пренебрежимо малым.

Процесс в течение суммарного интервала времени $[t_2, t_к]$ описывается соотношением

$$e_c(T_1 + T_2) - U_0 \sum_{i=2}^{n} T_{2i} = 0, \tag{7}$$

где n – число интервалов интегрирования напряжения смещения.

Вычитая из выражения (6) выражение (7), получим функцию преобразования:

$$T_2 - \sum_{i=2}^{n} T_{2i} = \frac{U_x}{U_0} T_1 . \tag{8}$$

Выражение (8) показывает, что напряжение смещения e_c не оказывает влияние на точность измерения напряжения U_x, если точно выполняется равенство $t_к - t_2 = T_1 + T_2$ и разность $t_к - t_{2i}$ (где t_{2i} – момент окончания последнего информативного интервала времени T_{2i}) равна нулю.

Первое условие обеспечивается с точностью до периода квантующих импульсов, с помощью которых формируются интервалы времени T_1 и T_2. Применение кварцевых генераторов частоты позволяет реально снизить эту погрешность до уровня не более 10^{-6} %.

Второе условие связано с количеством n числа повторений операций интегрирования напряжения смещения e на интервале $[t_2, t_к]$.

Для определения этого числа n можно написать следующие очевидные соотношения. Если условно принять длительность суммарного интервала времени $T_1 + T_2$ за единицу ($T_1 + T_2 = T = 1$), то после первой операции интегрирования напряжения смещения и списывания накопленного интеграла опорным напряжением до нуля для оставшейся части единичного интервала будет справедливо соотношение $T_{ост.1} \le kT$, после второй операции – $T_{ост.2} \le k^2 T$, после третьей операции – $T_{ост.3} \le k^3 T$, в общем случае – $T_{ост.n} \le k^n T$. Задавая допустимое значение погрешности Δ (погрешности задания суммарного интервала времени) и учитывая, что $T = 1$, получаем уравнение для определения требуемого числа n операций интегрирования напряжения смещения $k^n = \Delta$, откуда $n = \lg\Delta / \lg k$.

Для определения конкретных значений n необходимо выбрать тип элементной базы. Возьмем, например, операционный усилитель INA128 фирмы Texas Instruments с $e_{\max} \approx 100 \cdot 10^{-6}$ В в гарантированном фирмой-изготовителем диапазоне температур.

В этом случае для предела измерения 1 В ($U_0 = 1$ В) значение $k_1 = 10^{-4}$, для предела 10^{-1} В $k_2 = 10^{-3}$, для предела 10^{-2} В $k_3 = 10^{-2}$, для предела 10^{-4} В $k_4 = 10^{-1}$. Для значения погрешности $\Delta = 10^{-6}$, соответственно, получим $n_1 \le 2$, $n_2 = 2$, $n_3 = 3$, $n_4 = 6$, т.е. приемлемое с практической точки зрения число итераций.

Данный алгоритм достаточно сложен в реализации, поскольку e_{c} может иметь произвольную полярность. Это определяет необходимость введения либо операции определения полярности с использованием двухполярного опорного напряжения, либо введения смещения с использованием однополярного опорного напряжения. В первом случае симметрия опорных напряжений, а во втором – точность формирования смещения должны соответствовать классу точности ИАЦП.

Задача преобразования двухполярного напряжения в рамках нового метода решается путем формирования фиксированного приращения РФ за цикл преобразования (рис. 4) [5].

Размер фиксированного приращения РФ определяется уровнем срабатывания сравнивающего устройства. Для этого по окончании интегрирования U_x в течение фиксированного интервала времени длительностью T_0 процесс интегрирования U_0 продолжается до момента достижения накопленным интервалом заданного порогового уровня. Для уменьшения влияния шумов организуется еще один цикл преобразования, отличающийся от первого тем, что в течение интервала длительностью T_0 осуществляется интегрирование напряжения шумов канала преобразования, при этом результат определяется как разность интервалов времени интегрирования опорного напряжения в первом и втором циклах. Для обеспечения равенства длительностей циклов необходимо обеспечить независимость длительности первого полупериода ЕВФ $g_e(t)$ от размера преобразуемого напряжения U_x. С этой целью в каждом цикле преобразования осуществляют формирование n дополнительных участков РФ, на которых она получает фиксированное приращение. На рис. 4 показан один участок. На этих участках РФ формируется путем поочередного интегрирования напряжения шумов (полагаем, что среднее значение напряжения шумов за время преобразования неизменно) и опорного напряжения, аналогично как при формировании РФ на основном участке во втором цикле. При этом результат преобразования определяется как разность времен интегрирования опорного напряжения в первом и втором циклах и имеет вид

$$T = \frac{U_x}{U_0} T_0 \left(1 - \frac{e_{\text{c}}^n}{U_0^n} \right). \qquad (9)$$

Формирование дополнительных участков РФ можно осуществлять либо увеличением числа пороговых уровней (здесь фиксированное приращение определяется разностью двух соседних пороговых уровней), либо использо-

ванием одного порогового уровня и n участков с нулевым фиксированным приращением (за счет интегрирования вспомогательного опорного напряжения E_0 в течение фиксированного интервала времени ΔT_0). На рис. 5 [6] показана временная диаграмма указанного процесса.

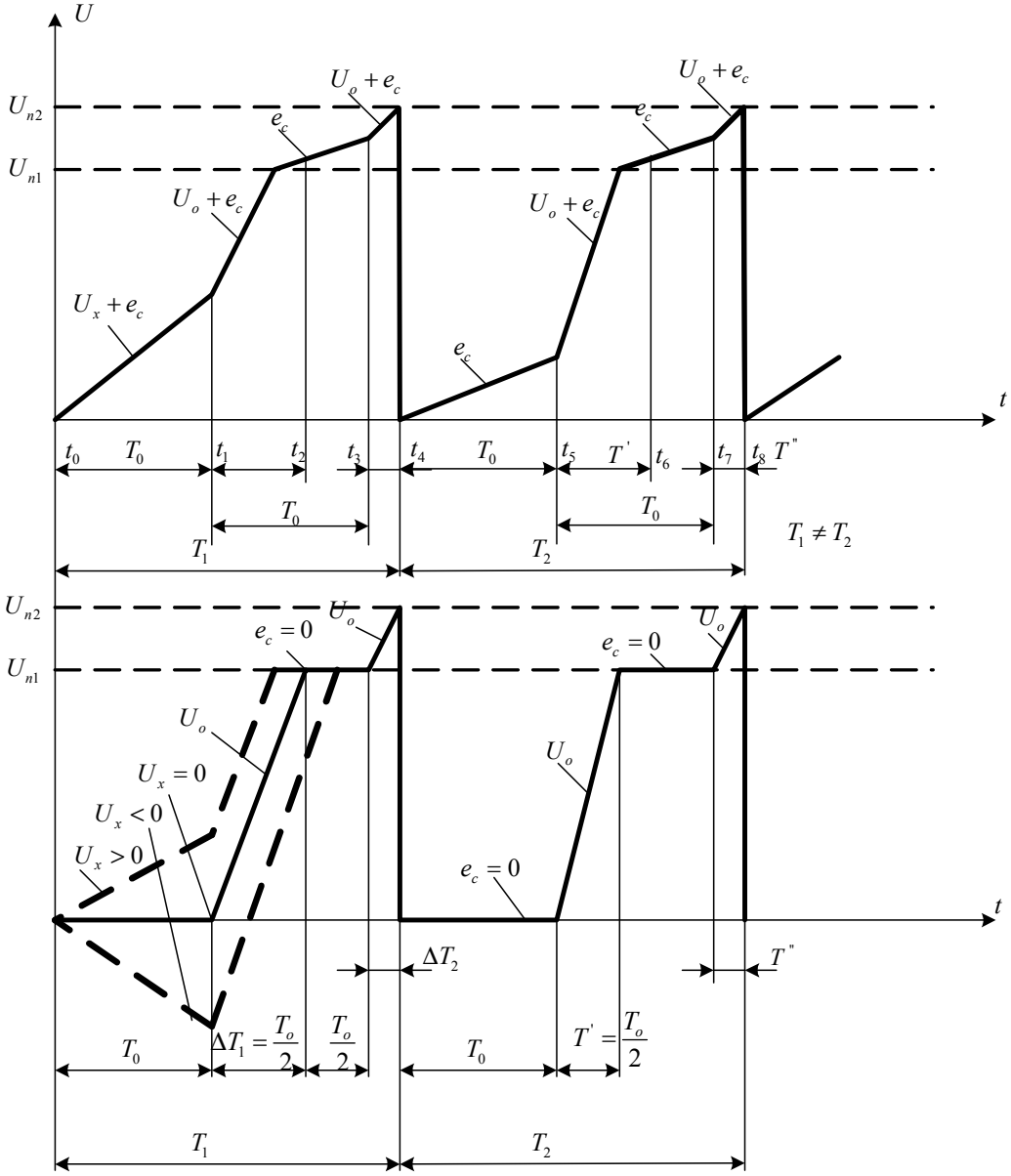


Рис. 4

В обоих случаях процесс сближения длительности циклов носит итерационный характер и описывается линейным разностным уравнением

$$\rho[i] = \alpha + \beta[i], \tag{10}$$

где α, β – коэффициенты, зависящие от параметров процесса преобразования и определяющие характер и скорость сходимости итерационного процес-

са. Для разработки алгоритма, более эффективного с точки зрения сходимости итерационного процесса, была реализована идея наискорейшего спуска, применяемая при проектировании нелинейных систем автоматического управления методом фазовой плоскости. Его особенность (рис. 6) [7] состоит в том, что с помощью второго интегратора формируется вспомогательная развертывающая функция ВРФ (на рисунке показана штриховой линией), которая служит как бы направляющим шаблоном, по которому движется изображающая точка формируемой РФ после того, как траектории РФ и ВРФ пересекутся.

Для этого алгоритма, по сравнению с предыдущим, скорость сходимости итерационного процесса увеличивается более чем в два раза.

Задача подавления шумов во всей полосе частот решается путем реализации гребенчатой ЕВФ в аналоговом виде (рис. 7, 8) [8], для чего формируются две развертывающие функции ($R_x(t)$ – интегрированием входного напряжения и $R_e(t)$ – интегрированием напряжения шумов) в одном канале преобразования. Достигаемый результат показан на рис. 8 в виде модуля АЧХ преобразователя, реализуемой по отношению к собственным шумам для различных значений n.

Для сравнения штриховой линией изображена кривая АЧХ для прямоугольной весовой функции. По мере увеличения n площадь под кривой уменьшается, тем самым уменьшается мощность шума на выходе ИАЦП, как известно, равная

$$\int_0^{\infty} G(\overline{\omega}) A^2(\overline{\omega}) d\overline{\omega}, \qquad (11)$$

где $G(\overline{\omega})$ – спектральная плотность мощности собственных шумов; $\overline{\omega} = \omega T_0 / 2$ – относительная частота.

Таким образом, при любом n осуществляется полное подавление напряжения смещения и существенное подавление инфранизкочастотных и низкочастотных составляющих спектра уже при $n = 8$.

Все рассмотренные варианты относятся к алгоритмам ИР-преобразования с разновременным интегрированием входного и опорного напряжений. Такие алгоритмы отличаются простотой схемной реализации, но существенно более высокая точность преобразования может быть достигнута при реализации алгоритмов с одновременным интегрированием входного и опорного напряжения, например, сигма-дельта АЦП.

При реализации таких алгоритмов, как известно, становится существенной погрешность от коммутационных выбросов, возникающих при переключении опорных напряжений. При реализации таких алгоритмов в рамках рассматриваемого метода данная погрешность существенно уменьшается за счет компенсации во втором цикле. Кроме того, существенно снижаются требования, предъявляемые к симметрии опорных напряжений [9].

Особенности алгоритмов с фиксированным приращением РФ необходимо учитывать при создании структур соответствующих ИАЦП. За основу решения этой задачи был взят известный принцип разделения функций, который формируется как «…процесс все большего разделения функций между отдельными узлами структуры и создания для каждого из узлов условий решения основной, возлагаемой на него задачи» [2].

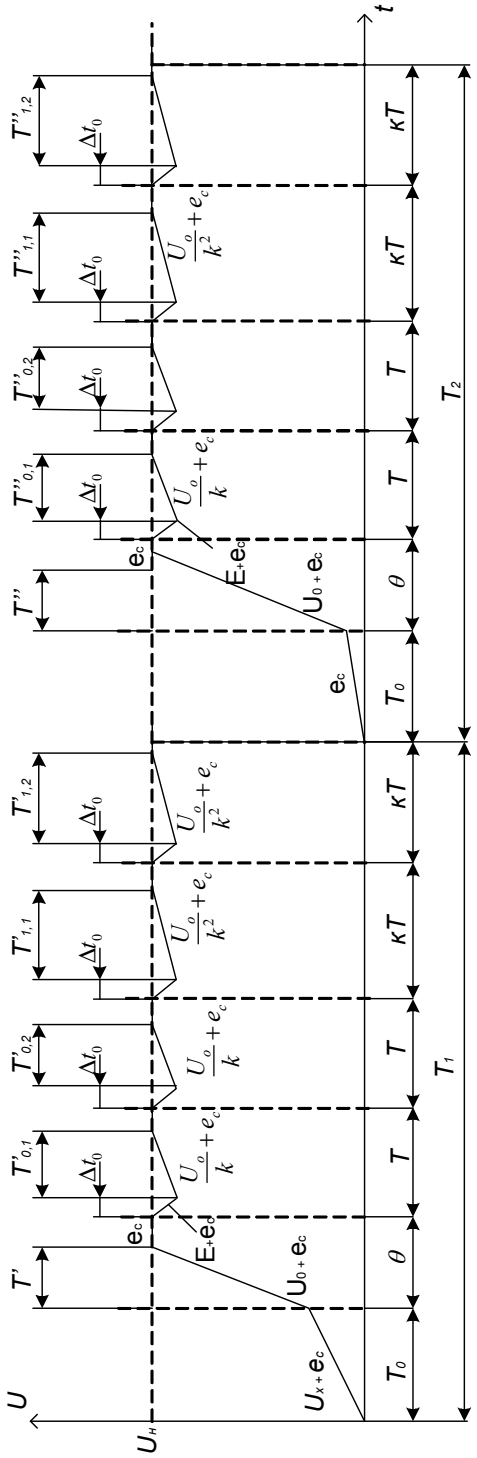

U
t
$U_н$
$U_x + e_c$
$U_0 + e_c$
$E + e_c$
e_c
$\frac{U_o}{k} + e_c$
$\frac{U_o}{k^2} + e_c$
Δt_0
T'
$T'_{0,1}$
$T'_{0,2}$
$T'_{1,1}$
$T'_{1,2}$
T''
$T''_{0,1}$
$T''_{0,2}$
$T''_{1,1}$
$T''_{1,2}$
T_0
θ
T
κT
T_1
T_2

Рис. 5

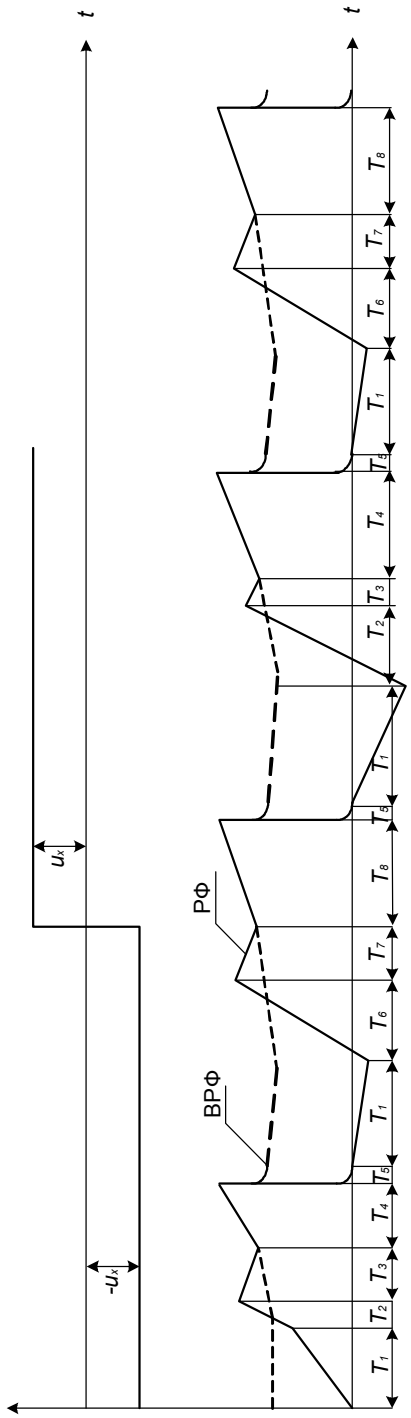

t
u_x
$-u_x$
РФ
ВРФ
T_1
T_2
T_3
T_4
T_5
T_6
T_7
T_8

Рис. 6

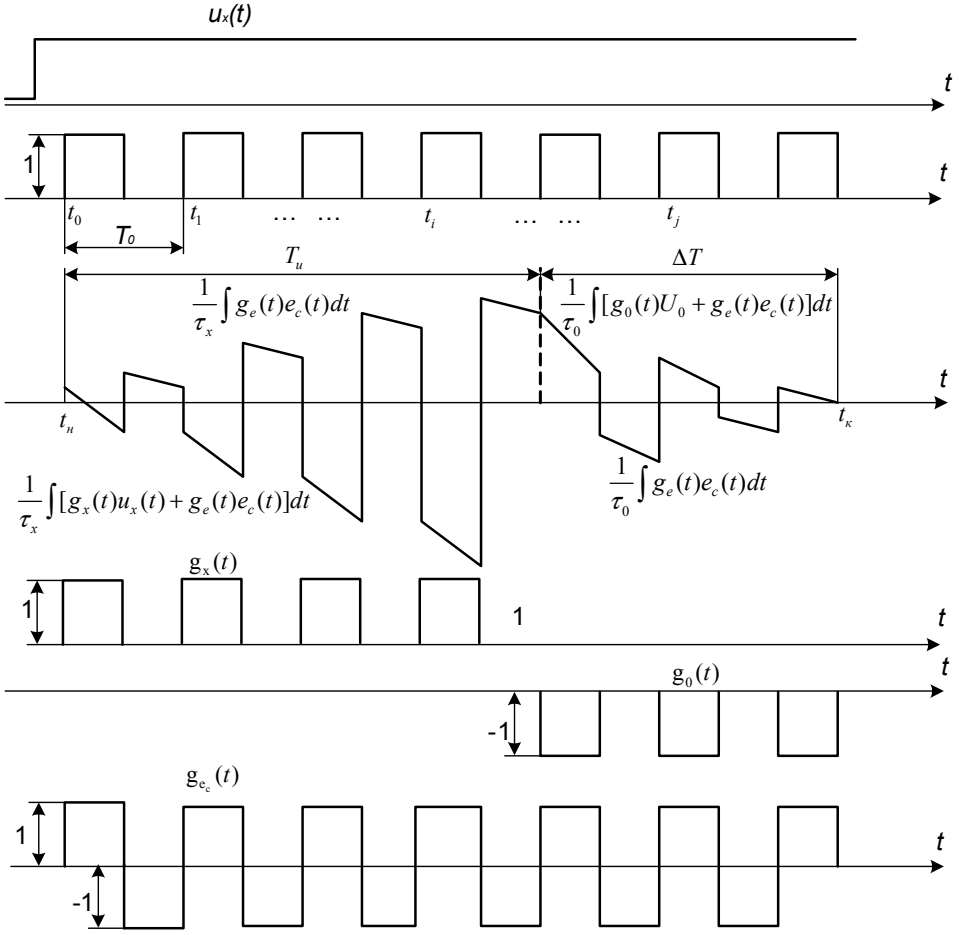

$u_x(t)$
t
1
t_0
t_1
t_i
t_j
T_0
$T_и$
ΔT
$\frac{1}{\tau_x}\int g_e(t)e_c(t)dt$
$\frac{1}{\tau_0}\int [g_0(t)U_0 + g_e(t)e_c(t)]dt$
$t_н$
$t_к$
$\frac{1}{\tau_x}\int [g_x(t)u_x(t) + g_e(t)e_c(t)]dt$
$\frac{1}{\tau_0}\int g_e(t)e_c(t)dt$
$g_x(t)$
$g_0(t)$
-1
$g_{e_c}(t)$

Рис. 7

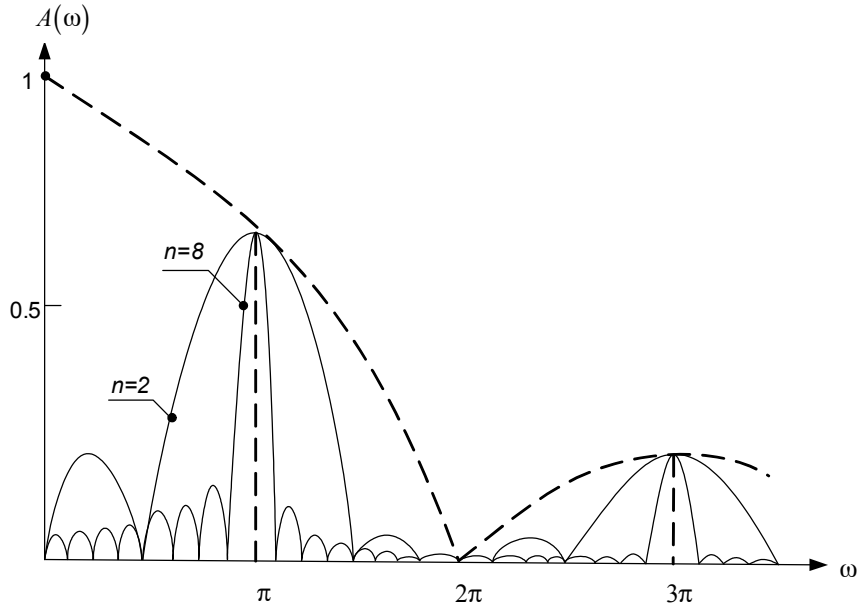

$A(\omega)$
1
0.5
n=8
n=2
π
2π
3π
ω

Рис. 8

Например, для уменьшения требований к параметрам ключей при реализации ЕВФ применено следующее разделение функций между ними: одни ключи обеспечивают только реализацию алгоритма двухтактного преобразования, другие – реализацию ЕВФ. С этой целью интегратор выполнен на двух операционных усилителях (ОУ) с общей RC-цепью. Новая реализация алгоритма обеспечивается подключением интегрирующего конденсатора к выходам ОУ, а ЕВФ – путем подключения и отключения резистора к земляной шине.

Заключение

Рассмотрение всех разработанных структур ИАЦП невозможно провести в рамках данной работы. Поэтому только укажем, что реализация в рамках рассматриваемого метода алгоритма с разновременным интегрированием входного и опорного напряжений обеспечила приведенное значение аддитивной погрешности ИАЦП не более 0,0005 % в диапазоне температур окружающей среды от +20 до +80 °С (пределы U_x равны ±5 В, длительность одного цикла преобразования составляет 40 мс). Мультипликативная погрешность практически определяется стабильностью используемой образцовой меры напряжения, а значения погрешности нелинейности не превысили 0,001 %. Важно заметить, что указанные характеристики получены на стандартных (общего назначения) ОУ и ключах.

Таким образом, применение рассмотренного метода ИР-преобразования открывает возможность создания ИАЦП прецизионной точности.

Список литературы

1. **Шахов, Э. К.** Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. **Шахов, Э. К.** Реализация концепций ΔΣ-АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин, А. И. Надев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006. – № 6. – С. 226–237. – (Технические науки).
3. **Шахов, Э. К.** Разработка основ теории и новых принципов построения интегрирующих развертывающих преобразователей : автореф. дис. … д-ра техн. наук / Э. К. Шахов. – Куйбышев : КПИ, 1978. – 42 с.
4. А.с. 1241131 (СССР). Способ измерения сигналов низкого уровня / Шахов Э. К., Михотин В. Д., Мошнин А. Н., Юрманов В. А., Слюсарев С. А. // Опубл. в Б.И., 1986, № 24.
5. А.с. 1405116 (СССР). Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования / Шахов Э. К., Михотин В. Д., Голышевский О. А., Юрманов В. А., Замараев Ю. П., Пильев М. А. // Опубл. в Б.И., 1988, № 23.
6. А.с. 1358095 (СССР). Способ интегрирующего аналого-цифрового преобразования / Шахов Э. К., Михотин В. Д., Шляндин В. М., Юрманов В. А., Пильев М. А. // Опубл. в Б.И., 1987, № 45.
7. А.с. 1220550 (СССР). Интегрирующий аналого-цифровой преобразователь / Шахов Э. К., Михотин В. Д., Федонин А. И., Юрманов В. А., Ежов В. А. // Опубл. в Б.И., 1985, № 24.
8. А.с. 1591184 (СССР). Способ интегрирующего преобразования напряжения в интервал времени / Шахов Э. К., Михотин В. Д., Юрманов В.А., Мартынов Г. В. // Опубл. в Б.И., 1990, № 33.
9. А.с. 1410275 (СССР). Интегрирующий преобразователь напряжения в код / Шахов Э. К., Шигирев Е. А., Юрманов В. А., Сипягин Н. А. // Опубл. в Б.И., 1988, № 26.

Михеев Михаил Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Mikheyev Michael Jurevich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
managing chair of information
technologies and systems,
the Penza state technological academy

E-mail: mix@pgta.ac.r

Юрманов Валерий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационных
технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Jurmanov Valery Anatolevich
a Cand. Tech. Sci., the senior lecturer,
chair information
technologies and systems,
the Penza state technological academy

Куц Александр Валентинович
старший преподаватель,
кафедра информационных
технологий и систем,
Пензенская государственная
технологическая академия

Kuts Alexander Valentinovich
the senior teacher,
chair information technologies
and systems,
the Penza state technological academy

УДК 621.3.087.92
Михеев, М. Ю.
Совершенствование алгоритмов и структур интегрирующих аналого-цифровых преобразователей / М. Ю. Михеев, В. А. Юрманов, А. В. Куц // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 86–99.

УДК 621.396.677:519.711.3

А. Н. Якимов, С. А. Яковлев

ПОСТРОЕНИЕ КАРКАСНОЙ МОДЕЛИ КРИВОЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ

Аннотация. Рассмотрен процесс построения каркасной модели влияния механических воздействий на конструкции и характеристики излучения микроволновой антенны, основанной на взаимосвязи ее электродинамической и механической моделей. Приведены результаты расчета характеристик направленности антенны с учетом механических воздействий.

Ключевые слова: антенна, деформация, модель, излучение.

Abstract. Process of construction of frame model of influence of mechanical actions on a design and characteristics of radiation of the microwave antenna, based on interrelation of its electrodynamic and mechanical models, is considered. Result of calculation of directional characteristics of antenna is adduced.

Keywords: antenna, deformation, model, radiation.

Введение

Жесткие условия эксплуатации оказывают значительное влияние на работоспособность и надежность работы микроволновых антенн. Отказы, связанные с потерей механической прочности в конструкциях антенн, обычно выявляются лишь на завершающих этапах разработки и приводят к необходимости длительной оптимизации конструкции, что в конечном итоге сказывается на сроках и стоимости проектирования. В связи с этим перспективным направлением в проектировании микроволновых антенн является их математическое моделирование с учетом влияния вибрационных воздействий.

1 Постановка задачи

При проектировании не всегда имеется полная информация о поведении антенн в процессе эксплуатации, что затрудняет построение адекватной модели разрабатываемой антенны в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим особую актуальность приобретает построение математических моделей конструкций разрабатываемых антенн и исследование их характеристик с учетом влияния внешних вибрационных воздействий [1–3].

Существующие модели в недостаточной степени учитывают сложные формы излучающей поверхности, возникающие при деформации.

Так, например, классический метод моделирования вибрационных воздействий, основанный на построении матриц жесткости, при исследовании деформаций антенн сложной пространственной конфигурации приводит к большому объему вычислений, требующих использования сверхмощных вычислительных машин и значительных затрат машинного времени.

В связи с этим перспективными могут оказаться каркасные вибрационная и электродинамическая модели микроволновой антенны, позволяющие учитывать влияния вибрационных воздействий на характеристики микроволновой антенны с незначительными затратами времени и вычислительных средств.

2 Построение модели

При построении каркасных моделей микроволновой антенны двумерная аппроксимация излучающей поверхности сводится к одномерной кусочно-линейной аппроксимации функций, образующих эту излучающую поверхность. При этом совокупность плоских сечений этой поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, параллельных плоскостям Ozx и Ozy правой декартовой системы координат, образует криволинейную сетку с узлами в точках взаимного пересечения одномерных сечений. Узлы криволинейной сетки, принадлежащие излучающей поверхности, при кусочно-линейной аппроксимации остаются неизменными, а криволинейные отрезки, соединяющие их, заменяются стержнями квадратного сечения. При этом сторона квадрата сечения стержня выбирается равной толщине профиля излучающей поверхности. В результате гладкая излучающая поверхность заменяется каркасной (стержневой) моделью аппроксимации с прямоугольными или квадратными ячейками (в зависимости от шага дискретизации), а при дополнительном разбиении – моделью с треугольными ячейками [4].

Рассмотрим, например, излучающую поверхность в виде зеркала с параболическим профилем. Такая криволинейная поверхность, синтезируемая в процессе проектирования, может быть описана следующей функцией [2]:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f}, \tag{1}$$

где x, y, z – координаты текущих точек излучающей поверхности в прямоугольной декартовой системе координат; f – фокусное расстояние.

Одномерное сечение поверхности зеркала с параболическим профилем в случае $y = 0$ опишется одномерной функцией $z(x)$ в плоскости Ozx:

$$z = \frac{x^2}{4f}. \tag{2}$$

В векторной интерпретации эта кривая представляет собой годограф векторной функции $\mathbf{r}$ скалярных аргументов x, y и z. Учитывая, что рассматривается осесимметричная антенна, целесообразно осуществлять ее равномерное разбиение относительно центра, совмещенного с центром декартовой системы координат. Интервал равномерного разбиения функции при этом определим как разность Δr радиус-векторов узловых точек при равномерной дискретизации этой кривой:

$$\Delta r = r_k - r_{k-1}, \tag{3}$$

где k = 1, 2, ..., K; K – максимальный порядковый номер индекса радиус-вектора узловой точки сечения параболоида в полупространстве Ozx с положительной координатой x. При этом индекс $k - 1 = 0$ соответствует координатам $x = 0$, $z = 0$.

Для равномерной дискретизации годографа векторной функции, описывающей параболический профиль в декартовой системе координат, примем шаг дискретизации равным ΔL, тогда, записав функционал вида [2]

$$f(x)=\left|\Delta L-\sqrt{\left(x_k-x_{k-1}\right)^2+\left(z_k-z_{k-1}\right)^2}\right|, \qquad (4)$$

где x_k, x_{k-1}, z_k, z_{k-1} – индексированные координаты крайних узловых точек линейных элементов дискретизации антенны, мы можем определить его минимумы, найти координату x_k и по формулам (1), (2) определить соответствующую координату z_k.

Приняв полученную узловую точку в качестве исходной, используя формулы (2), (4), можем определить следующую узловую точку и т.д. Последний интервал при таком разбиении может оказаться меньше заданного, тогда в качестве узловой точки выбирается точка x, соответствующая крайней точке апертуры зеркала. По полученному вектору-строке координат x узловых точек параболы, в силу ее симметрии, можно легко получить вектор-строку координат x, определяющий все сечение параболоида $\mathbf{X}=[x_k]=(x_1, x_2, ..., x_n)$. Эта операция может быть осуществлена путем симметричного отражения относительно нуля всех элементов вектора-строки, исключая ноль, с противоположным знаком и их присоединения слева к исходному вектору-строке. Соответствующий вектор-строка координат z узловых точек $\mathbf{Z}=[z_k]=(z_1, z_2, ..., z_n)$ может быть получен по формуле (2), при этом максимальный порядковый номер индекса элемента вектора строки $n=2K+1$. Таким образом, получим множество векторов векторного пространства, описывающее сечение параболической антенны.

Если, например, принять $x=0$ и для сечения параболической поверхности в плоскости Ozy

$$z=\frac{y^2}{4f} \qquad (5)$$

провести дискретизацию с интервалом ΔL, то по методике, приведенной выше, получим множество векторов векторного пространства, описывающее сечение параболической антенны в плоскости Ozy.

Соединением матриц-строк в матрицу-столбец, а матриц-столбцов в матрицу-строку формируем прямоугольные матрицы размером $m\times n$:

$$\mathbf{X}=[x_{ik}]=\begin{bmatrix}\mathbf{X_1}\\ \mathbf{X_2}\\ \mathbf{...}\\ \mathbf{X_n}\end{bmatrix},\ \mathbf{Z}=[z_{ik}]=\begin{bmatrix}\mathbf{Z_1}\\ \mathbf{Z_2}\\ \mathbf{...}\\ \mathbf{Z_n}\end{bmatrix},\ \mathbf{Y}=[y_{ik}]=\begin{bmatrix}\mathbf{Y_1}\\ \mathbf{Y_2}\\ \mathbf{...}\\ \mathbf{Y}_m\end{bmatrix}. \qquad (6)$$

Таким образом, формируются матрицы координат узловых точек излучающей поверхности в декартовой системе координат. Полученные матрицы определяют область возможного решения или область проектирования.

Для выделения границы параболической поверхности все элементы матрицы $\mathbf{Z}$, минимально превышающие расчетное значение координаты внешней границы параболоида z_g, приравниваются z_g, для них определяются соответствующие координаты x и y, являющиеся элементами мат-

риц $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$. Остальные же элементы матрицы $\mathbf{Z}$, превышающие z_g, и соответствующие элементы матриц $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$ считаются избыточными и приравниваются нулю.

Таким образом, область решения определяется элементами матриц $\mathbf{Z}$, $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, отличными от нуля, а также точкой поверхности зеркала, совмещенной с началом системы координат O, определяемой отдельно. Информация, содержащаяся в матрицах $\mathbf{Z}$, $\mathbf{X}$ и $\mathbf{Y}$, достаточна для разбиения излучающей поверхности антенны на стержневые конечные элементы, образующие треугольники.

Оценку влияния деформирующих воздействий на расчетный профиль антенны проводим с помощью модели, являющейся кусочно-линейной аппроксимацией криволинейного профиля антенны в виде совокупности металлических стержней. В такой модели чем дальше ее узел от источника распространения колебания (в нашем случае – центра антенны), тем меньше амплитуда его колебания. При этом в каждом последующем узле амплитуда колебания в n раз меньше амплитуды колебания в предыдущем узле, где n – число стержней, соединяющихся в узле, воспринимающем колебания (рис. 1).

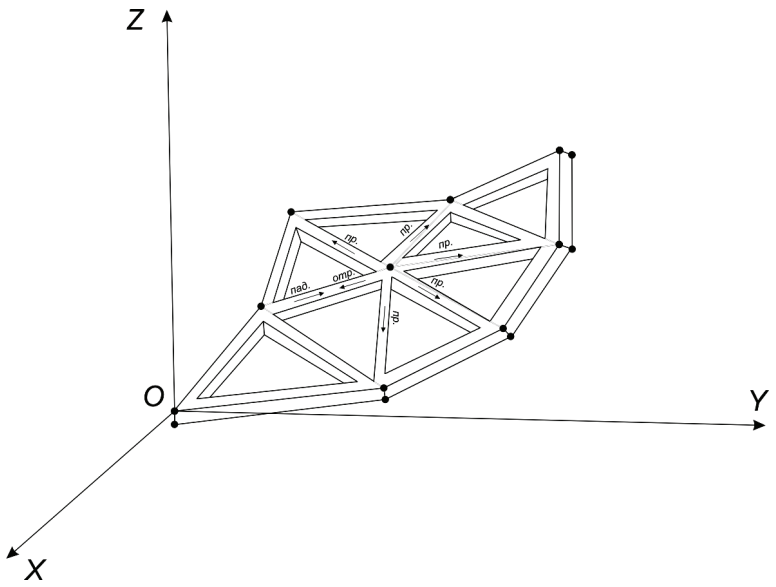


Рис. 1 Процесс распространения колебаний в стержнях антенны

Предположим, что в некотором узле «склеены» стержни из одного материала. К концу одного стержня подходит «падающая волна» с амплитудой $A_{\text{пад}}$, от границы отражается волна с амплитудой $A_{\text{отр}}$, а через границу склеивания проходит волна с амплитудой $A_{\text{пр}}$. Все три волны имеют одинаковую частоту, но разные амплитуды. В результат получаем

$$A_{\text{пад}} = A_{\text{отр}} + \sum_{n} A_{\text{пр}} , \qquad (7)$$

где n – число стержней, входящих в узел, за исключением стержня, в котором распространилась отраженная волна.

Для всех стержней, составляющих модель, характерно, что их длина во много раз превышает их поперечные размеры. Благодаря этому при расчетах вибраций стержней можно строить простые гипотезы о распределении деформаций и напряжений по сечению стержня. А такие гипотезы, в свою очередь, позволяют свести сложную трехмерную задачу о деформации стержней к одномерным задачам. Это позволяет, в частности, рассматривать независимо друг от друга продольные, крутильные и изгибные колебания стержня.

Ярким примером колебательных процессов, проходящих в стержнях каркасной модели, являются колебательные процессы, проходящие в одном (главном) сечении антенны.

Оценку влияния вибрационного воздействия на расчетный профиль антенны будем проводить с помощью модели, представляющей собой кусочно-линейную аппроксимацию криволинейного профиля антенны в виде совокупности металлических стержней [5].

В соответствии с этой моделью источник механических гармонических колебаний соединен с краем антенны, а ее центральная часть жестко закреплена. Будем учитывать только поперечные колебания.

Падающую механическую гармоническую волну, распространяющуюся от источника, с учетом того, что она движется против оси Ox, опишем следующим образом:

$$\xi_{\text{пад}} = A\cos(\omega_m t + k_m x + \alpha_1), \tag{8}$$

где A – амплитуда падающей волны; $\omega_m = 2\pi\nu$ – круговая частота; t – время; $k_m = 2\pi/\lambda_m$ – волновое число механической волны; ν – частота механических колебаний; α_1 – начальная фаза механического колебания к моменту времени $t = 0$; $\lambda_m = c_m/\nu$ – длина волны; $c_m = \sqrt{G/\rho}$ – скорость движения механической волны; G – модуль сдвига вещества твердого тела; ρ – плотность вещества.

В связи с тем, что антенна имеет параболический профиль, амплитуда колебания, проходящего через точку дискретизации, будет отличаться от амплитуды волны в предыдущей точке множителем $\cos q_i$ (рис. 2). Амплитуды колебаний каждого из элементов дискретизации определяются по формуле [4]

$$A_{i+1} = A_i \cos q_i, \tag{9}$$

где косинус угла q_i в текущей узловой точке i может быть определен по формуле

$$\cos q_i = \frac{x_i x_{i+1} + z_i x_{i+1}}{\sqrt{\left(x_i^2 + z_i^2\right)\left(x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2\right)}}, \tag{10}$$

x_i, x_{i+1}, z_i, z_{i+1} – координаты узловых точек дискретизации профиля антенны с номерами i и $i+1$ в декартовой системе координат.

Для отраженной механической волны будем иметь

$$\xi_{\text{отр}} = A\cos(\omega_m t - k_m x - \alpha_2). \tag{11}$$

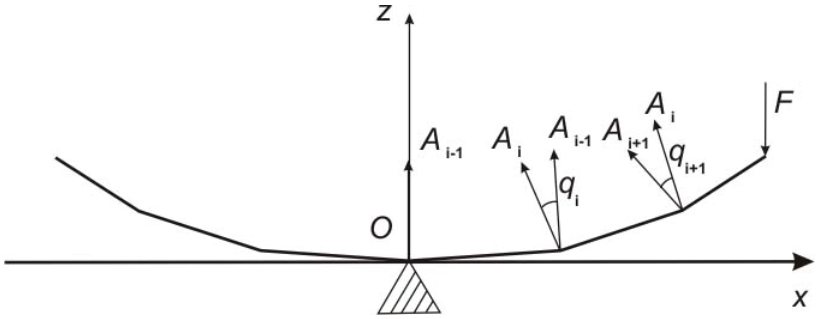


Рис. 2 Определение амплитуд колебаний элементов дискретизации криволинейной антенны

Результат наложения этих волн есть их обычная сумма. Поскольку отражение происходит от более плотной среды, то волны в эту среду не проникают, т.е. в точке $x = 0$ деформация не наблюдается, и полное смещение равно нулю:

$$\xi = 2A \sin k_m x \sin \omega_m t. \tag{12}$$

Затухание волны в поглощающей среде может быть оценено экспоненциальным законом [2, 5]:

$$A = A_0 \exp(-\gamma |x|), \tag{13}$$

где A – амплитуда механической волны в текущей точке с координатой x; A_0 – амплитуда механической волны на краю антенны в начальный момент времени $t = 0$; γ – коэффициент затухания механической волны [4, 6].

Электрическое поле $\mathbf{E}_\Sigma$, создаваемое системой таких излучателей в точке наблюдения P, является суперпозицией полей отдельных излучателей с учетом амплитуд и фаз возбуждающих их токов:

$$\mathbf{E}_\Sigma = \sum_{i=0}^{n} \mathbf{E}_{\theta i}, \tag{14}$$

где i – номер излучателя; $n = 2N$ – число излучателей; N – максимальный порядковый номер излучателя относительно оси z; $\mathbf{E}_{\theta i}$ – составляющая электрического поля, создаваемая дискретным излучателем с индексом i.

Представление антенны в виде системы линейных элементарных излучателей может быть проведено с помощью линейной дискретизации годографа векторной функции, описывающей профиль антенны [2, 7, 8]. Тогда с использованием построенной модели (2)…(15) можно провести исследование влияния деформаций профиля рассматриваемой антенны на ее ДН $F(\theta)$, представляемой как

$$F(\theta) = E_\Sigma(\theta) / E_{\max}, \tag{15}$$

где $E_{\max} = E_\Sigma(0)$ – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси излучения.

3 Решение тестовой задачи

В соответствии с математической моделью, построенной на основе локально-одномерной схемы, оценим влияние на ДН деформаций цилиндрической антенны с длиной раскрыва $L = 1$ м, синфазным и равноамплитудным возбуждением, работающей на длине волны, равной $\lambda = 3$ см, когда точка наблюдения P удалена на расстояние $R = 1000$ м. В качестве материала антенны используется алюминиевый сплав АМЦМ, плотность которого $\rho = 2730 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а модуль сдвига $G = 25,6$ ГПа. При расчете логарифмический декремент Λ, учитывающий демпфирующие свойства материала конструкции, принять равным 0,01.

Предположим, что деформация антенны произошла в результате воздействия на антенну механического гармонического колебания вида $\xi = A\cos\omega t$, амплитудой 3 мм и частотой 150 Гц. Для упрощения расчетов рассмотрим только поперечные колебания, пренебрегая продольными.

В соответствии с предложенной математической моделью расчеты были проведены в оболочке MatLAB. В результате расчетов было установлено, что модель антенны с заданными параметрами в отсутствие вибрационных воздействий имеет ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\theta_{0,5} = 3^0$ и уровнем боковых лепестков (УБЛ), равным –13,22 дБ (рис. 3, кривая 1).

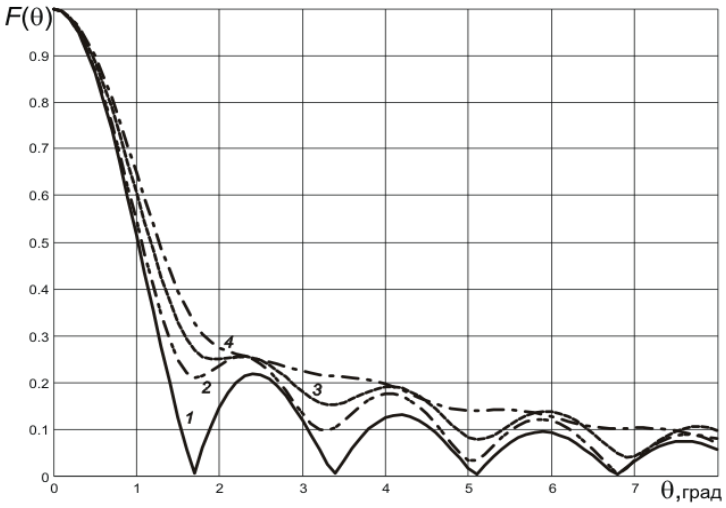


Рис. 3 Диаграммы направленности криволинейной антенны с исходным (1) и деформированными (2, 3, 4) профилями

При механическом гармоническом воздействии с начальной фазой, равной нулю, за один интервал времени Δt, равный периоду гармонического воздействия ($\Delta t = T$), возникающие деформации профиля антенны порождают следующие изменения ДН (рис. 3, кривая 2): ширина ДН незначительно увеличивается, но уже исчезают нулевые уровни в области боковых лепестков и значительно увеличивается УБЛ, составляя –11,36 дБ. При расчете ре-

зультатов деформации для каждого последующего временного интервала Δt воздействие поперечных механических колебаний оценивается для нового пространственного положения узлов профиля антенны, полученного в предыдущий момент.

4 Анализ результатов

Расчеты деформации профиля антенны для моментов времени t, соответствующих его дальнейшему дискретному приращению с интервалом Δt, дали следующие результаты. При времени, равном двум периодам $t = 2\Delta t$ (рис. 3, кривая 3) и $t = 3\Delta t$ (рис. 3, кривая 4), т.е. при дальнейшем увеличении t, наблюдается увеличение деформации профиля антенны и отклонения ДН от исходной формы. Так, например, уровень ДН в области бывших нулей (см. рис. 3, кривая 1) еще более возрастает и практически размывается боковой лепесток (см. рис. 3, кривые 3, 4). И хотя мы наблюдаем незначительное снижение УБЛ по отношению к УБЛ кривой 2, тенденция роста его все-таки сохраняется и для $t = 2\Delta t$ и $t = 3\Delta t$ составляет, соответственно, –11,88 и –11,85 дБ. Полученные результаты соответствуют тенденциям влияния вибрационных воздействий на характеристики микроволновых антенн [3].

Заключение

Таким образом, предложенный подход к оценке влияния вибрационных воздействий на конструкции антенн сложной пространственной конфигурации с использованием каркасной модели позволяет с приемлемыми вычислительными затратами оптимизировать конструкции микроволновых антенн и обеспечить их устойчивость к вибрационным воздействиям с требуемыми характеристиками излучения.

Список литературы

1. **Маквецов, Е. Н.** Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры : учебник для вузов / Е. Н. Маквецов, А. М. Тартаковский. – М. : Радио и связь, 1993. – 200 с.
2. **Якимов, А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий : монография / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 260 с.
3. **Абжирко, Н. Н.** Влияние вибраций на характеристики радиолокационных антенн / Н. Н. Абжирко. – М. : Сов. радио, 1974. – 168 с.
4. **Кабисов, К. С.** Колебания и волновые процессы: Теория. Задачи с решениями / К. С. Кабисов, Т. Ф. Камалов, В. А. Лурье. – М. : КомКнига, 2005. – 360 с.
5. **Сазонов, Д. М.** Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. – М. : Высшая школа, 1988. – 432 с.
6. **Якимов, А. Н.** Влияние деформаций на характеристики направленности линейной антенны / А. Н. Якимов, С. А. Яковлев // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – С. 318–320.
7. **Яковлев, С. А.** Моделирование влияния вибраций на характеристики направленности криволинейной антенны / С. А. Яковлев, А. Н. Якимов // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – С. 278–280.
8. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.

Якимов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

Yakimov Alexander Nikolaevich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
chair of designing and radio
equipment manufacture,
the Penza state university

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Яковлев Сергей Александрович
аспирант,
Пензенский государственный
университет

Yakovlev Sergey Aleksandrovich
the post-graduate student,
the Penza state university

E-mail: kipra@pnzgu.ru

УДК 621.396.677:519.711.3

Якимов, А. Н.

Построение каркасной модели криволинейной антенны / А. Н. Якимов, С. А. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 100–108.

УДК 621.396.677:519.711.3

О. Н. Балуков, А. Н. Якимов

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНТЕННЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДЕЛОНЕ

Аннотация. Рассмотрен процесс построения геометрической модели зеркальной параболической антенны, основанный на триангуляции Делоне, позволяющей приблизиться к равносторонности треугольных конечных элементов разбиения ее излучающей поверхности. Предложенная модель позволяет решить электродинамическую задачу излучения антенны.

Ключевые слова: антенна, модель, Делоне, излучение.

Abstract. Process of construction of geometrical model of the mirror parabolic antenna, based on a triangulation Delone, allowing to come nearer to equilateral triangular finite-elements of its radiating surface, is considered. The offered model allows to solve an electrodynamic task of radiation of an antenna.

Keywords: antenna, model, Delone, radiation.

Введение

Наиболее важная задача, решаемая при построении геометрической модели, заключается в задании области исследования таким образом, чтобы уравнения, описывающие данный процесс или явление, имели корректную формулировку.

При проектировании микроволновой параболической антенны методом конечных элементов одной из основных проблем является синтез ее геометрической модели с приемлемой степенью точности. При этом построенная геометрическая модель обычно является результатом компромисса между слишком большими вычислительными затратами при малом шаге дискретизации и погрешностью модели, вызывающей нарушение адекватности реальным физическим процессам при большом шаге.

1 Постановка задачи

Бурное развитие математической теории и вычислительной техники способствовало развитию численных методов, среди которых наибольшее распространение получили проекционно-сеточные методы. Их использование предполагает предварительное построение так называемой «сетки», т.е. некоего топологического множества точек, связанных между собой отрезками прямых, а в некоторых случаях и кривых линий, таким образом, что исходная область разбивается на элементы определенной формы.

Так как излучающая поверхность зеркальной антенны находится в дальней зоне электромагнитной волны, то на ограниченном участке этой поверхности ее можно считать плоской, и появляется возможность численного решения задачи излучения антенны путем деления (декомпозиции) ее поверхности на треугольные элементы первого порядка (плоские). По сравнению с прямоугольными элементами, они аппроксимируют излучающую поверхность более точно.

В целом построение геометрической модели можно описать следующим образом. Во-первых, определяется геометрия рассматриваемой поверх-

ности, которая задается различными способами: от аналитической формы записи до построения в среде специализируемых программных пакетов. Далее производится дискретизация поверхности и формирование необходимых данных для последующих вычислений. И наконец, строится геометрическая модель.

2 Построение модели

Рассмотрим параболоид вращения (рис. 1), описываемый формулой

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f}, \tag{1}$$

где x, y, z – пространственные координаты; f – фокусное расстояние.

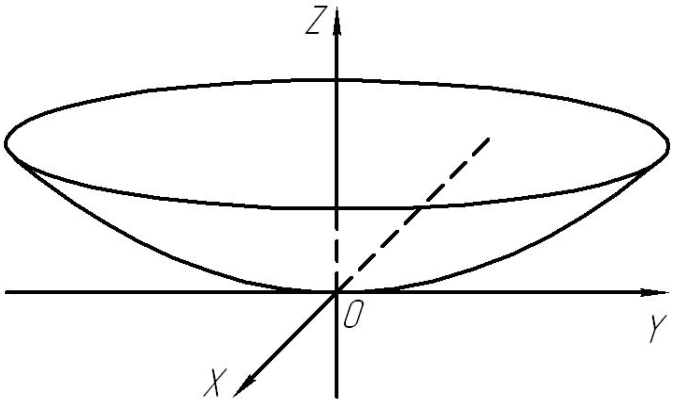


Рис. 1 Параболоид вращения

В основе дискретизации лежит принцип построения сетки из треугольных элементов, называемый триангуляцией. Все методы триангуляции по принципу построения можно разбить на две большие группы: прямые и итерационные методы [1, 2].

В прямых методах сетка строится за один этап, причем ее топология и координаты всех узлов известны изначально. Главными преимуществами прямых методов являются скорость работы и надежность. Сетка строится практически «мгновенно», при минимальной затрате ресурсов и с минимальным риском ошибки. Фактически, эффективно использовать прямые методы можно только для триангуляции самых простых областей – шара, параллелепипеда, цилиндра и т.п. Впрочем, нередко такие области являются частью некоторых сложных областей, и использование прямых методов в этом случае позволяет существенно экономить машинные ресурсы и время. Кроме того, прямые методы могут использоваться также для триангуляции и геометрически сложных областей, преимущественно описываемых гладкими функциями, что, однако, требует индивидуального подхода к каждой задаче.

Важной особенностью сеток, построенных с помощью прямых методов, является их структурированность. Структурированные сетки имеют четкую топологию и позволяют ввести особую индексацию вершин, что дает возможность легко определить всех соседей, а также вычислить координаты.

Сетки, построенные с помощью прямых методов, могут быть использованы и в итерационных методах. Таким образом, несмотря на все ограничения, прямые методы все равно находят свое применение в дискретизации пространственных областей.

В итерационных методах сетка строится последовательно; на каждом шаге добавляется один или несколько элементов, причем изначально неизвестны ни координаты узлов, ни топология сетки. Кроме того, координаты узлов и топология могут меняться прямо в процессе построения. Итерационные методы, напротив, универсальны и, как правило, применимы для областей достаточно произвольной формы. Именно поэтому итерационные методы в основном и используются в автоматических программных комплексах. Недостатком этого класса методов являются ресурсоемкость, существенно более медленная скорость работы (по сравнению с прямыми методами) и меньшая надежность. Итерационные методы из-за своей универсальности получили наибольшее развитие.

Существенным фактором, оказывающим значительное влияние на трудоемкость алгоритмов, а также на скорость конкретной реализации, является выбор структуры для представления триангуляции. Кроме того, выбор структуры может зависеть от цели дальнейшего использования дискретизации. В триангуляции можно выделить три основных вида объектов: узлы, ребра и треугольники [3].

В работе многих существующих алгоритмов построения триангуляции и алгоритмов ее анализа часто возникают следующие структуры для представления триангуляции [4, 5]:

1. Треугольник – узлы: получение для данного треугольника координат образующих его узлов.
2. Треугольник – ребра: получение для данного треугольника списка образующих его ребер.
3. Треугольник – треугольники: получение для данного треугольника списка соседних с ним треугольников.
4. Ребро – узлы: получение для данного ребра координат образующих его узлов.
5. Ребро – треугольники: получение для данного ребра списка соседних с ним треугольников.
6. Узел – ребра: получение для данного узла списка смежных ребер.
7. Узел – треугольники: получение для данного узла списка смежных треугольников.

Среди множества методов, позволяющих произвести триангуляцию, наиболее широкое распространение получили методы Делоне. Триангуляция Делоне не является оптимальной, но она строит набор треугольников, которые стремятся к равноугольности (или равносторонности), что очень важно при конечно-элементном анализе излучения антенны, и имеет некоторые важные свойства:

– обладает максимальной суммой минимальных углов всех своих треугольников среди всех возможных триангуляций на заданном наборе точек;

– обладает минимальной суммой радиусов окружностей, описанных около треугольников, среди всех возможных триангуляций на заданном наборе точек.

Ввиду особенностей использования данной геометрической модели в задачах электродинамики (излучения поверхности), указанных выше, наложим на нее ряд требований. Во-первых, необходимо получить треугольные элементы, близкие к равносторонним, для того, чтобы фазовый центр излучения и геометрический центр треугольника совпадали. Во-вторых, необходимо, чтобы стороны правильного треугольника не превышали размер, равный половине длины волны, что позволит ввести допущение, позволяющее рассматривать треугольник как элементарный излучатель.

Решать данную задачу будем следующим образом. На первом этапе определим координаты узловых точек. На втором этапе полученные точки объединим в группы. И на последнем этапе сформируем геометрическую модель рассматриваемой поверхности.

Параболоид является осесимметричной поверхностью, т.к. получается вращением параболы вокруг оси OZ (рис. 2). Тогда при сечении плоскостью XOZ получим параболу, т.е.

$$z = \frac{x^2}{4f}. \qquad (2)$$

Далее проведем аппроксимацию параболы линейно-одномерной функцией. В итоге получаем массив координат узловых точек X и Z. При этом для дальнейших расчетов используется матрица Z, которая определяет уровни секущих плоскостей, параллельных XOY. Матрица значений X определяет радиусы окружностей, образующихся при сечении параболоида плоскостями XOY с координатами, определяемыми матрицей Z (рис. 2).

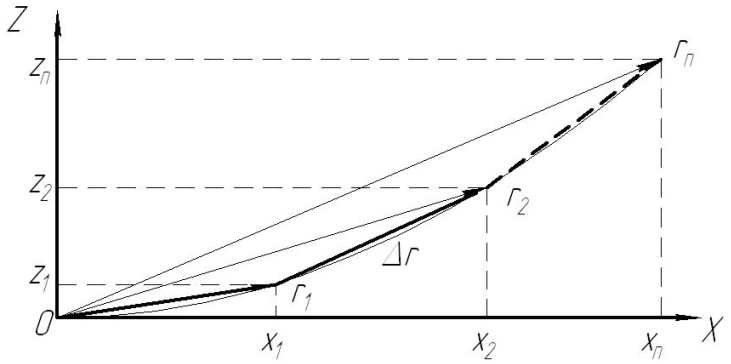


Рис. 2 Параболический профиль зеркала в главном сечении

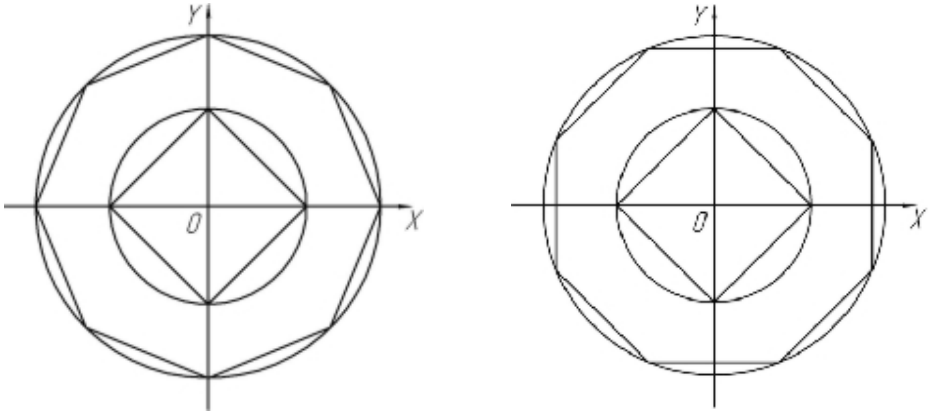
В сечении параболоида любой плоскостью, параллельной XOY, как было отмечено выше, получается окружность, радиус которой определяется следующим образом:

$$x = R = 2\sqrt{zf}. \qquad (3)$$

В полученную окружность вписываем правильный *n*-угольник (рис. 3). При этом необходимо выполнить некоторые условия. Во-первых, необходимо, чтобы длина стороны правильного *n*-угольника не превышала размер половины длины волны. Во-вторых, необходимо, чтобы число сторон правиль-

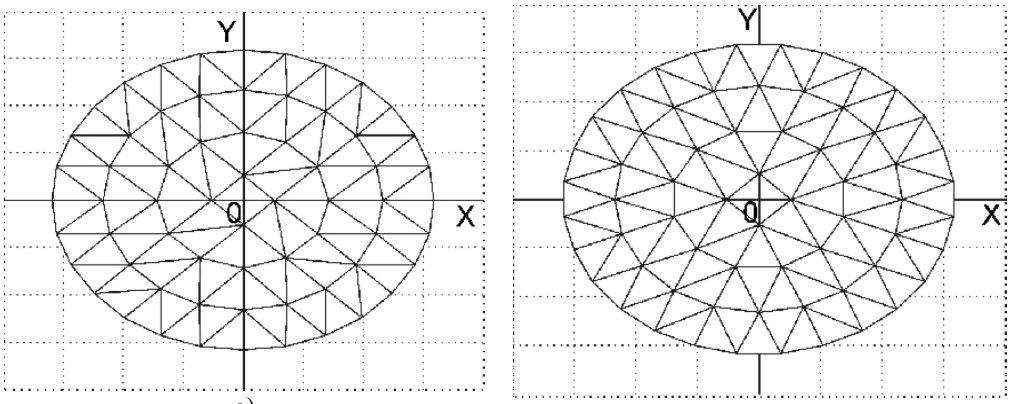
ного *n*-угольника было кратно четырем. Последнее условие необходимо для того, чтобы соблюсти условие симметричности и расчет вести только для четвертой части окружности. При этом возможны два варианта расположения вписанных многоугольников четного и нечетного порядков.

Выбор того или иного варианта определяется из задачи, которую нужно решить. На рис. 4 показаны результаты дискретизации при первом (рис. 4,а) и втором (рис. 4,б) случаях. Как видно, для получения более равномерной сетки имеет смысл использовать второй вариант взаимного расположения многоугольников.



а) б)

Рис. 3 Точки пересечения многоугольников четных порядков с осями координат:
а – вершины; б – середины сторон



а) б)

Рис. 4 Примеры дискретизации параболоида вращения
при различном взаимном расположении многоугольников

Рассмотрим сектор, лежащий в первом квадранте декартовой системы координат (рис. 5). Здесь приняты следующие обозначения: P_M^N – узловая точка, являющаяся вершиной правильного многоугольника, расположенного на N-й окружности; M – порядковый номер узловой точки; R^N – радиус N-й окружности; Θ^N – центральный угол N-го многоугольника.

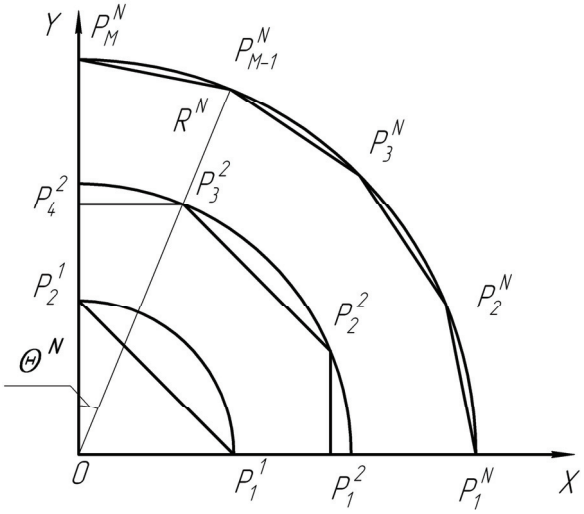


Рис. 5 Дискретизация сектора параболоида

Координаты M-х узловых точек N-го многоугольника для нечетных N определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} x_M^N = R^N \cos(M \cdot \Theta^N), \\ y_M^N = R^N \sin(M \cdot \Theta^N). \end{cases} \tag{4}$$

Для нечетных N координаты точек, лежащих на оси OX, определяются по формулам

$$\begin{cases} x_1^N = R^N \cos\left(\dfrac{\Theta^N}{2}\right), \\ y_1^N = 0, \end{cases} \tag{5}$$

а точки, лежащие на оси OY, как

$$\begin{cases} x_{M+2}^N = 0, \\ y_{M+2}^N = R^N \cos\left((N-1)\Theta^N + \dfrac{\Theta^N}{2}\right). \end{cases} \tag{6}$$

Координаты остальных точек получаются из следующих выражений:

$$\begin{cases} x_{M+1}^N = R^N \cos\left((M-1)\Theta^N + \dfrac{\Theta^N}{2}\right), \\ y_{M+1}^N = R^N \sin\left((M-1)\Theta^N + \dfrac{\Theta^N}{2}\right). \end{cases} \tag{7}$$

Здесь $M+1$, $M+2$ – порядковые номера дополнительных узловых точек, необходимых для построения геометрической модели параболоида.

Таким образом, получаем массив координат узловых точек, определяющих геометрию параболоида и составляющих основу сетки. Далее, используя алгоритмы, соединяющие треугольники в поверхности, производим сшивание поверхности. В большинстве математических программных пакетов имеются встроенные процедуры, позволяющие произвести трассировку узловых точек, используя различные алгоритмы сшивания и объединения. Например, в программной среде MatLab можно объединить узловые точки в общую поверхность с помощью встроенной процедуры триангуляции, вызываемой командой delaunay [7].

3 Анализ результатов

Используя выражения (2)…(7), можно производить соответствующие построения и вычисления. При этом следует обратить внимание на то, что при дискретизации параболы шаг разбиения в радиальном направлении будет определяться выражением

$$h = h_0 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right), \tag{8}$$

где h_0 – размер стороны равностороннего треугольника.

Учитывая, что h является высотой правильного треугольника, можно построить геометрическую модель фрагмента параболоида, конечными элементами которого являются равносторонние треугольники (рис. 6).

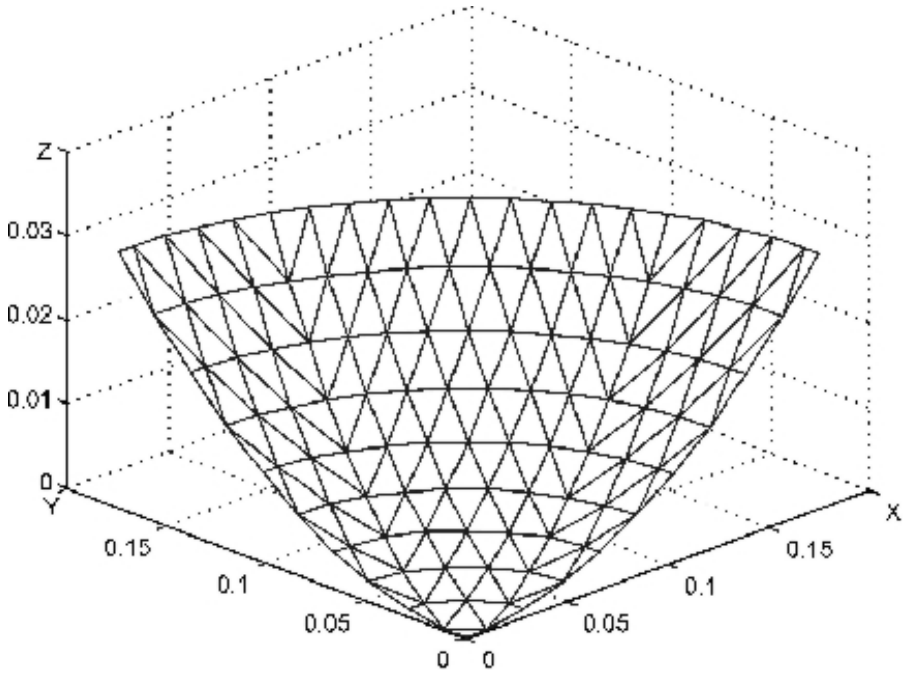


Рис. 6 Результат дискретизации сектора параболоида вращения

Используя свойство симметрии, получим полную поверхность параболоида вращения (рис. 7).

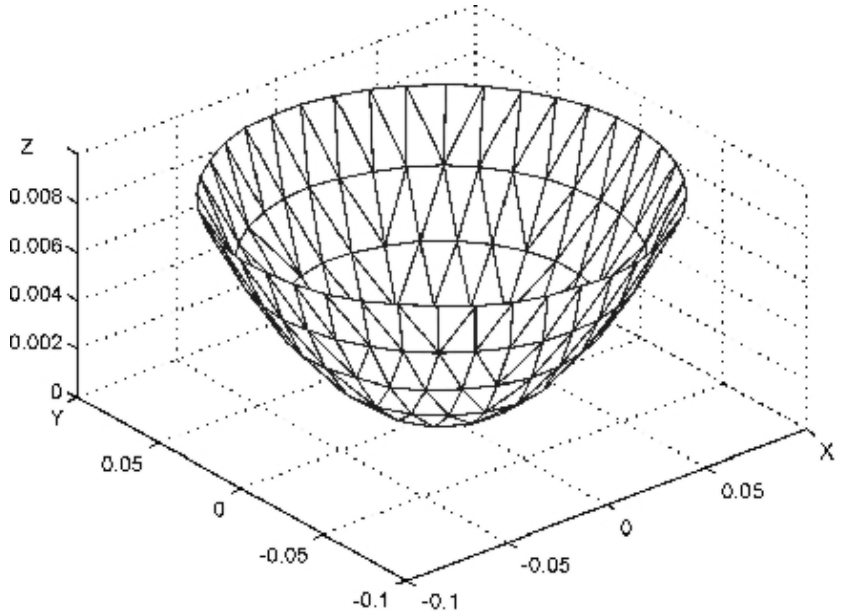


Рис. 7 Результат дискретизации параболоида вращения

Заключение

Таким образом, предложенный в данной работе алгоритм позволяет произвести дискретизацию параболической поверхности антенны, получить совокупности точек, образующих конечные элементы в виде равносторонних треугольников и, соответственно, координаты этих точек. Полученной информации оказывается достаточно для решения внешней задачи электродинамики, задачи излучения антенны. Кроме того, появляется возможность оптимизации конструкции антенны с учетом внешних воздействий.

Список литературы

1. **Галанин, М. П.** Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы / М. П. Галанин, И. А. Щеглов // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2006. – http://www.keldysh.ru/papers/ 2006/prep09/ prep2006_09.html.
2. **Галанин, М. П.** Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы / М. П. Галанин, И. А. Щеглов // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2006. – http://www.keldysh.ru/papers/ 2006/prep10/ prep2006_10.html
3. **Скворцов, А. В.** Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2002. – 128 с.
4. **Скворцов, А. В.** Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне / А. В. Скворцов // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – № 3. – С. 14–39.
5. **Дижевский, А. Ю.** Общий подход к реализации методов построения триангуляции неявно заданных поверхностей, использующих разбиение пространства на ячейки / А. Ю. Дижевский // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т. 8. – С. 286–296.
6. **Якимов, А. Н.** Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий : монография / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 260 с.

7. **Дьяконов, В. П.** MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова, В. В. Круглов ; под ред. В. П. Дьяконова. – М. : Нолидж, 2001. – 880 с.

Балуков Олег Николаевич
аспирант,
Пензенский государственный университет

Balukov Oleg Nikolaevich
the post-graduate student,
the Penza state university

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Якимов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет

Yakimov Alexander Nikolaevich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
chair of designing
and radio equipment manufacture,
the Penza state university

E-mail: kipra@pnzgu.ru

УДК 621.396.677:519.711.3

Балуков, О. Н.

Построение геометрической модели антенны с использованием триангуляции Делоне / О. Н. Балуков, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 109–117.

УДК 621.3.032.262.2

В. В. Алексеева, Д. А. Скаморин

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Аннотация. Представлены результаты исследования схем включения датчика температуры в цепях термокомпенсации прецизионных акселерометров. Исследованы также особенности трех способов подключения регулирующих резисторов в термокомпенсационную цепь: последовательно с датчиком, параллельно ему и в виде комбинации двух способов. Моделированием установлены оптимальные области применения каждого из способов включения регулирующего резистора, а также методика расчета значения номинала регулировочного резистора путем решения уравнения третьей степени.

Ключевые слова: акселерометр, метод компенсации, температурная погрешность, коэффициент преобразования, моделирование, температурный градиент индукции.

Abstract. Results of research of schemes of inclusion of the gauge of temperature in chains of thermoindemnification precision акселерометров are presented. Features of three ways of connection of regulating resistors in a thermocompensatory chain are investigated also: consistently with the gauge, in parallel it and in the form of a combination of two ways. Model establishes optimum scopes of each of ways of inclusion of the regulating resistor, and also a design procedure of value of face value of the adjusting resistor by the decision of the equation of the third degree.

Keywords: accelerometer, indemnification method, a temperature error, transformation factor, model, a temperature gradient of an induction.

Введение

Известными способами термокомпенсации коэффициента преобразования прецизионных акселерометров является использование в них датчика температуры, выходной сигнал которого служит исходной информацией для построения соответствующих схем. Эти схемы могут быть как составной частью конструкции акселерометра, так и находиться за его пределами [1].

Отсутствие отечественных микроэлектронных датчиков температуры приводит к необходимости использования в термокомпенсирующих цепях датчика из медного провода, достоинствами которого являются простота технологий изготовления и высокая стабильность характеристик. Выбор катушки из медного провода в качестве датчика температуры обусловлен его высокой линейностью и стабильностью.

1 Метод компенсации температурной погрешности

Температурная нестабильность коэффициента преобразования акселерометра определяется, главным образом, температурной нестабильностью индукции в зазоре магнитной системы обратного преобразователя [2]. В соответствии с техническими условиями на примененные в акселерометре постоянные кобальт-самариевые магниты температурный коэффициент индукции составляет в интервале от +20 до +60 °С –0,01 %/°С, а в интервале от –60 до +20 °С его значение не нормируется, достигая фактических значений –0,03 %/°С.

Для компенсации указанных температурных уходов применяется термокомпенсирующая цепь, показанная на фрагменте схемы измерительного канала акселерометра, представленном на рис. 1. Здесь $L1$ представляет собой катушку из медного провода из двух встречно включенных полуобмоток с числом витков 1900 и электрическим сопротивлением не менее 800 Ом.

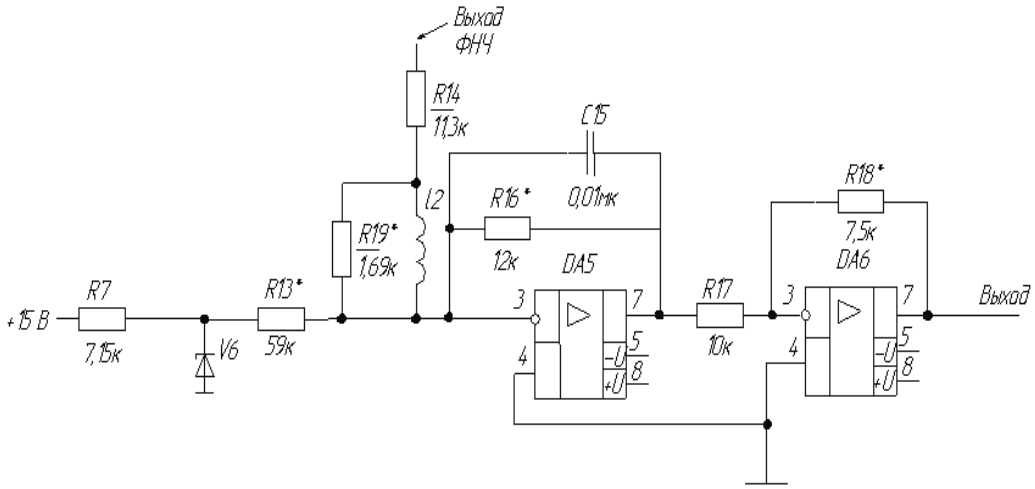


Рис. 1 Фрагмент схемы измерительного канала акселерометра

В ней в качестве измерительной цепи термодатчика используется выходной нормирующий усилитель акселерометра, обеспечивающий одновременное регулирование смещения нуля (микросхема DA5 и резисторы R14*, R16). Функция преобразования термокомпенсирующей цепи в соответствии с этой схемой описывается уравнением

$$K_{\Sigma t} = -\frac{2\Delta r}{R14^* + r_0} \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta r}{R14^* + r_0}\right)^2}, \qquad (1)$$

где r_0, α_t – заранее определенные параметры функции преобразования датчика температуры, $\Delta r = r_0(1 \pm \alpha_t \cdot \Delta T)$; K_t – требуемое значение коэффициента преобразования усилителя DA5, определяемое из условия $K_t = -(K_{\text{ФНЧ}t} + K_{\text{ПНЧ}t})$, где $K_{\text{ФНЧ}t}$, $K_{\text{ПНЧ}t}$ – коэффициенты влияния изменений температуры окружающей среды на характеристики аналоговой части акселерометра до входа в термокомпенсирующую цепь и преобразователя «напряжение–частота», соответственно; Δr, r_0 – изменение сопротивления медной катушки в заданном интервале температур и начальное значение сопротивления, определенное при температуре 20 °С (определяется по результатам косвенных измерений в составе акселерометра).

Согласно формуле (1), составляющая $\frac{\Delta r}{R14^* + r_0}$ будет определять точность расчета резистора $R14^*$. При соотношении $r_0 \approx 900$ Ом, $R14^* \geq 10$ кОм, $\Delta r \approx 200$ Ом значение составляющей не будет превышать 0,04 %. Пренебрегая

значимостью этой величины, определим значение сопротивления регулировочного резистора в зависимости от требуемой величины $K_{\Sigma t}$ по формуле

$$R14^* = \frac{2\Delta r}{K_{\Sigma t}} - r_0 \quad .$$

Абсолютная величина $K_{\Sigma t}$ устанавливается равной коэффициенту влияния изменений температуры окружающей среды на коэффициент преобразования акселерометра без термокомпенсации. Для изменения знака $K_{\Sigma t}$ датчик температуры необходимо включать последовательно с резистором $R16$, а его величину определять по формуле

$$R16 = \frac{2\Delta r - K_t \cdot r_0}{K_{\Sigma t}} - r_0 \quad .$$

Температурный коэффициент сопротивления меди [3] ≈ 0,43 %/°С.

Для вычисления сопротивления резистора $R14$ необходима информация о значениях коэффициентов $K_{\text{ФНЧ}t}$, $K_{\text{ПНЧ}t}$ и коэффициента усиления цепи, представленной на рис. 1. Для этого предлагается следующая процедура: при значениях температуры окружающей среды –50, +20 и +50 °С определяются выходные сигналы ФНЧ, усилителя $DA6$ и акселерометра в целом при изменении измеряемого ускорения в интервале $\pm 1g$.

Преимуществами такого способа включения являются простота расчета номинала регулировочного резистора и теоретическая возможность компенсации широкого диапазона температурных погрешностей. Однако область применения этого способа ограничена такими значениями погрешности, когда для ее компенсации требуется установка резистора $R14^*$ большого номинала. В этом случае температурное изменение сопротивления регулировочного резистора становится сравнимым с температурными изменениями сопротивления катушки, что при проработке модели не учитывается. Таким образом, уравновешивание способом последовательного включения регулировочного резистора не позволяет качественно скомпенсировать малые значения температурных погрешностей акселерометра.

Проведенные температурные испытания показали, что временная стабильность коэффициента преобразования акселерометров с предложенной цепью термокомпенсации составляет величину не более 0,1 %, что позволяет сделать вывод о достаточной эффективности примененного метода компенсации температурной погрешности акселерометра.

При параллельном включении регулировочного резистора номиналы используемых резисторов ограничиваются значениями в 4–5 кОм, вследствие чего температурное изменение сопротивления регулировочного резистора пренебрежимо мало по сравнению с изменением сопротивления катушки.

Функция преобразования термокомпенсирующей цепи в соответствии с этой схемой описывается уравнением

$$K_{\Sigma t} = \frac{R14 + \dfrac{r_0 \cdot R19^*}{r_0 + R19^*}}{\dfrac{1}{R14 \cdot K_1 + \dfrac{r_3 \cdot K_1 \cdot R19^*}{r_3 + K_1 \cdot R19^*}} - \dfrac{1}{R14 \cdot K_2 + \dfrac{r_1 \cdot K_2 \cdot R19^*}{r_1 + K_2 \cdot R19^*}}}, \qquad (2)$$

где $R19^*$ – сопротивление регулировочного резистора; r_0 – сопротивление катушки; $r_1 = r_0 \cdot 0,734$ – сопротивление катушки при –50 °С; $r_3 = r_0 \cdot 1,114$ – сопротивление катушки при +50 °С; $K_1 = 1,0045$ – значение собственного изменения сопротивления резистора типа *С*2-36 в условиях изменения температуры окружающей среды при +50 °С; $K_2 = 0,9895$ – значение собственного изменения сопротивления резистора типа *С*2-36 в условиях изменения температуры окружающей среды при –50 °С.

Для температурной отладки акселерометра при таком способе включения регулировочного резистора требуются только массив значений периода выходного сигнала при –50, +20 и +50 °С, значение сопротивления катушки и предыдущее значение сопротивления регулировочного резистора. Область применения этого способа ограничивается сверху, поскольку значениям температурной погрешности, превышающим 2,5 %, соответствует значение сопротивления $R19^*$ более 10 кОм, при котором температурное изменение сопротивления регулировочного резистора становится сравнимым с изменением сопротивления катушки.

Значение номинала регулировочного резистора может быть получено путем решения уравнения (2) относительно переменной $R19^*$. Поскольку выражение для номинала регулировочного резистора представляет собой уравнение третьей степени, решение которого представляет значительную сложность, поиск решений этого уравнения необходимо осуществлять с применением специализированных программных средств.

Решение данного уравнения в символьном виде было реализовано в разработанном программном комплексе на языке программирования Maple 7.

На основании вышеизложенного наиболее оптимальным вариантом термокомпенсации представляется включение регулировочных резисторов и последовательно, и параллельно медной катушке. Этот способ позволяет наиболее качественно скомпенсировать температурную погрешность в широком диапазоне. В то же время при таком способе термокомпенсации не возникает необходимости наращивания количества номиналов резисторов в подборочных рядах. Собственное температурное изменение сопротивления регулировочных резисторов пренебрежимо мало по сравнению с изменением сопротивления катушки, что позволяет не учитывать этот фактор при моделировании.

Моделирование, проведенное при помощи разработанного программного комплекса, позволило установить оптимальные области применения каждого из способов включения регулирующего резистора. При этом также установлено, что границы оптимальных областей определяются приемлемым соотношением температурных изменений сопротивления регулирующего резистора и сопротивления обмотки датчика температуры. Определено также, что систематическая температурная погрешность, основным источником которой является нестабильность индукции в зазоре магнитной системы обратного преобразователя (величиной до 0,002 % °С), с наименьшей трудоемкостью компенсируется при параллельном включении регулирующего резистора и обмотки датчика температуры. При систематических погрешностях, превышающих указанную величину, к наилучшему результату приводят последовательное и последовательно-параллельное включение регулирующих резисторов. Средствами программы Maple при известных значениях электриче-

ских сопротивлений регулирующего резистора и катушки датчика температуры, измеренных перед началом испытаний, по результатам определительных температурных испытаний акселерометра вычисляется значение сопротивления регулирующего резистора, обеспечивающее минимизацию температурной погрешности.

2 Моделирование температурного градиента индукции

Для расчета неоднородных, нестационарных температурных полей датчиков предлагается использовать приближенный численный метод, представляющий собой модифицированный вариант метода «элементарных» балансов.

Выбор этого метода обусловлен сложностью поставленных и решаемых нестационарных температурных задач, разнообразием и взаимосвязанностью физических явлений и процессов, имеющих место в рассматриваемых классах датчиков, другими их особенностями.

Для составления тепловых балансов используются основные законы теплообмена:

– закон сохранения энергии:

$$\int_F Q_n dF = \frac{\partial E}{\partial t} = \int_\Omega c \frac{\partial T}{\partial t} d\Omega \ ; \tag{3}$$

– закон Фурье:

$$Q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \ ; \tag{4}$$

– закон Ньютона:

$$Q = \alpha (T - T_c) \, ; \tag{5}$$

– закон Стефана–Больцмана:

$$E = \varepsilon \sigma_0 T^4 \ , \tag{6}$$

где Q_n – составляющая теплового потока, нормальная к элементу поверхности dF; F – поверхность, ограничивающая некоторый объем Ω; E – внутренняя энергия среды, заключенной в объеме, ограниченном поверхностью F; c – теплоемкость объема; Q – удельный тепловой поток; T – температура объема; T_c – температура окружающей объем среды; α – коэффициент теплоотдачи единицы поверхности тела; E – плотность интегрального излучения; ε – степень черноты поверхности; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана.

Использование основных законов и гипотез теплообмена приводит к непосредственному получению расчетных алгоритмов, минуя стадию составления дифференциальных уравнений.

Сущность метода расчета заключается в следующем.

Датчик (прибор, система, устройство) разбивается на ряд конечных «элементарных» геометрических форм (объемов). Это могут быть параллелепипеды, цилиндрические, шаровые сегменты и другие канонические формы, определяемые конструктивными особенностями различных типов датчиков.

Основной алгоритм расчета температурного поля, полученный на основе метода тепловых балансов и принятых допущений для рассматриваемого типа датчиков, состоящих из твердотельных элементарных объемов, имеет следующий вид:

$$T_i(t+\Delta t)=\left[1-\frac{\Delta t}{c_i}\left(\sum_{j=1}^{M} q_{ij}+q_{i\text{c}}\right)\right]T_i+\frac{\Delta t}{c_i}\left(\sum_{j=1}^{M} q_{ij}T_j+q_{i\text{c}}T_{\text{c}}+Q_i\right), \qquad (7)$$

где $T_i(t)$, $T_i(t+\Delta t)$ – температуры i-го объема, соответственно, в настоящий и последующий моменты времени; c_i – теплоемкость; q_{ij} – термопроводимости между объемами i, j; $q_{i\text{c}}$ – термопроводимость между i-м объемом и окружающей или измеряемой средой; Q_i – мощность источников или стоков тепла; Δt – шаг расчета; M – количество объемов, имеющих тепловой контакт с i-м объемом; N – количество объемов; $i = 1, ..., N$.

Величина суммарной тепловой проводимости, характеризующаяся входящими в выражение (7) коэффициентами термопроводимости q_{ij}, может быть представлена в виде

$$q_{ij}=q_{\text{Т}}+q_{\text{К}}+q_{\text{И}}=\alpha_{\text{Т}}f_{\text{Т}}+\alpha_{\text{К}}f_{\text{К}}+\alpha_{\text{И}}f_{\text{И}}, \qquad (8)$$

где $q_{\text{Т}}, q_{\text{К}}, q_{\text{И}}$ – коэффициенты термопроводимости, учитывающие теплообмен в соответствии с теплопроводностью, конвекцией и излучением; $\alpha_{\text{Т}}, \alpha_{\text{К}}, \alpha_{\text{И}}$ – функции геометрических и теплофизических параметров элементарных объемов; $f_{\text{Т}}, f_{\text{К}}, f_{\text{И}}$ – функции температур.

Заключение

Таким образом, предложенный способ расчета позволяет учитывать основные виды теплообмена, имеющие место в рассматриваемых классах датчиков. Формулы и соотношения, по которым рассчитываются эти коэффициенты, для основных случаев теплообмена в приборах и некоторых специальных случаев получены на основе законов тепломассообмена Фурье, Ньютона, Стефана–Больцмана, критериальных уравнений Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа, Прандля, теории подобия аэродинамических, электрических и тепловых процессов и экспериментальных исследований. К полученным разностным и другим соотношениям (7), (8) и формулам необходимо добавить начальные условия, и задача сведется к определению функций $T_i(t)$ по всем элементарным объемам в каждый момент времени.

Список литературы

1. **Мокров, Е. А.** Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров. – Пенза : ПАИИ, 2044. – 164 с.
2. **Джашитов, В. Э.** Динамика температурно-возмущенных гироскопических приборов и систем / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов. – Саратов : Изд-во Саратовск. ун-та, 1998. – 236 с.
3. Таблицы физических величин : справочник / под ред. академика И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1006 с.

Алексеева Вера Владимировна
аспирант,
Пензенский государственный университет

Alekseeva Vera Vladimirovna
the post-graduate student,
the Penza state university

E-mail: alekseeva_vv@yandex.ru

Скаморин Денис Анатольевич
аспирант,
Пензенский государственный университет

Skamorin Denis Anatolevich
the post-graduate student,
the Penza state university

E-mail: skamorec@yandex.ru

УДК 621.3.032.262.2

Алексеева, В. В.

Метод компенсации температурной погрешности коэффициента преобразования прецизионных акселерометров / В. В. Алексеева, Д. А. Скаморин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 118–124.

УДК 621.316.722.4

А. П. Воронов, В. Г. Недорезов, Н. К. Юрков

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АМПЛИТУДНЫХ И АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНОГО ЕМКОСТНОГО ДЕЛИТЕЛЯ ВЫСОКИХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Аннотация. Предложены математические модели амплитудных и амплитудно-частотных характеристик вакуумного емкостного делителя высоких высокочастотных напряжений. Теоретически обосновывается правомочность применения разрабатываемого алгоритма к измерениям динамических характеристик ДН высоких высокочастотных напряжений.

Ключевые слова: математическая модель, амплитудно-частотные характеристики, вакуумный делитель высокочастотных напряжений.

Abstract. Under discussion vathematical models of peak and peak-frequency characteristics of a vacuum capacitor divider of high high-frequency pressure. Competency of application algorithm to measurements of dynamic characteristics of high high-frequency pressure is theoretically proved.

Keywords: mathematical model, peak-frequency characteristics, a vacuum divider of high-frequency pressure.

Введение

Повышение точности масштабных широкополосных (до 100 МГц) измерительных преобразователей высоких (более 1 кВ) напряжений (далее – делители напряжений) связано с необходимостью получения достоверной и точной информации о режимах работы высоковольтных блоков мощных радиотехнических устройств, с исследованием работы высоковольтных высокочастотных электронных компонентов и контролем технологических режимов их изготовления в процессе производства [1]. Однако зависимость функции преобразования делителя напряжений (ДН) от частоты и амплитуды входного сигнала, которая может приводить к деформации формы преобразуемого сигнала, препятствует достижению требуемого уровня (1 %) погрешности функции преобразования. Кроме того, сложность организации аттестации и поверки ДН в указанном частотном диапазоне обусловлена отсутствием эталонных средств измерений высоких высокочастотных напряжений, созданием в процессе проведения измерений мощных электромагнитных полей, влияющих на окружающую среду. Поэтому динамические характеристики таких средств измерений проверяются обычно при низких напряжениях [2, 3], уровень которых не превышает 20–30 % от уровня номинального напряжения. Например, измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вакуумных емкостных делителей напряжений типа ДНЕ1-2, ДНЕ1-3 производится при уровнях напряжений 30...100 В, а линейность амплитудной характеристики (АХ) измеряется в пределах от 1 до 30 кВ в одной точке (0,1–5 МГц) рабочего диапазона частот. Полученные результаты распространяются на весь рабочий диапазон частот. В то же время отсутствие математических моделей, допускающих правомерность проведения такой операции, вызывает сомнения в достоверности выдаваемых заключений о соответствии метрологических ха-

рактеристик поверяемого делителя требованиям нормативно-технической документации и осложняет выявление источников погрешности с целью уменьшения их вклада в погрешность функции преобразования. В данной статье теоретически обосновывается возможность применения вышеуказанного алгоритма к измерениям динамических характеристик ДН высоких высокочастотных напряжений.

1 Конструкция вакуумного делителя

Конструктивно вакуумный емкостной делитель напряжений (ВЕДН) выполнен в виде двух последовательно соединенных конденсаторов. Системы емкостных электродов конденсаторов расположены внутри цилиндрической газонепроницаемой оболочки, фиксирующей их расположение в пространстве. Давление остаточных газов внутри оболочки $10^{-3}\ldots10^{-5}$ Па. Конфигурация и шероховатость поверхности электродов, а также применение высококачественных вспомогательных электроизоляционных материалов (например, стекла молибденовой группы) для вакуум-плотной оболочки создают необходимые условия исключения коронного разряда и сведения к минимуму токов утечек (порядка единиц, в худшем случае – десятка микроамперов). На одном конце ВЕДН расположен противокоронный электрод с высоковольтной клеммой (вход), а на другом – гнездо для подключения измерительного прибора (выход). Соотношение емкостей конденсаторов подобрано таким образом, что амплитуда прошедшего через делитель сигнала уменьшается в заданное число раз.

Формирование АЧХ ВЕДН связано с элементами конструкции и взаимным расположением элементов в конструкции через индуктивность (собственная, взаимная), емкость (собственная, взаимная) и активное сопротивление элементов. В результате имеет место зависимость коэффициента передачи $K(x_{01}, \omega)$ ВЕДН от частоты ω при постоянном уровне входного сигнала x_{01}. Эта зависимость изображается на графике кривой линией, заметно отклоняющейся от прямой линии параллельной оси частот в крайних точках $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$ частотного диапазона рис. 1,а [4].

Верхний уровень рабочих напряжений ВЕДН ограничен по оси напряжений номинальным напряжением, связанным с пробивным напряжением коэффициентом запаса, и напряжениями, соответствующими предельным значениям токов, которые на указанных выше частотах можно пропускать через делитель. Поэтому на линейность АХ в диапазоне $(x_{\min}, x_{\max})$ изменения входной величины x_0 оказывают влияние такие физические явления, как токи электрических разрядов (коронный разряд, частичный разряд и т.д.), нагрев элементов конструкции электрическим током. Причем чем выше требования к линейности АХ, тем больше их влияние. Кроме того, при определенных сочетаниях амплитуды напряжения и частоты возможно поглощение энергии измеряемого сигнала, проявляющееся в виде провалов или выбросов АХ. Типовая зависимость относительного отклонения коэффициента деления от напряжения для делителей, используемых совместно со спектральным киловольтметром СКВ-100, приведена на рис. 1,б [5].

Таким образом, на изменение функции преобразования ВЕДН влияет два фактора – частота и амплитуда напряжения.

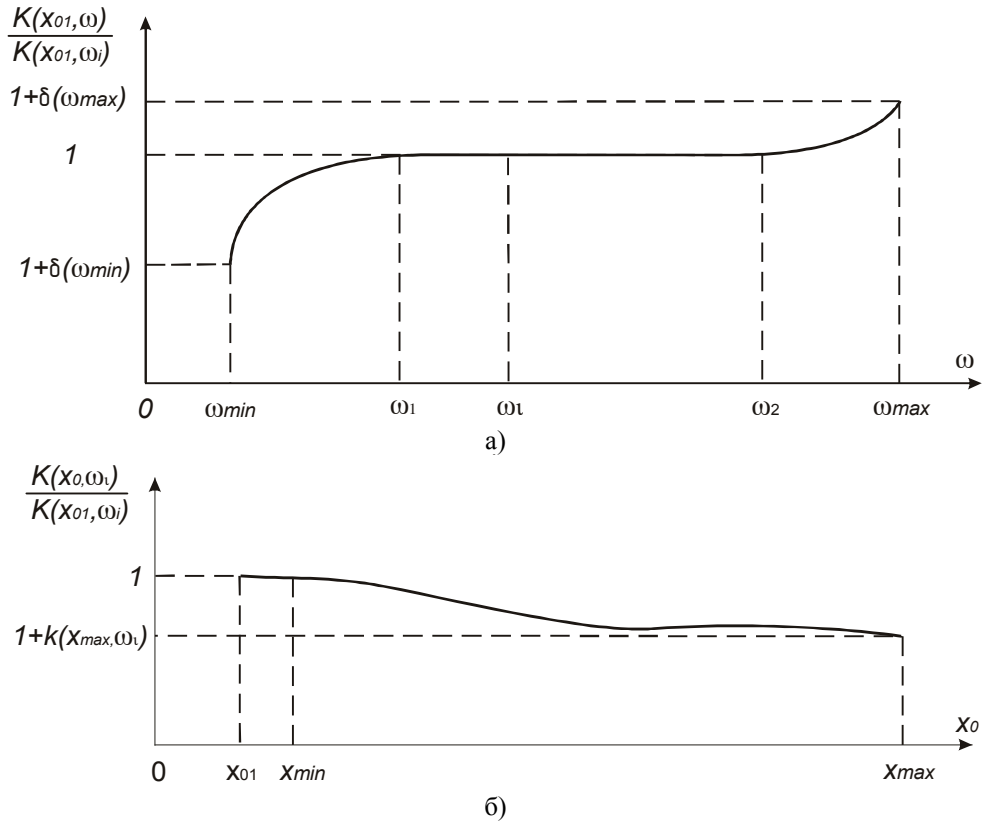


Рис. 1 Динамическая характеристика высоковольтного делителя напряжений:
а – нормализованная амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи;
б – нормализованная амплитудная характеристика коэффициента передачи

Уравнение преобразования входного сигнала для ВЕДН записывается в данном случае в виде

$$y = K_0[1 + \gamma(x)]x\,, \qquad (1)$$

где $x = f(x_0, \omega)$ – сигнал на входе ВЕДН, форма которого определяется амплитудой x_0 и циклической частотой ω сигнала; $\gamma(x)$ – относительное отклонение коэффициента передачи ВЕДН от своего номинального значения K_0.

2 Моделирование амплитудно-частотных характеристик

Учитывая, что ВЕДН в первую очередь создавались для контроля режимов испытаний вакуумных высоковольтных устройств, осуществляемого на конкретных частотах, для построения простой и удобной математической модели относительного отклонения функции преобразования от своего номинального значения введем предварительные условия:

– при низких уровнях входных сигналов $(x_0 \to x_{01} \approx 0)$ в ВЕДН влияние физических процессов, вызывающих появление нелинейности АХ функции преобразования, пренебрежимо мало. Поэтому функция $\gamma(x_0, \omega)$ после подстановки $(x_0 = x_{01} = \text{const})$ принимает вид $\gamma(x_{01}, \omega) = \delta(\omega)$;

– в диапазоне изменения входной величины для частоты $(\omega = \omega_i)$ коэффициент передачи зависит только от амплитуды входного сигнала, т.е. $\gamma(x_0, \omega_i) = k_i(x_0)$;

– на частоте ω_i, лежащей в области частот (ω_1, ω_2) рабочего диапазона частот $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$, для которых выполняются условия $(\omega_{\min} \prec \omega_1 \prec \omega_i \prec \prec \omega_2 \prec \omega_{\max})$ и $\delta(\omega_i) \prec \delta_D$, где δ_D – заданное предельно допустимое относительное отклонение АЧХ в области частот (ω_1, ω_2), коэффициент передачи не зависит от частоты и равен номинальному значению $K_0 = K(x_{01},\ \omega_i)$;

– относительные изменения коэффициента передачи от частоты $\delta(\omega)$ и амплитуды $k(x)$ входного сигнала значительно меньше единицы $(k(x),\ \delta(\omega) \prec 1)$.

На рис. 2 изображена структурная схема, поясняющая работу ВЕДН в установившемся синусоидальном режиме, коэффициент передачи для которой можно записать в виде

$$K(x) = K_0[1 + k(x_0,\ \omega)][1 + \delta(\omega)]. \tag{2}$$

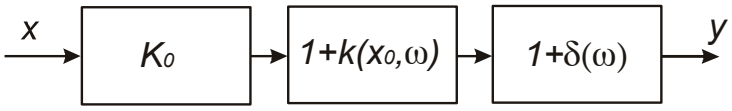


Рис. 2 Структурная схема преобразования входного сигнала ВЕДН

Относительное отклонение коэффициента передачи после преобразования уравнения (2) можно переписать в виде

$$\gamma(x) = k(x_0, \omega) + \delta(\omega) + k(x_0, \omega)\delta(\omega). \tag{3}$$

Применив к данному уравнению требования к пренебрежимо малым погрешностям

$$\frac{k(x_0, \omega) \cdot \delta(\omega)}{k(x_0, \omega) + \delta(\omega)} \le 0{,}1, \tag{4}$$

получим выражение

$$\gamma(x) = k(x_0, \omega) + \delta(\omega). \tag{5}$$

Неравенство выполняется, когда один из сомножителей числителя (например, $k(x_0, \omega)$) меньше 0,1 и меньше 0,1 части второго сомножителя $k(x_0, \omega) \le 0{,}1\delta(\omega)$. Выполнение неравенства (2) позволяет по результатам измерений $\gamma(x_0, \omega)$ проводить независимые исследования $k(x_0, \omega)$, $\delta(\omega)$, и наоборот. Например, произведя измерения АЧХ при амплитуде входного сигнала $(x_0 = x_{01} = \text{const})$, находим значение коэффициента передачи $K_0[1 + \delta(\omega_i)]$ для конкретной частоты ω_i, причем неравенство (2) в данном случае выполняется $k(x_0, \omega) \le 0{,}1\delta(\omega)$. На этой же частоте производим измерение коэффициента передачи $K(x_0,\ \omega_i)$ в различных точках диапазона из-

менения x_0. Найдем нормализованные значения коэффициента передачи, используя формулу $K(x_0,\ \omega_i)/\{K_0[1+\delta(\omega_i)]\}=1+k_i(x_0)$, обеспечив тем самым выполнение неравенства (2). Действительно, использование деления позволяет привести соотношение между сомножителями неравенства к виду $\delta(\omega)=0,\ \delta(\omega)\le 0{,}1k(x_0,\omega)$.

3 Амплитудно-частотная характеристика для низких уровней напряжений

Так как длина электрической измерительной цепи, образуемой внутри ВЕДН типа ДНЕ1-2, ДНЕ1-3, не превышает одной четвертой метра (что соответствует частоте $f_\Gamma \approx 3$ ГГц), то эти делители можно рассматривать как устройства с сосредоточенными параметрами. Для линейных электрических цепей $(k(x)\approx 0)$ с сосредоточенными параметрами коэффициент передачи четырехполюсника записывается в виде [6]

$$K(p)=K(0)\cdot\prod_{i=1}^{i=n}\frac{(1+p\tau_{i,1})}{(1+p\tau_{i,2})}\frac{1+2\alpha_{i,2}\cdot p\tau_{i,4}+p^2\tau_{i,4}^2}{1+2\alpha_{i,1}\cdot p\tau_{i,3}+p^2\tau_{i,3}^2}, \tag{6}$$

где i – номер каскада; $\tau_{i,1},\tau_{i,2},\tau_{i,3},\tau_{i,4}$ – постоянные коэффициенты, имеющие размерность времени; $\alpha_{i,1},\alpha_{i,2}$ – постоянные коэффициенты; $K(0)$ – коэффициент передачи для переменной $p\to 0$.

Математическое выражение (6) можно представить в виде

$$K(p)=K_0\cdot\prod_{i=1}^{i=n}\frac{(1+1/p\tau_{i,1})}{(1+1/p\tau_{i,2})}\frac{1+2\alpha_{i,2}\cdot p\tau_{i,4}+p^2\tau_{i,4}^2}{1+2\alpha_{i,1}\cdot p\tau_{i,3}+p^2\tau_{i,3}^2}, \tag{7}$$

где $K_0=K(0)\cdot\prod_{i=1}^{i=n}\frac{\tau_{i,1}}{\tau_{i,2}}$ – номинальный коэффициент передачи.

Модуль функции преобразования $|K(p)|$ соответствует коэффициенту передачи $K(\omega)$, который получается из уравнения (7) после ряда преобразований и имеет вид

$$K(\omega)\approx K_0\left[1+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{2}\left(1/\omega\tau_{i,1}\right)^2-\frac{1}{2}\left(1/\omega\tau_{i,2}\right)^2+\omega^2(\tau_{i,3}^2-\tau_{i,4}^2)+\right.\right.$$
$$\left.\left.+2\omega^2\left(\left(\alpha_{i,2}\tau_{i,4}\right)^2-\left(\alpha_{i,1}\tau_{i,3}\right)^2\right)\right)\right], \tag{8}$$

$$\delta(\omega)\approx\sum_{i=1}^{i=n}\left(\frac{1}{2}\left(1/\omega\tau_{i,1}\right)^2-\frac{1}{2}\left(1/\omega\tau_{i,2}\right)^2+\omega^2(\tau_{i,3}^2-\tau_{i,4}^2)+\right.$$
$$\left.+2\omega^2\left(\left(\alpha_{i,2}\tau_{i,4}\right)^2-\left(\alpha_{i,1}\cdot\tau_{i,3}\right)^2\right)\right). \tag{9}$$

Назовем условия независимости коэффициента передачи от частоты $\delta(\omega)=0$, получаемые из формулы (6):

1) равенство постоянных времени плеч делителя: $\tau_{i,1} = \tau_{i,2}$, $\tau_{i,3} = \tau_{i,4}$, $\alpha_{i,1} = \alpha_{i,2}$;

2) минимальная резонансная частота $f_{\text{р}}$ делителя должна быть больше верхней рабочей частоты: $f_{\max} << f_{\text{р}} = \min\left\{\frac{1}{\tau_{i,1}}, \frac{1}{\tau_{i,2}}, \frac{1}{\tau_{i,3}}, \frac{1}{\tau_{i,4}}\right\}$.

Как показывают результаты исследований различных авторов, высоковольтные высокочастотные делители напряжений могут быть смоделированы с хорошим приближением при помощи эквивалентных схем. Объемные физические процессы заменяют элементами электрических схем, для расчета которых существует мощный математический аппарат, позволяющий рассчитать указанные выше постоянные времени.

4 Амплитудная характеристика

Пусть $\gamma(x,\omega)$ – действительная функция, имеющая в интервале $x_{01} \le x \prec x_{02}$ n-производных. Тогда ее можно представить в виде ряда Тейлора:

$$\gamma(x - x_{01},\omega) = \gamma(x_{01},\omega) + (x - x_{01})\gamma'(x_{01},\omega) + \frac{(x - x_{01})^2}{2!}\gamma''(x_{01},\omega) + \ldots$$

или

$$\gamma(x - x_{01},\omega) = \gamma(x_{01},\omega) + (x - x_{01})\sum_{n=2}^{\infty}\frac{(x - x_{01})^{(n-2)}}{(n-1)!}\gamma^{(n-1)}(x_{01},\omega) \ . \qquad (10)$$

В результате сравнения уравнений (10) и (11) можно прийти к выводу, что

$$\delta(\omega) = \gamma(x_{01},\omega)$$

и

$$k(x,\omega) = (x - x_{01})\sum_{n=2}^{\infty}\frac{(x - x_{01})^{(n-2)}}{(n-1)!}\gamma^{(n-1)}(x_{01},\omega) \ . \qquad (11)$$

Правую часть уравнения (11) удобнее представить в виде степенного ряда:

$$k(x,\omega) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \ldots . \qquad (12)$$

При исследовании делителей [5], которыми комплектуется спектральный киловольтметр типа СКВ-100, зависимость относительного отклонения коэффициента $k(x,\omega)$ передачи ДН от напряжения представляет собой кривую, аппроксимирующую результаты математической обработки данных измерений и описываемую полиномами третьей или четвертой степени. Достоверность аппроксимации степенной функцией равна единице. Уравнение аппроксимирующей кривой соответствует уравнению (12), причем $\alpha_0, \ldots, \alpha_4$ –

постоянные коэффициенты, полученные в результате математической обработки экспериментальных данных.

В то же время это уравнение можно представить как сумму степенных функций, связывающих через физические процессы (характеризуемые внутренними факторами) отклонение функции преобразования с внешними факторами:

$$k(x,\omega)=\sum_{i=1}^{i=N}(\alpha_{0,i}+\alpha_{1,i}x+\alpha_{2,i}x^2+\alpha_{3,i}x^3+\alpha_{4,i}x^4)\ , \qquad (13)$$

где N – число математических выражений, представленных степенными функциями; i – текущий номер.

Например, слагаемые первого и второго порядков уравнения (13) совпадают со слагаемыми формулы коэффициента нагрузки $k_{\text{НГ}}$:

$$k_{\text{НГ}}=k'_{\text{Н}}U+\Delta T\cdot\text{ТКС}\approx\alpha_1x+\alpha_2x^2,$$

где $k'_{\text{Н}}$ – коэффициент, характеризующий зависимость сопротивления от напряжения; ΔT – температура перегрева при рассеиваемой мощности $P\sim U^2$; ТКС – температурный коэффициент сопротивления; $x=U$ – амплитуда напряжения на входе ДН.

Следует отметить, что представленные выражения описывают влияние одного фактора (амплитуды входного сигнала). В данном случае имеет место двухфакторный эксперимент, для которого выражение записывается в виде [6]

$$Y=B_0+B_1x_0+B_2\omega_i+B_{12}x_0\omega_i+B_{11}x_0^2+B_{22}\omega_i^2+$$
$$+B_{112}x_0^2\omega_i+B_{122}x_0\omega_i^2+B_{111}x_0^3+B_{222}\omega_i^3. \qquad (14)$$

Сравнение постоянных коэффициентов уравнений (13) и (14) позволяет получить систему уравнений:

$$\begin{cases} a_0=B_0+B_2\omega_i+B_{22}\omega_i^2+B_{222}\omega_i^3; \\ a_1=B_1+B_{12}\omega_i+B_{122}\omega_i^2; \\ a_2=B_{11}+B_{112}\omega_i; \\ a_3=B_{111}. \end{cases} \qquad (15)$$

Следует отметить, что для решения системы уравнений, т.е. нахождения постоянных коэффициентов $B_0, B_1, ..., B_{222}$, необходимо обработать результаты измерений АХ в нескольких точках ω_i частотного диапазона.

Как показывают результаты исследований делителей напряжений, которыми комплектуются измерительные приборы типа СКВ-100, представление отклонений АХ от линейности степенными рядами позволяет выявлять и исследовать источники погрешности функции преобразования. В то же время нахождение постоянных коэффициентов модели двухфакторного эксперимента позволяет оценивать отклонения функции преобразования во всех точках рабочих диапазонов частот и напряжений ВЕДН.

Заключение

В результате проведенных теоретических исследований получены условия, выполнение которых позволяет проводить независимые исследования амплитудной и амплитудно-частотной характеристик ВЕДН.

Получены математические выражения, позволяющие выявлять и анализировать процессы, протекающие в ВЕДН при приложении напряжения и влияющие на линейность АХ в рабочем диапазоне частот.

Показана необходимость исследования функции преобразования ВЕДН с помощью двухфакторной модели.

Список литературы

1. **Воронов, А. П.** Вакуумные емкостные делители напряжения для ИИС и АСУ ТП / А. П. Воронов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 97–104.
2. **Журавлев, Э. Н.** Современные методы и средства аттестации установок для измерения импульсных и постоянных сверхвысоких напряжений: Обзорная информация / Э. Н. Журавлев, В. Н. Ярославский. – М., 1988. – 80 с. – (Образцовые и высокоточные средства измерений; Вып. 4/ВНИИКИ).
3. **Ашнер, А. М.** Получение и измерение импульсных высоких напряжений / А. М. Ашнер ; пер. с нем. – М. : Энергия, 1979. – 120 с.
4. **Смирнов, Э. Н.** Анализ передаточной функции двухкаскадного вакуумного емкостного делителя напряжений / Э. Н. Смирнов, А. П. Воронов // Электронная техника. – 1981. – Вып. 3. – С. 8–12. – (Сер. 5 «Радиодетали и радиокомпоненты»).
5. **Воронов, А. П.** Исследования коэффициента передачи делителя высокого напряжения в диапазоне изменения входной величины / А. П. Воронов, Д. А. Январев // Материалы, изделия и технологии пассивной электроники : материалы Международной научно-технической конференции / под ред. В. Г. Недорезова. – Пенза : НИИЭМП, 2007. – С. 210–219.
6. **Зажигаев, Л. С.** Методы планирования и обработки результатов эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М. : Атомиздат, 1978. – С. 232.

Воронов Александр Павлович
инженер,
Научно-исследовательский институт
электромеханических приборов
(г. Пенза)

Voronov Alexander Pavlovich
the engineer,
Scientific research institute
of electro-mechanical devices (Penza)

Недорезов Валерий Григорьевич
доктор технических наук, доцент,
генеральный директор
Научно-исследовательского института
электромеханических приборов
(г. Пенза)

Nedorezov Valery Grigorevich
a Dr.Sci.Tech., the senior lecturer,
the general director
of Scientific research institute
of electro-mechanical devices (Penza)

E-mail: niiemp@penza.com.ru

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

Yurkov Nikolay Kondratevich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
managing chair of designing
and manufacture of radio equipment,
the Penza state university

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

УДК 621.316.722.4
Воронов, А. П.
Математические модели амплитудных и амплитудно-частотных характеристик вакуумного емкостного делителя высоких высокочастотных напряжений / А. П. Воронов, В. Г. Недорезов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 125–133.

УДК 656.1:681.51

Т. В. Клевцова

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Дан анализ существующих навигационных систем, в частности их структурных компонентов, параметров, степени наблюдаемости и работоспособности. В качестве методов обнаружения сбоя в различных автоматических системах предложены варианты применения контактных и бесконтактных датчиков сбоя, что явилось результатом анализа на совместимость упомянутых датчиков с компонентами навигационной системы. Проведен синтез, основывающийся на стыковке предложенного лага и предложенных контактных и бесконтактных датчиков сбоя, в результате чего была определена возможность повышения надежности и поиска скрытых дефектов в навигационных системах.

Ключевые слова: навигационная система, методы обнаружения сбоев, автоматические системы, контактные и бесконтактные датчики, системный анализ.

Abstract. The analysis of existing navigating systems, in particular their structural components, parametres is given, to observability and working capacity degree. It is considered, as object of the control and increase of its reliability, such structural component of navigating system, as a log - a measuring instrument of speed. As methods of detection of failure in various automatic systems such variants as application of contact and contactless gauges of failure that grew out of the analysis on compatibility of the mentioned gauges with components of navigating system are offered. The synthesis which is based on joining of the offered log and offered contact and contactless gauges of failure therefore possibility of increase of reliability and search of latent defects in navigating systems has been defined is spent.

Keywords: navigating system, methods of detection of failures, automatic systems, contact and contactless gauges, the system analysis.

Введение

В состав современных навигационных систем (НС), в том числе и автономных (например, подводные объекты, воздушный, водный и наземный транспорт), входит ряд подсистем (рис. 1), среди которых инерциальные навигационные системы, измерители скорости (лаги), приемники сигналов спутниковых НС (СНС), гирокомпасы, а также ЭВМ, осуществляющие комплексную обработку информации.

Подобные НС обычно называют интегрированными НС или навигационными комплексами [1].

Учитывая, что перечисленная аппаратура работает в условиях помех (как искусственных, так и естественных), влияющих как на показания датчиков информации, так и на промежуточные тракты, в которых участвуют и преобразователи информации, и устройства цифровой обработки, и каналы связи, нужно полагать, что важной характеристикой эффективности НС становится ее надежность.

1 Постановка задачи

Существующие (как отечественные, так и зарубежные) методы повышения надежности связаны, как правило, с аппаратурной и информационной

избыточностью. Учитывая, что аппаратура работает в области повышенных частот (до гигагерц), не исключается рассмотрение и других методов повышения надежности НС: пересмотр и ужесточение требований по электромагнитной совместимости (экранировка аппаратуры, переход на помехозащищенные связи с использованием оптического стекловолокна).

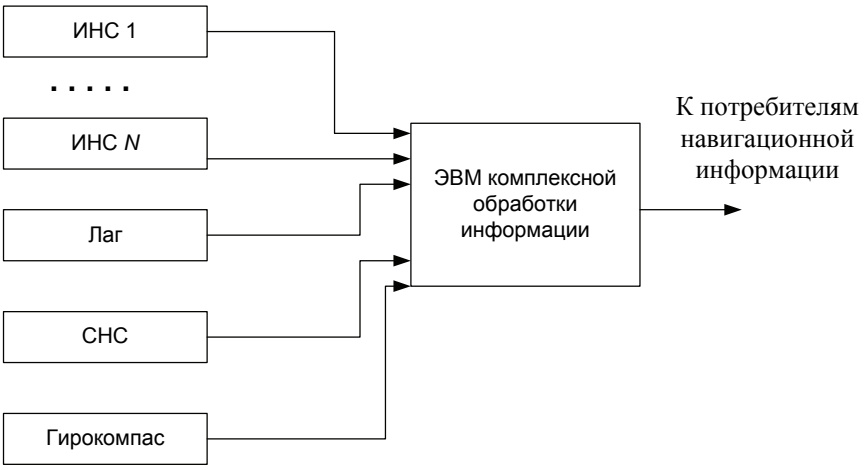


Рис. 1 Структура интегрированной НС

В совокупности все это – пассивные методы, т.к. они зачастую не позволяют выявить, установить, а тем более устранить источник (источники) помех, оставляя тем самым потенциальную возможность появления новых отказов аппаратуры.

Из классификации, приведенной на рис. 2, следует, что одни методы регистрации источников сбоев целесообразно использовать в системах и устройствах с аналоговой обработкой сигналов (например, амплитудно-частотные методы регистрации источников сбоев), другие – в цифровой аппаратуре (например, временные методы регистрации источников сбоев) [2].

Рис. 2 Классификация методов обнаружения и регистрации источников сбоя

Цель данной статьи заключается в предложении повысить надежность рассматриваемой аппаратуры. Принципиальная особенность данной концепции повышения надежности аппаратуры за счет исключения воздействия на нее сбоев состоит в том, что, в отличие от ранее используемых подходов, обнаруживаются и регистрируются не места сбоев, а источники сбоев. То есть предлагаются активные методы резкого повышения надежности аппаратуры навигационных систем.

Отметим, что сбои в аппаратуре, в частности в ЭВМ, приводят к нарушению условий по выполнению требований по электромагнитной совместимости из-за большого уровня излучения сбойного элемента. При этом в качестве источника сбоев могут выступить такие элементы, как соединители, различные линии связи (интерфейсные, шины питания, заземления), контактирующие устройства больших и сверхбольших интегральных схем, контактные дорожки печатных плат, включая многослойные, клейменные колодки, места паек, металлизированные отверстия и т.д.

2 Методы активного обнаружения

Методы активного обнаружения и регистрации сбоев включают в себя как бесконтактные, так и контактные методы, достаточно подробно проработанные. Они имеют значительный (до 10–15 лет) отечественный приоритет и широко известны [3].

В данном случае представляют интерес два метода: метод, основанный на приеме и регистрации электромагнитного излучения, и дифференциальный метод. Таким образом, задачей данной работы будет являться синтез, заключающийся в стыковке выбранной компоненты НС – лага (рис. 1) и предложенных контактных и бесконтактных датчиков сбоя. Лаг, или измеритель скорости, имеет следующие функциональные узлы (рис. 3).

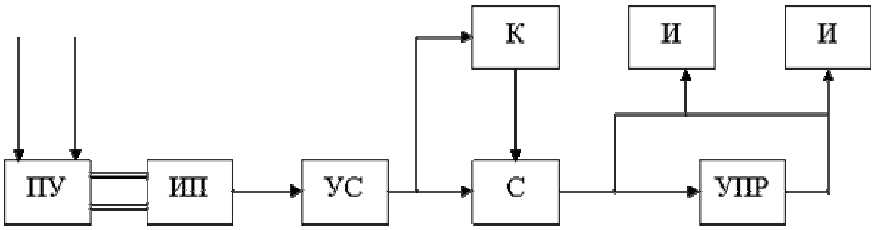


Рис. 3 Структурная схема гидродинамического лага: П – приемное устройство; ИП – измерительный преобразователь; УС – узел скорости; К – корректор; С – сумматор; УПР – узел пройденного расстояния; И – индикатор

Действие гидродинамического лага основывается на измерении скоростного напора встречного потока. В качестве приемного устройства лага, воспринимающего гидродинамическое давление, служит приемная трубка, опускаемая на днище судна или штевневое устройство. При движении судна уровень в трубке поднимается на некоторую высоту, которая связана с давлением следующей зависимостью:

$$H = v^2 / 2g + P / \gamma , \qquad (1)$$

где v – скорость потока жидкости, см/с; g – ускорение силы тяжести, см/с^2; P – статическое давление воды, г/см^2; γ – удельный вес жидкости, г/см^3.

Возникающее при движении судна суммарное давление в приемном устройстве не может быть использовано непосредственно для определения скорости из-за наличия статической составляющей, т.к. это привело бы к зависимости отсчета скорости от осадки судна. Для исключения влияния осадки на показания лага в конструкции прибора предусмотрена компенсация статического давления с помощью сильфонного аппарата. Сильфонный аппарат представляет собой камеру, разделенную диафрагмой на две полости – нижнюю и верхнюю. При движении судна в обоих полостях сильфонного аппарата создается одинаковое давление. Результирующее давление, испытываемое диафрагмой, будет равно динамической составляющей суммарного давления воды, пропорциональной скоростному напору. К диафрагме прикреплен шток, связанный через рычаг со стрелкой указателя скорости. Динамическое давление, зависящее от скорости судна, приподнимая диафрагму и шток, заставляет отклоняться стрелку указателя [4].

2 Структура гидродинамического лага

Преобразуем структурную схему гидродинамического лага, включив в нее бесконтактный датчик сбоя (БДС) после сумматора, обрабатывающего цифровые сигналы (рис. 4). При помощи выбранного датчика реализуется первый метод, основанный на приеме и регистрации излучаемого сбойного сигнала.

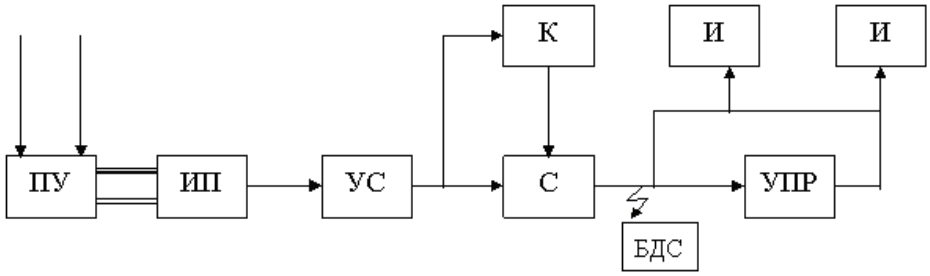


Рис. 4 Преобразованная структурная схема гидродинамического лага

Особенность метода – его работа как на непрерывных (аналоговых), так и на дискретных (импульсных или цифровых) сигналах. Введение в состав аппаратуры БДС, имеющих рабочий диапазон частот до 3,5–3,7 ГГц, позволяет обнаружить и своевременно зарегистрировать сбои в вышеперечисленных узлах и элементах аппаратуры.

Тогда структура приведенной интегрированной навигационной системы будет выглядеть как на рис. 5, где УОИС – устройства обнаружения источников сбоев.

Для отдельных видов контроля (в рабочем режиме, автоматизированный контроль) целесообразно использовать дифференциальный метод регистрации сбоев, основанный на дифференцировании проходящего через участок сбоя сигнала. Метод реализован с помощью дифференцирующей цепи, встроенной в проверяемую аппаратуру.

Продемонстрируем это на примере структурной схемы лага (рис. 6).

Логический элемент И–НЕ в сущности представляет собой дифференцирующую компоненту и является в своем роде контактным датчиком сбоя. Представим эту электрическую цепь схематично (рис. 7).

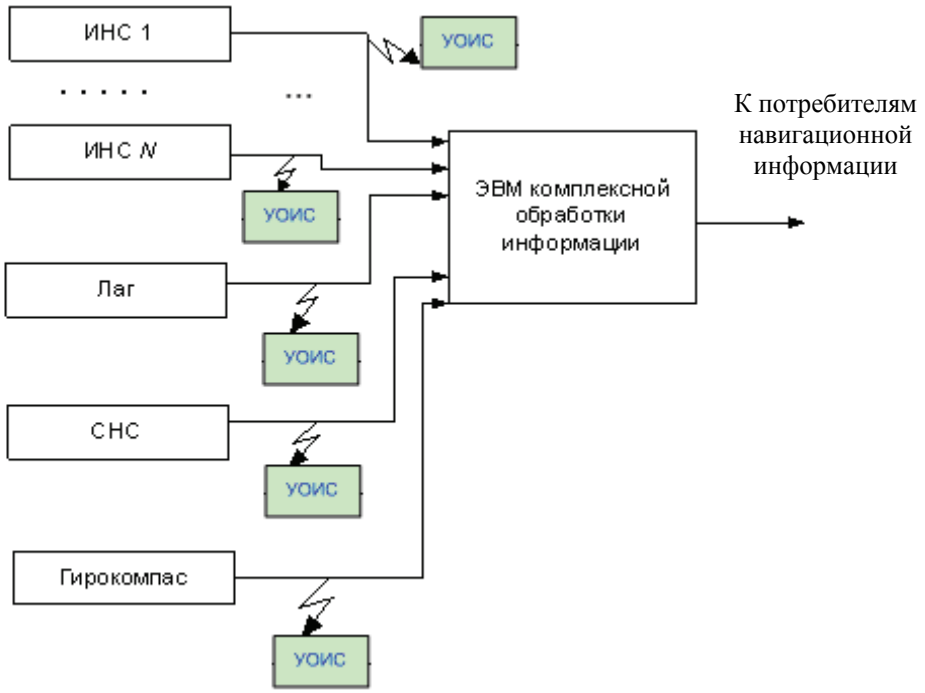


Рис. 5 Структура интегрированной НС

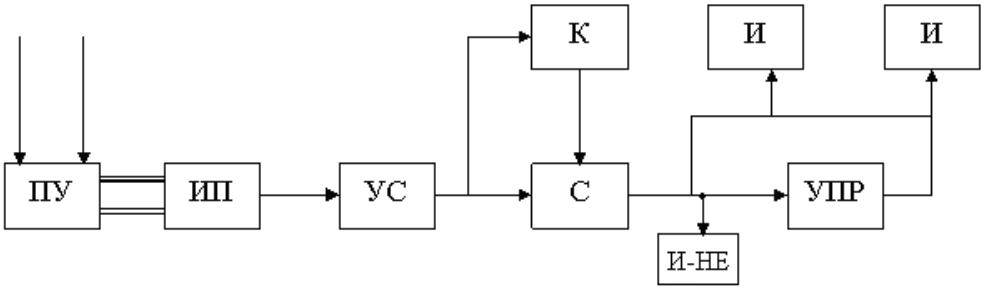


Рис. 6 Преобразованная структурная схема гидродинамического лага

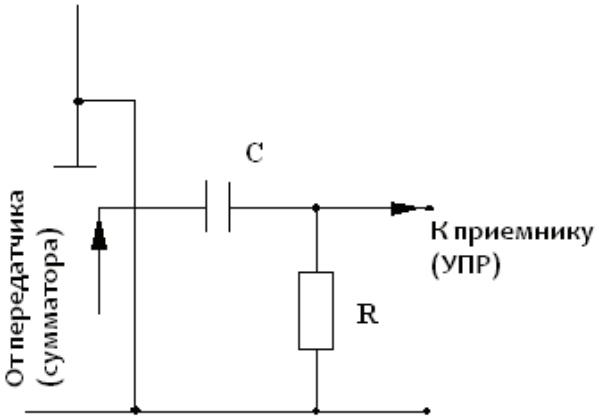


Рис. 7 Дифференцирующая цепь

В отличие от известных методов, регистрирующих только два отказных состояния аппаратуры (обрыв и короткое замыкание), в данном случае регистрируется и третье промежуточное состояние, характеризуемое как сбойное (рис. 8). Информационным признаком, позволяющим регистрировать такое состояние, является повышенное значение напряжения сбойного сигнала, превышающее номинальное напряжение питания интегральной микросхемы (например, 5 В) за счет появления емкостной составляющей в распределенных элементах (линиях связи), и фиксируемое, например, приемником сигналов с повышенным (до десятков мегаом) сопротивлением (например, микросхемы КМОП-структуры) [5].

Рис. 8 Сбойное состояние электрических проводников

Основными причинами, по которым могут отсутствовать импульсы на выходе лага, как правило, являются:

– отсутствие питания на лаге;

– плохой электрический контакт монтажных проводов, соединяющих импульсный выход лага со вторичным прибором учета;

– отложение осадка на поверхности электродов;

– сбой или отказ электронного блока.

Если вышеперечисленные причины носят характер отказа, то для их выявления не требуется сложной измерительной аппаратуры. Отсутствие питания можно проверить по контрольной лампочке на блоке питания лага. Отказ электронного блока сопровождается миганием светодиода на электронной плате лага. В случае обнаружения данных неисправностей предпринимаются меры согласно технической документации на лаг.

Обнаружение сбоев, их регистрация непосредственно во время эксплуатации лага является более трудной, но не менее необходимой задачей.

Основными трудностями являются:

– невозможность подсоединения такой внешней диагностической аппаратуры, как вольтметры, частотомеры и др., в процессе работы лага, т.к. все эти процедуры необходимо выполнять при отключенном питании лага;

– невозможность наблюдать кратковременный сбой и, следовательно, регистрировать его без помощи дополнительной аппаратуры;

– непостоянность сбоев, которая заключается в том, что сами сбои могут появляться в произвольные моменты времени;

– возможность использования только импульсного выхода лага для обнаружения и регистрации сбоев непосредственно в процессе его работы [5].

Участие человека в процессе диагностики сведено к запуску системы диагностирования и анализу результатов ее работы.

Сигналы с датчиков сбоев могут быть использованы для дальнейшей обработки в блоке ЭВМ комплексной обработки информации (рис. 5).

Задача, решаемая в данных методах, – расширение функциональных возможностей по обнаружению скрытых дефектов в виде сбоев элементов и

узлов за счет введения датчиков сбоев и использования новых информативных признаков сбоев с соответствующей обработкой информации (сигналов).

Поставленная задача решается тем, что:

– электромагнитные излучения от источников сбоев обнаруживают бесконтактно в диапазоне частот от единиц герц до единиц гигагерц;

– дополнительный сдвиг фронтов импульсных сигналов, проходящих через источники сбоя, осуществляется и обнаруживается во всем диапазоне частот работающей аппаратуры с изменением сдвига фронта от единиц наносекунд и выше;

– контактно источник сбоя определяется по эффекту образования микротрещин в линиях связи и малой емкостной составляющей (доли и единицы пикофарад) в них, последующим большим сопротивлением (до 10^7 Ом и выше) приемника сигналов на КМОП-структуре и образующегося эффекта дифференцирования сигнала;

– бесконтактно источник сбоя определяется по эффекту образования микрорезонансных контуров и электромагнитного излучения в них при прохождении электрического сигнала;

– при обнаружении одновременно нескольких источников сбоев учитывают направление прохождения сигнала и образуемую при этом его временную задержку [5];

– устройство обнаружения источников сбоев в лаге содержит контактные и бесконтактные датчики сбоев, выполненные с возможностью работы в диапазоне частот от долей герца до единиц гигагерц и установленные на линиях связи или в непосредственной близости (до 1–2 см) от элемента или узла электрической цепи;

– контактные датчики сбоев реализованы на КМОП-инверторах;

– бесконтактные датчики сбоев реализованы на пассивных (*L*-, *C*-элементы) микрорезонансных колебательных контурах;

– при срабатывании двух и более контактных датчиков сбоев в качестве источника сбоя определяется элемент или узел с более ранним по времени срабатыванием датчика.

Анализ проведенных аппаратных и программных исследований сбоев (в частности, моделирование) показал правильность и эффективность предложенных методов.

Заключение

Дальнейшие исследования, по-видимому, целесообразно проводить в направлении повышения точности распознавания сбойных сигналов при снижении их уровня, а также при наличии многократных сбоев, действующих в аппаратуре.

Список литературы

1. **Дмитриев, С. П.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004.
2. **Дианов, В. Н.** Контроль и диагностика сбоев современных систем автоматики / В. Н. Дианов // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 7. – С. 23–26.
3. **Дианов, В. Н.** Диагностика сбоев в электронной аппаратуре / В. Н. Дианов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – № 2. – С. 16–47. – (Приборостроение).

4. Принцип устройства и работы гидродинамических лагов // http://podlodka.info/content/view/404/207.
5. Патент RU 2 296 952 C2. Способ и устройство обнаружения источников сбоев в датчиках-расходомерах / В. Н. Дианов, А. А. Черняев, К. В. Плюшкин, А. А. Саркисов, Д. В. Власов // Бюл. № 10 от 10.04.2007.

Клевцова Татьяна Викторовна
соискатель,
Московский государственный
индустриальный университет

Klevtsova Tatyana Viktorovna
the competitor,
the Moscow state industrial university

УДК 656.1:681.51

Клеввцова, Т. В.

Методы обнаружения скрытых дефектов в навигационных системах / Т. В. Клевцова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 134–141.

УДК 629.7.072.8

А. А. Гущина, Б. К. Кемалов, Э. В. Лапшин

НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ФУНКЦИОНАЛЫ И ПРИНЦИП МИНИМУМА ФУНКЦИОНАЛА ОБОБЩЕННОЙ РАБОТЫ

Аннотация. Рассматривается детерминированная модель управляемого процесса в дифференциально-операторной форме, которая обладает значительной общностью. Для указанной модели управляемого процесса приводится классический целевой функционал Больца и предлагается функционал обобщенной работы (ФОР), который относится к неклассическим функционалам. Название ФОР является условным и может выражать не энергетические, а информационные затраты или и то, и другое вместе.

Ключевые слова: идентификация систем, теория управления, функционал.

Abstract. The determined model of operated process in the differentsialno-operational form which possesses a considerable generality is considered. For the specified model of operated process it is resulted classical target functional Больца and it is offered functional of the generalised work (FGW), which concerns to non-classical functionals. Name FGW is conditional and can express not power, but information expenses, or both that and another together.

Keywords: system identification, control theory, funktsional.

Введение

Авиатренажеры широко используются для подготовки летного состава в военной и гражданской авиации. Они позволяют обеспечить:

– повышение качества подготовки летных экипажей к действиям как в штатных, так и нештатных ситуациях;

– повышение безопасности полетов за счет допуска к выполнению полетного задания летчиков, лучше подготовленных для действия в нормальных условиях, при отказах авиационной техники, авариях и боевых повреждениях;

– сокращение сроков и стоимости подготовки летного состава, а также расходов ресурсов авиационной техники.

Авиационное тренажеростроение уже превратилось в приоритетное направление научно-технического прогресса. Достигнут высокий уровень адекватности в комплексных авиационных тренажерах, после чего масштабы их применения существенно расширились.

Однако «тотальная» профессиональная подготовка требует огромных затрат интеллектуального труда, в том числе труда профессионалов высшей квалификации.

Поэтому в данной статье значительное место отводится вопросам теоретического и прикладного характера, связанным с техническими средствами обучения.

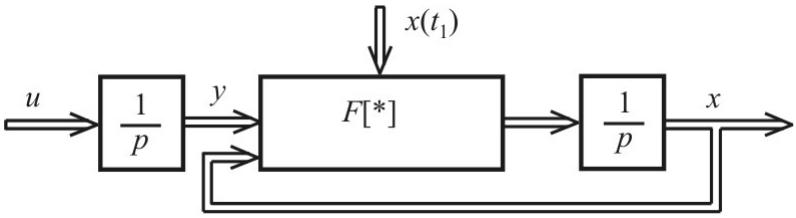
1 Модель управляемого процесса

Прежде чем рассматривать классические и неклассические целевые функционалы, представим детерминированную модель управляемого процесса в той форме, которая наиболее часто будет использоваться в дальнейшем. Это дифференциально-операторная форма вида

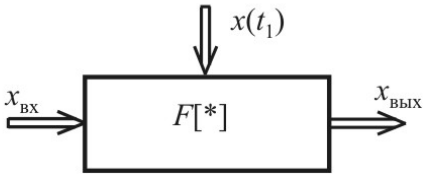
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = F\left[x(t), x(t_1), y(t), t\right], \\ \dot{y}(t) = u(t). \end{cases} \tag{1}$$

Здесь $\left(x(t), y(t)\right)$ − вектор состояния в момент времени $t \in [t_1, t_2]$, $t_2 > t_1$ (величина x может рассматриваться и как выходная величина); $u(t)$ − вектор управления. Вектор y будет нередко именоваться далее управляющим вектором; $F[*]$ − в общем случае оператор достаточно общего вида.

Структурная схема, отвечающая уравнениям (1), изображена на рис. 1,а, где $\frac{1}{p}$ − оператор интегрирования. Оператор интегрирования векторных величин правильнее обозначать через $\frac{1}{p}E$, где E − единичная матрица соответствующей размерности. В целях упрощения схем символ E опускается.

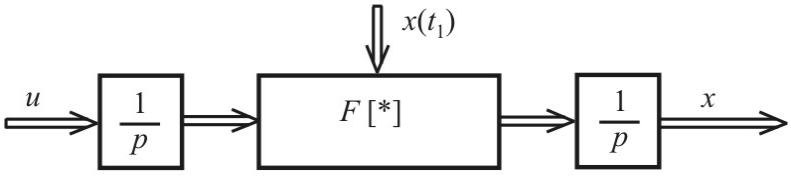


а)



б)

$\dot{x}_{вх} = u$, $\int x_{вых} dt = x$



в)

Рис. 1 Детерминированная модель управляемого процесса в дифференциально-операторной форме

С первого взгляда кажется, что эта структура довольно частная, специфическая. Однако в действительности она обладает большой общностью. Действительно, пусть сначала имеется модель с просто операторным описанием вида рис. 1,б. Здесь $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ − векторные входная и выходная величины. Вектор $x(t_1)$ обозначает начальные условия. Такая операторная модель при соответствующих допущениях обладает, как известно [1], весьма большой общностью. Она охватывает не только динамические, но и логико-динамические системы (соединение конечных автоматов и динамических систем), системы с дискретным временем, системы с распределенными параметрами и др.

Примем теперь в качестве входной величины модели рис. 1,б не $x_{\text{вх}}$, а производную от этой величины $\dot{x}_{\text{вх}}$, и в качестве выходной величины интеграл от $x_{\text{вых}}$:

Получаем модель типа рис. 1,в. Теперь стоит только предположить, что в числе входных сигналов оператора фигурирует x, как получается модель рис. 1,а. Правда, входными и выходными величинами оператора в модели рис. 1,б могут быть обобщенные функции, не удовлетворяющие условиям простой дифференцируемости и интегрируемости (по Риману). Но тогда можно прибегнуть к обобщенным понятиям производной и интеграла, которые сохраняют силу и в этих условиях.

Итак, модель детерминированного управляемого процесса (1) обладает значительной общностью и будет широко использоваться в дальнейшем изложении. При этом в соответствии с предположением о детерминированности прежде всего будет рассматриваться модель (1), обладающая при $u \triangleq 0$ и заданных значениях $x(t_1)$, $y(t_1)$ единственным решением (реакцией):

$$x(t) = X\left(x(t_1), y(t_1), t, t_1\right), \quad y(t) = y(t_1), \tag{3}$$

где функция X считается дифференцируемой (или кусочно-дифференцируемой) по y. Движение (3), получаемое при $u \triangleq 0$ (управляющий фактор фиксирован), именуется свободным.

Для целей построения моделей деятельности человека-оператора, оптимизации в условиях многоэкстремальности и неполной определенности потребуется дальнейшее обобщение в виде зависимости выходной величины системы (1) при $u \triangleq 0$ еще от одного дополнительного векторного аргумента ν:

$$x(t,\nu) = X\left(x(t_1), y(t_1), \nu_1, t, t_1\right), y(t) = y(t_1). \tag{4}$$

Здесь ν может обозначать параметр (в общем случае − векторный) или номер варианта (в этом случае ν − обычно целое число).

2 Классические и неклассические целевые функционалы

Классический целевой функционал Больца применительно к модели (1) при $t_1 = t$ имеет вид

$$I = V_з\left[x(t_k), y(t_k), t_2\right] + \int_t^{t_2} L\left[x(\theta), y(\theta), u(\theta), \theta\right] d\theta, \tag{5}$$

где $V_з$, L – заданные скалярные, как правило, неотрицательные, функции. Функция $V_з$ (терминальный член) обычно «отвечает» за вывод управляемого объекта в момент времени t_k в окрестность желаемой «цели». Функция L «ответственна» за качество переходных процессов, соблюдение ограничений (через функции «штрафа»), а также затраты на управление [2].

Для той же модели управляемого процесса (1) неклассическим целевым функционалом является функционал вида [1, 2]

$$I = V_з\left[x(t_k), y(t_k), t_k\right] + \int_t^{t_2} L\left[x(\theta), y(\theta), u(\theta), u_{оп}(\theta), \theta\right] d\theta, \qquad (6)$$

где $u_{оп}$ – неизвестное до решения задачи синтеза оптимальное (доставляющее минимум функционалу (6)) управление.

Функционал обобщенной работы (ФОР) относится к неклассическим функционалам и для модели (1) имеет следующее общее выражение:

$$I = V_з\left[x(t_k), y(t_k), t_k\right] + \int_t^{t_2} Q_з\left[x(\theta), y(\theta), \theta\right] d\theta +$$

$$+ \int_t^{t_2} L_з\left[x(\theta), y(\theta), u(\theta), u_{оп}(\theta), \theta\right] d\theta. \qquad (7)$$

Здесь $V_з$, $Q_з$ – заданные неотрицательные функции; $u_{оп}$, как и в (6), – оптимальное управление; $L_з$ – заданная функция указанных аргументов, такая, что существует векторная функция-столбец $\pi(x, y, u, u_{оп}, t)$, при которой

$$L_з(x, y, u, u_{оп}, t) - \pi^T(x, y, u_{оп}, t)u = \begin{cases} 0 \ \forall\, u = u_{оп} \\ > 0 \ \forall\, u \neq u_{оп} \end{cases}. \qquad (8)$$

Это условие можно выразить и таким образом: должна существовать векторная функция $\pi(x, y, u_{оп}, t)$, скалярное произведение которой на u тождественно равно $L_з(x, y, u, u_{оп}, t)$ при $u = u_{оп}$ и меньше $L_з$ при $u \neq u_{оп}$.

Сумма первых двух членов в правой части выражения (7) именуется главной частью ФОР:

$$I_г = V_з\left[x(t_k), y(t_k), t_k\right] + \int_t^{t_2} Q_з\left[x(\theta), y(\theta), \theta\right] d\theta. \qquad (9)$$

Происхождение самого названия «функционал (или критерий) обобщенной работы» связано с первыми публикациями [1, 3, 4]. В них частная форма последнего члена функционала (7) (или эквивалентное изопериметрическое условие) трактовались как сумма работ, совершаемых управлениями и управляющими сигналами. Для ФОР общего вида (7), (8) данное название является условным, формальным. Дело в том, что член $\int_t^{t_2} L_з d\theta$ может выражать не

энергетические, а информационные затраты, или и то, и другое вместе. Кроме того, при некоторых формах функции $L_з$ эти затраты исчисляются в сугубо условной преобразованной форме.

Все же, в целом, член $\int_t^{t_2} L_з d\theta$ в (7) допускает определенную интерпретацию. При решении задач синтеза автоматической управляющей системы он влияет, прежде всего, на структуру и параметры синтезируемого интерфейса, связывающего управляющую систему с объектом управления (ЦАП, экстраполяторы, исполнительные устройства).

При рассмотрении (7) как целевого функционала модели профессиональной деятельности человека-оператора или электронного инструктора указанный член может отражать степень психофизиологической напряженности человека при реализации соответствующих действий.

Пока предложены лишь три конкретных формы функции $L_з$ в ФОР (7), (8).

Это, прежде всего, квадратичная форма [4, 5]:

$$L_з = 0,5\left(u^T k^{-1} u + u_{оп}^T k^{-1} u_{оп}\right), \tag{10}$$

где k – положительно определенная симметричная матрица заданных коэффициентов (постоянных или зависящих от времени) или заданных функций (x, y, t), т.е. $k = k(x, y, t)$.

Легко проверить, что (10) удовлетворяет условию (7), причем

$$\pi = k^{-1}(x, y, t) u_{оп}. \tag{11}$$

Другой конкретной и в то же время достаточно общей формой функции $L_з$ является степенная форма [1, 3, 4, 6]:

$$L_з = \sum_{j=1}^{r} k_j^{-1}(x, y, t)\left(q_j^{-1} u_j^{q_j} + p_j^{-1} u_{jоп}^{q_j}\right). \tag{12}$$

Здесь r – размерность векторов $u, u_{оп}$; p_j, q_j – заданные действительные положительные числа, связанные соотношением $p_j^{-1} + q_j^{-1} = 1$, и такие, что $u_j^{q_j}$ – четные функции u_j; $k_j(x, y, t)$ – заданные положительные функции или числа. При (12)

$$\pi(x, y, u_{оп}, t) = \mathrm{colon}\left[k_j^{-1}(x, y, t) u_{jоп}^{q_j - 1}\right]. \tag{13}$$

В этом можно убедиться прямой подстановкой (12), (13) в (7) и проверкой классического необходимого условия минимума по u_j, $u_{jоп}$ $(j = 1, 2, ..., r)$.

При $p_j = q_j = 2$ выражение (12) обращается в квадратичную формулу (10) для диагональной матрицы k.

3 Соотношения ФОР

Главная часть ФОР (9), вычисленная на свободном движении (3), при $t_1 = t$ имеет вид

$$I_{\text{г}}\left(X,y,t\right) = V_{\text{з}}\left[X\left(x\left(t\right),y\left(t\right),t_k,t\right),y\left(t\right),t_k\right] +$$

$$+\int_t^{t_2} Q_{\text{з}}\left[X\left(x\left(t\right),y\left(t\right),\theta,t\right),y\left(\theta\right),\theta\right]d\theta \qquad (14)$$

и удовлетворяет операторному уравнению с частными производными – аналогу уравнения Ляпунова:

$$\frac{\partial}{\partial t} I_{\text{г}}\left(X,y,t\right) + \frac{\partial}{\partial X} I_{\text{г}}\left(X,y,t\right) F\left(X,y,t\right) = -Q_{\text{з}}\left(X,y,t\right). \qquad (15)$$

Учитывая последнее равенство, из (15) получаем

$$\frac{\partial}{\partial t} I_{\text{г}}\left(x,y,t\right) + \frac{\partial}{\partial x} I_{\text{г}}\left(x,y,t\right) F\left(x,y,t\right) = -Q_{\text{з}}\left(x,y,t\right). \qquad (16)$$

Полная производная по времени $\dot{I}_{\text{г}}\left(X,y,t\right)$ на управляемом движении (1) равна

$$\dot{I}_{\text{г}}\left(X,y,t\right) = -Q_{\text{з}}\left(X,y,t\right) + \frac{\partial}{\partial y} I_{\text{г}}\left(X,y,t\right) u. \qquad (17)$$

4 Принцип минимума ФОР

Следующее положение именуется принципом минимума ФОР, или основной теоремой оптимизации по критерию обобщенной работы.

Оптимальное управление, доставляющее минимум ФОР (7), (8) на решениях уравнений (1) для случая единственности свободного движения (3), определяется выражениями

$$u = u_{\text{оп}},\ \pi\left(x,y,u_{\text{оп}},t\right) = -\frac{\partial^T}{\partial y} I_{\text{г}}\left(X,y,t\right), \qquad (18)$$

где $I_{\text{г}}\left(X,y,t\right)$ есть решение уравнения (15) или (16) при граничном условии

$$I_{\text{г}}\left(x\left(t_2\right),y\left(t_2\right),t_2\right) = V_{\text{з}}\left(x\left(t_2\right),y\left(t_2\right),t_2\right), \qquad (19)$$

или, что то же самое, – главная часть ФОР, вычисленная на свободном движении $u \triangleq 0$ управляемой системы (1).

Доказательство этой и других, в основном менее общих, формулировок принципа минимума ФОР строится на основании следующих методов:

– классического вариационного исчисления [3, 5, 6];

– динамического программирования (функционального уравнения Беллмана) [7, 8];

– метода прямых преобразований [4, 9].

При одинаковых условиях все они, естественно, дают одинаковые результаты, но последний отличается простотой и наглядностью. Отсылая интересующихся доказательством к указанным публикациям, в частности [1], заметим, что в ходе доказательства получается, что при оптимальном управлении

$$I(x,y,t) = I_{\text{г}}(X,y,t), \tag{20}$$

т.е. ФОР, вычисленный на движении оптимальной замкнутой системы, равен главной части ФОР, вычисленной на свободном движении разомкнутой системы.

Основная теорема допускает обобщение в направлении неединственности свободного движения управляемого объекта. Если при прочих равных условиях главная часть ФОР, вычисленная на всех решениях (4), имеет глобальный минимум при $\nu = \mu$:

$$\mu = \arg\min I_{\text{г}r}\left[X\left(x(t),y(t),\nu,\theta,t\right),y(t),t\right], \tag{21}$$

то

$$u_{(\mu)} = u_{(\mu)\text{оп}},\ \pi\left(x,y,u_{(\mu)\text{оп}},t\right) = -\frac{\partial^T}{\partial y} I_{\text{г}}\left(X_{\nu=\mu},y,t\right). \tag{22}$$

Для цели построения модели профессиональной деятельности человека-оператора удобна еще более общая формулировка принципа минимума ФОР:

$$\min_{y,\nu}\left\{V_{\text{з}}\left[X\left(x,y,\nu,t_k,t\right),y,t_k\right] + \int_t^{t_2} Q_{\text{з}}\left[X\left(x,y,\nu,\theta,t\right),y,\theta\right]d\theta\right\}. \tag{23}$$

Выражения (18), (22) для оптимальных управлений имеют неявную форму. При конкретных видах функции «затрат на управление» (10), (12) оптимальные управления имеют явные формы:

1) для квадратичной функции $L_{\text{з}}$ (10):

$$u = u_{\text{оп}} = -k\frac{\partial^T}{\partial y} I_{\text{г}}(X,y,t); \tag{24}$$

2) для степенной функции $L_{\text{з}}$ (12):

$$u_j = u_{j\text{оп}} = -\left[k_j \frac{\partial^T}{\partial y_j} I_{\text{г}}(X,y,t)\right]^{P_j-1}, \quad j = 1, 2, ..., r; \tag{25}$$

3) для функции $L_{\text{з}}$ вида

$$L_{\text{з}} = q^{-1}\left[u^T k^{-1}(x,y,t)u\right]^q + \left(2-q^{-1}\right)\left[u_{\text{оп}}^T k^{-1}(x,y,t)u_{\text{оп}}\right]^q,$$

$$u = u_{\text{оп}} = -2^{1/(1-2q)}\left(\frac{\partial I_{\text{г}}}{\partial y} k \frac{\partial^T I_{\text{г}}}{\partial y}\right)^{(1-q)/(2q-1)} k\frac{\partial^T I_{\text{г}}}{\partial y}, \tag{26}$$

где $q > 0{,}5$.

Выражения (25), (26) можно трактовать как преобразования компонент вектора $\frac{\partial^T}{\partial y} I_{\text{г}}$ в безынерционных нелинейных звеньях. Для (25) эти преобразования имеют вид $u_{j\text{оп}} = -V_j^{p_j - 1}$, где $V_j = k_j \frac{\partial^T}{\partial y_j} I_{\text{г}}$.

Предложенный подход интересен с точки зрения минимизации информационных затрат. Однако он, вообще говоря, требует доопределения. Можно, в частности, полагать, что при достижении границы зоны нечувствительности $|V_j| = 1$ генерируется δ-импульс или серия δ-импульсов, возвращающих систему в пределы зоны нечувствительности. При этом компоненты управляющего фактора y изменяются во времени ступенчато.

Оптимальное управление (25) иллюстрировать труднее, т.к. каждая компонента $u_{j\text{оп}}$ зависит не только от соответствующей компоненты $V_j = k_j \frac{\partial r}{\partial y_j} I_{\text{г}}$, но и от квадратичной формы $\frac{\partial}{\partial y} I_{\text{г}}\, k \frac{\partial^T}{\partial y} I_{\text{г}}$.

Заключение

Достоинством оптимизации на основе ФОР является алгоритмическая и вычислительная простота. Одно из наиболее наглядных пояснений этого свойства заключается в следующем. Из общего неявного выражения (18) и конкретных явных выражений (24)–(26) видно, что оптимальные в смысле минимума ФОР управления строятся на основе вычислений главной части ФОР на свободном прогнозируемом движении управляемого объекта.

Применение ФОР для сложных многоразмерных нелинейных задач оптимизации позволяет на два–три и более порядков сократить вычислительные затраты на стадии проектирования

Список литературы

1. **Красовский, А. А.** Математическое моделирование динамики полета летательного аппарата / А. А. Красовский, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков ; под ред. Э. В. Лапшина. – Пенза : Изд-во Пензенского филиала РГУ ИТП, 2008. – С. 42–54.
2. **Красовский, А. А.** Развитие принципа минимума обобщенной работы / А. А. Красовский // АиТ. – 1987. – № 1. – С. 13–23.
3. **Красовский, А. А.** Обобщение задачи аналитического конструирования регуляторов при заданной работе управлений и управляющих сигналов / А. А. Красовский // АиТ. – 1989. − № 7. − С. 7−17.
4. **Красовский, А. А.** Развитие аналитического метода синтеза условно оптимальных управлений нелинейного объекта / А. А. Красовский // АиТ. – 1969. − № 11. − С. 5−14.
5. **Красовский, А. А.** Интегральные оценки моментов и синтез линейных систем / А. А. Красовский // АиТ. – 1967. − № 10. − С. 53−71.
6. **Красовский, А. А.** Аналитическое конструирование систем управления нелинейными пассивными объектами / А. А. Красовский // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1968. − № 4. − С. 114−128.
7. **Кочетков, Ю. А.** Об оптимальном управлении детерминированными системами / Ю. А. Кочетков // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1976. − № 1. − С. 158−166.

8. **Кочетков, Ю. А.** Оптимальное управление детерминированными системами, описываемыми интегро-дифференциальными уравнениям / Ю. А. Кочетков, В. К. Томшин // АиТ. – 1978. − № 1. − С. 5−11.
9. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. − М. : Наука, 1987. – 712 с.

Гущина Алина Анатольевна
аспирант,
Пензенский государственный университет

Gushchina Alina Anatolevna
the post-graduate student,
the Penza state university

E-mail: polezzinka@rambler.ru

Кемалов Берик Каирович
начальник учебного отдела,
Военный института Сил воздушной обороны (Казахстан, Актобе)

Kemalov Berik Kairovich
the chief of educational department,
the Military man of institute of Forces of air defence (Kazakhstan, Aktobe)

E-mail: visvo@rambler.ru

Лапшин Эдуард Владимирович
доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет

Lapshin Edward Vladimirovich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
chair of designing and radio equipment manufacture,
the Penza state university

E-mail: edlapshin@mail.ru

УДК 629.7.072.8

Гущина, А. А.

Неклассические функционалы и принцип минимума функционала обобщенной работы / А. А. Гущина, Б. К. Кемалов, Э. В. Лапшин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 142–150.

УДК 658.589

В. Я. Савицкий, И. А. Сухорукова, И. В. Сухоруков

МОДЕРНИЗАЦИЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В РАМКАХ *CAE*-ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В рамках автоматизированной системы инженерного анализа предложен новый метод создания уплотнительных устройств (УУ), позволяющий в сжатые сроки внедрить высокоэффективные уплотнительные элементы (УЭ). Раскрыты механизмы компьютерного и физического моделирования напряженно-деформированного состояния как отдельных УЭ, так и в целом конструкции УУ. Достоверность предлагаемого метода подтверждена стендовыми испытаниями.

Ключевые слова: уплотнительные устройства, полиуретановые уплотнительные элементы, технологии автоматизированного инженерного анализа.

Abstract. Within the framework of the automated system of the engineering analysis the new method of creation of the sealing devices (SD) is offered, allowing in deadlines to introduce highly effective sealing elements (SE). Mechanisms of computer and physical modelling stress-deformed conditions as separate SE, and as a whole design SD are opened. Reliability of an offered method is confirmed with bench tests.

Keywords: sealing device, polyurethane sealing elements, technologies of the automated system of the engineering analysis.

Введение

Традиционно в качестве уплотнительных элементов для герметизации рабочей жидкости (РЖ) в гидропневматических устройствах (ГПУ) импульсных тепловых машин (ИТМ) используются сальниковые и манжетные (резиновые, кожаные) уплотнительные элементы (УЭ) в различных комбинациях, одним из основных недостатков которых является низкая износостойкость, приводящая к интенсивной утечке РЖ. Чрезмерная утечка РЖ через уплотнения приводит к отказу конструкции ИТМ в целом. Режимы ГПУ характеризуются широким диапазоном динамических нагрузок на узлы трения (УТ), высокими скоростями реверсивного трения (пиковые значения которых превышают 12 м/с), малой длительностью аккумулирования механической энергии (менее 1 с), экстремальными климатическими условиями эксплуатации. Ресурс ГПУ во многом определяется износостойкостью уплотнений штоков. Исходя из служебного назначения, УЭ штоков ГПУ должны удовлетворять следующим требованиям [1]:

– обеспечивать герметичность подвижного соединения в пределах установленного ресурса;

– не вызывать коррозию сопрягаемых деталей и изменение свойств РЖ;

– создавать невысокую силу трения (не более 1500 Н) в соединении с уплотняемыми поверхностями;

– сохранять упругие свойства материала УЭ в установленном диапазоне температур;

– быть технологичными при изготовлении и легкосъемными при ремонте.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации ИТМ показал, что существенное увеличение ресурса подвижных контактных уплотнений што-

ков ГПУ возможно только путем принципиального изменения существующих конструкций УЭ с одновременной заменой асбестосодержащих или резиновых материалов на полимерные с высокими эксплуатационными свойствами. Однако традиционная итерационная схема «разработка – натурные испытания – устранение недостатков – повторные испытания – и т.д.» (до получения ожидаемого результата) может затягивать стадию разработки на годы, обусловливая при этом неоправданные материальные и финансовые затраты. В этой связи перспективными представляются технологии автоматизированного инженерного анализа (*CAE*-технологии), реализация которых способствует решению обозначенной проблемы.

Цель данных исследований состояла в автоматизации разработки конструкции уплотнительных устройств (УУ) с полиуретановыми УЭ.

1 Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния уплотнительных элементов

Основу разработки новых УУ с заданными эксплуатационными характеристиками в сжатые сроки составил инженерный анализ в цепи обратной связи, предшествующей изготовлению опытной конструкции. Структурная схема предлагаемого метода разработки УУ с полимерными УЭ представлена на рис. 1.

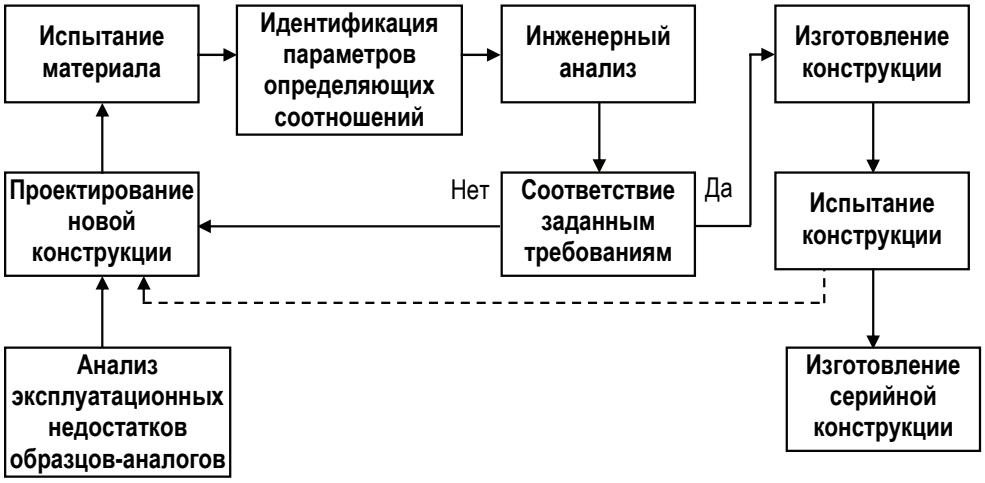


Рис. 1 Структурная схема метода создания нового полимерного УУ

Сущность этапов разработки заключается в следующем.

1. *Разработка проекта конструкции.* Эскиз, а затем и предпочтительный рабочий проект уплотнения выполнен в системе *AutoCAD* (рис. 2).

Схема информационного наполнения электронного макета приведена на рис. 3. С использованием *CAE* среднего уровня *Design Space* фирмы *SAS* чертежи уплотнения были преобразованы в *Solid*-модель и помещены в электронный макет изделия в формате *IGS* для последующего использования в системах инженерного анализа.

2. *Испытание материала уплотнения.* Испытанию материала предшествовала процедура выбора модели материала (структуры определяющего соотношения).

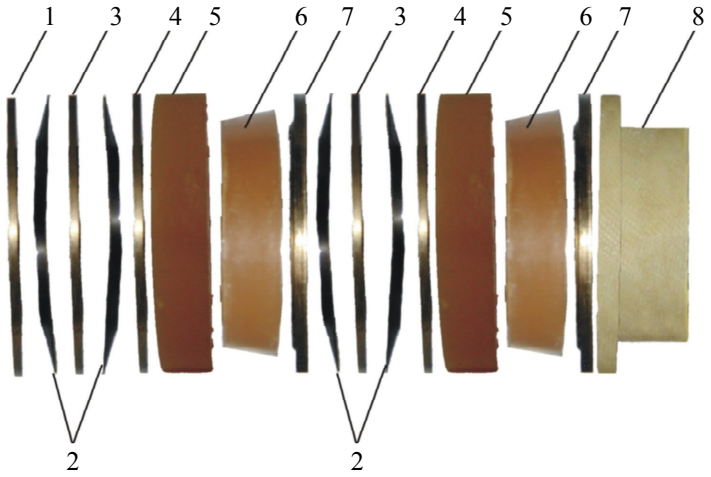


Рис. 2 Конструкция УУ одностороннего действия: 1, 3, 4 – кольца; 2 – тарельчатые пружины; 5 – упорное кольцо; 6 – обжимное кольцо; 7 – поджимное кольцо; 8 – направляющая втулка

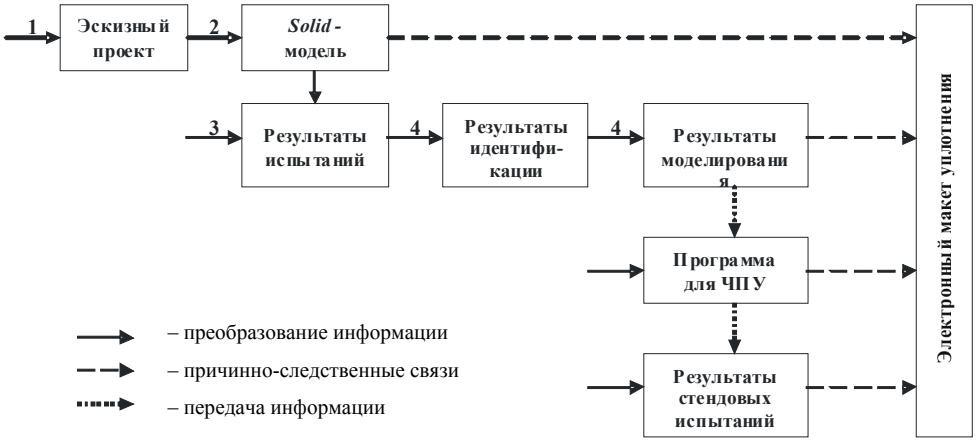


Рис. 3 Информационное обеспечение разработки: 1 – CAD (Auto CAD); 2 – CAE среднего уровня (Design Space); 3 – программа обеспечения регистрации экспериментальных данных; 4 – CAE верхнего уровня (ANSYS)

Из имеющихся в банке данных моделей *ANSYS*, априорно подходящих для описания поведения исследуемого материала, выбрана модель гиперэластичного материала:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = 2\frac{\partial W}{\partial C_{ij}}, \qquad (1)$$

где S_{ij} – компоненты второго тензора напряжений Пиола–Кирхгоффа; W – упругий потенциал; E_{ij} – компоненты тензора деформаций Лагранжа; C_{ij} – компоненты правого тензора деформаций Коши–Грина.

В последующем инженерном анализе использовался упругий потенциал Муни–Ривлина:

$$W = \sum_{k+l=1}^{N} a_{kl}\left(\overline{I}_1 - 3\right)^k \left(\overline{I}_2 - 3\right)^l + \frac{1}{2}\kappa\left(\overline{I}_3 - 1\right)^2, \qquad (2)$$

где a_{kl} – константы; $\kappa = \dfrac{2\left(a_{10} + a_{01}\right)}{1 - 2\nu}$ – объемный модуль; ν – коэффициент Пуассона; $\overline{I}_i$ $\left(i = 1,\ 2,\ 3\right)$ – величины, равные

$$\overline{I}_1 = I_1\left(I_3\right)^{\frac{1}{3}},\ \overline{I}_2 = I_2\left(I_3\right)^{-\frac{2}{3}},\ \overline{I}_3 = \left(I_3\right)^{\frac{1}{2}}; \qquad (3)$$

I_i $\left(i = 1,\ 2,\ 3\right)$ – инварианты правого тензора деформаций Коши–Грина:

$$I_1 = C_{ij},\ I_2 = \frac{1}{2}\left(I_1^2 - C_{ij}C_{ij}\right),\ I_3 = \det C_{ij}. \qquad (4)$$

После проверки несжимаемости материала был принят пятипараметрический потенциал $N = 2$.

Схема технического обеспечения исследований и разработки уплотнения представлена на рис. 4. Испытания проводились на лабораторной машине Р-50 с использованием специально разработанного приспособления. Для регистрации сил и перемещений использовались встроенный двухкоординатный самописец и внешняя ЭВМ.

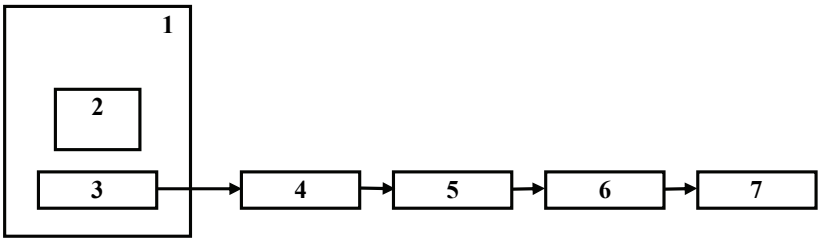


Рис. 4 Техническое обеспечение разработки: 1 – испытательная машина Р-50; 2 – приспособление для испытаний образцов на сжатие и сдвиг; 3 – блок регистрации испытательной машины Р-50; 4 – ЭВМ, осуществляющая регистрацию; 5 – рабочая станция, оснащенная CAD/CAM/CAE; 6 – роботизированный комплекс; 7 – стенд триботехнических испытаний

Образцы в виде кубика со стороной 10 мм испытывались на сжатие (рис. 5,а) и сдвиг (рис. 5,б). Размеры образцов были приближены к размерам сечения натурного кольца УУ с целью минимизации влияния масштабного фактора.

При испытании на сжатие деформации принимали значения: $\varepsilon_1 < 0$; $\varepsilon_2, \varepsilon_3 > 0$. Определение величин деформаций проводилось из условия:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0; \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3. \end{cases} \qquad (5)$$

При испытании на сдвиг с использованием специального приспособления соблюдалось условие:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2. \qquad (6)$$

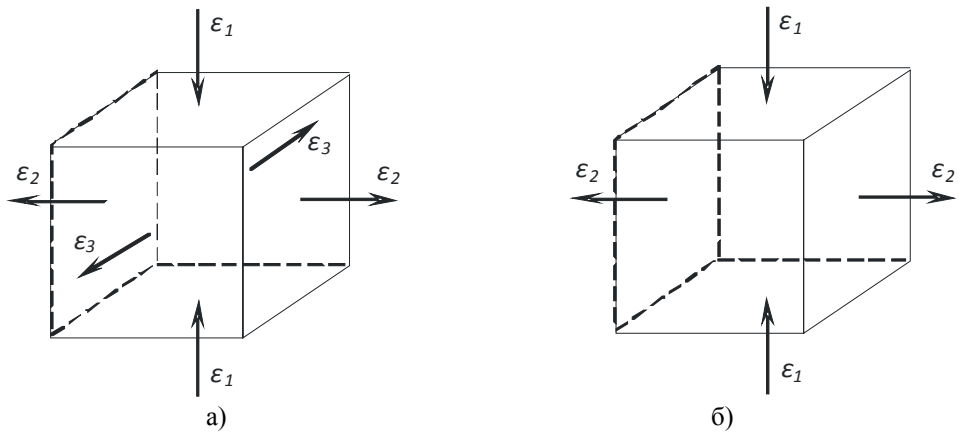


Рис. 5 Схемы деформации образца:
а – при испытании на сжатие; б – при испытании на сдвиг

3. *Идентификация параметров определяющего соотношения.* Идентификация осуществлена встроенными средствами ANSYS. На основании проведенных испытаний были получены следующие значения параметров определяющего соотношения:

$$a_1 = 0{,}3846534853\text{E} +07;\ a_2 = 0{,}1253413529\text{E} +07;\ a_3 = 0{,}3176347699\text{E} +07;$$

$$a_4 = -0{,}7953594130\text{E} +07;\ a_5 = 0{,}5434034620\text{E} +07.$$

4. *Инженерный анализ уплотнительного устройства*. Может реализоваться на нескольких иерархических уровнях. В частности, первый уровень предусматривал нелинейный статический анализ уплотнительного кольца в осесимметричной постановке с целью определения НДС и контактного давления между уплотнительным кольцом и штоком.

Результаты расчета НДС с использованием упругого потенциала Муни–Ривлена представлены на рис. 6, демонстрирующем распределение контактных напряжений. Результаты инженерного анализа сохранены в электронном макете в текстовом формате и формате *ANSYS* – форма *RST*.

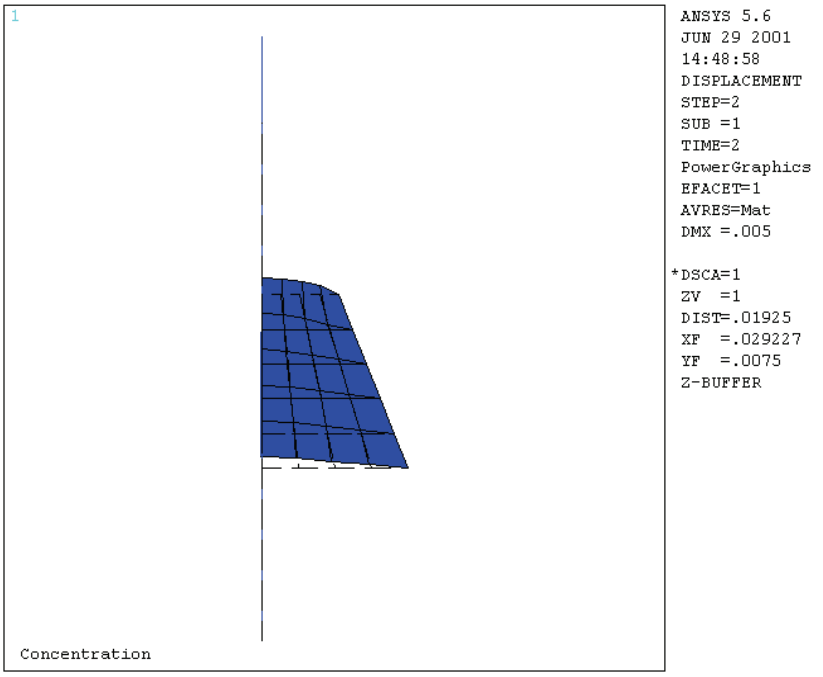
С целью проверки адекватности описания процессов деформирования и возникающих при этом напряжений в кольцах УУ использовались образец размером 50×50×10 мм, установленный в специальное приспособление (рис. 7), а также его тестовая конечно-элементная модель. Для визуального контроля процессов деформирования образец маркировался сеткой с размером клетки 5×5 мм. Адекватность описания процессов деформирования тестового образца с помощью модели Муни–Ривлена можно видеть на изменяющихся тестовых конечно-элементных моделях (см. рис. 7).

На рис. 8 приведена картина распределения напряжений в исследуемом тестовом образце.

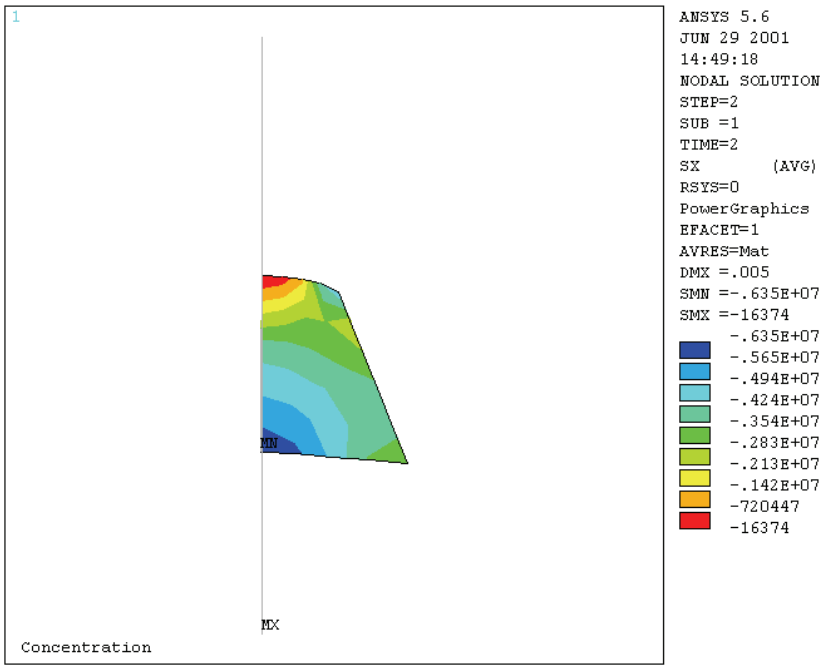
2 Физическое моделирование работы уплотнительных устройств

Исследования проводились на машине Р-50 при нагружении сжатием до величины предельной деформации каждого элемента в отдельности. В качестве исследуемых элементов рассматривались: отдельно взятое сальниковое кольцо; образующие блок наружное и внутреннее полиуретановые коль-

ца; блок развернутых вогнутостями навстречу друг другу тарельчатых пружин либо с таким же расположением установленных внакладку (сдвоенных) пружин.

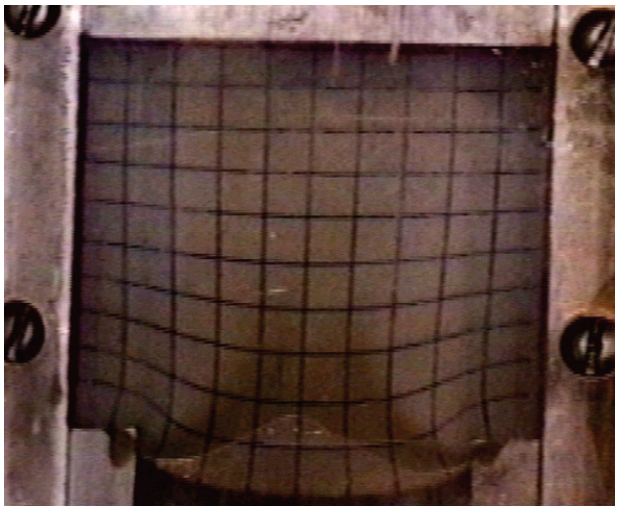


а)

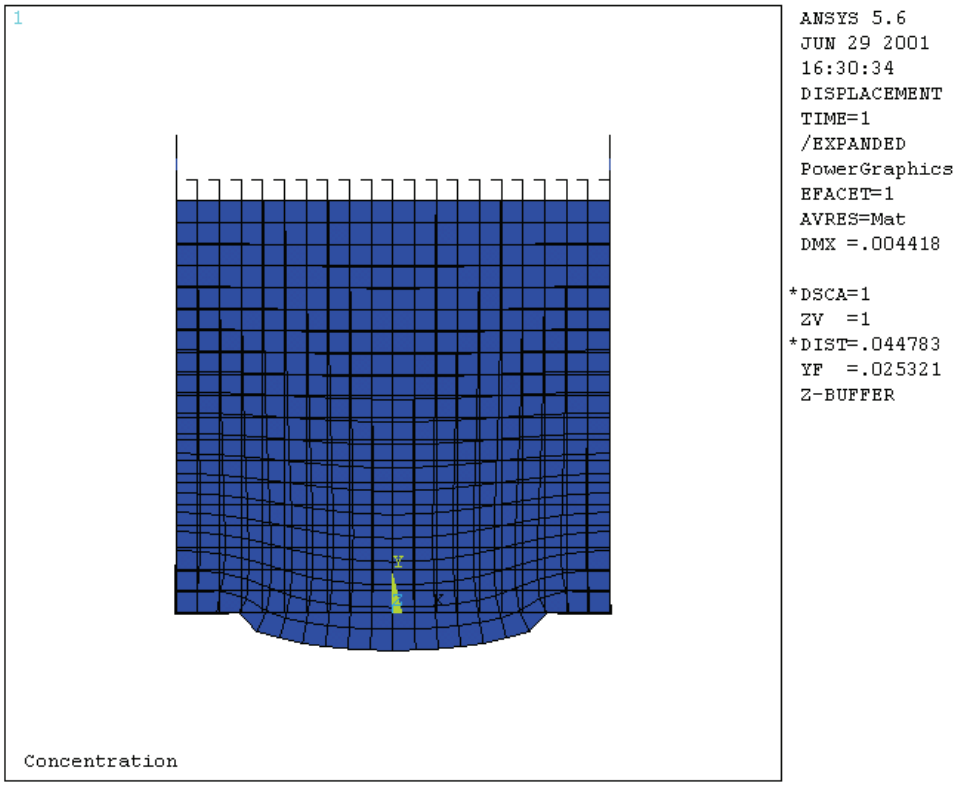


б)

Рис. 6 Результаты расчета НДС полимерного кольца: а – недеформированная и деформированная сетка; б – распределение радиальных напряжений



а)



б)

Рис. 7 Деформация тестового образца:
а – физическая модель; б – конечно-элементная модель

Суть исследований сводилась к моделированию поведения каждого элемента, установленного в корпусе УУ, при воздействии осевой нагрузки *N*. Анализ графиков деформирования сальникового кольца и блока полиуретановых колец показывает (рис. 9), что жесткость сальникового кольца при величине деформации $\delta = 5$ мм превышает жесткость полиуретанового блока

на порядок. Вместе с тем величина предельной деформации сальникового кольца составляет 5 мм, в то время как полиуретанового – 7,5 мм. Обращает на себя внимание и тот факт, что блок полиуретановых колец деформируется линейно и упруго, без остаточной деформации, а сальниковое кольцо – с остаточной деформацией 2,7 мм. При этом просматриваются признаки релаксации материала сальникового кольца в начальный период снятия нагрузки.

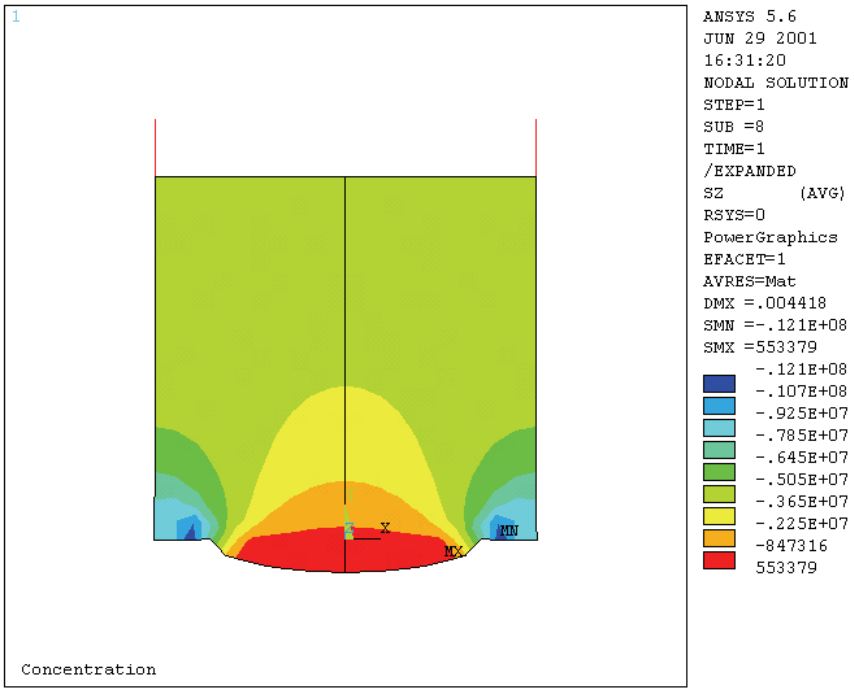


Рис. 8 Напряжения, возникающие в тестовом образце

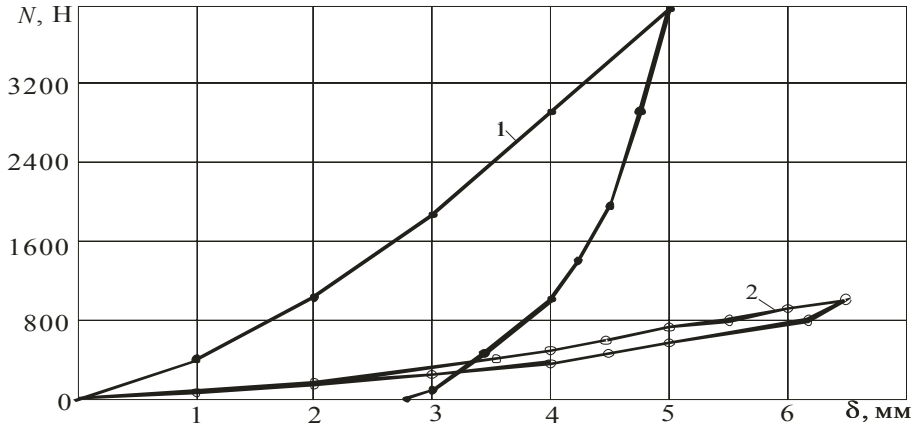


Рис. 9 Деформирование уплотнительных элементов:
1 – сальникового кольца; 2 – полиуретановой пары колец

Для проведения сравнительных лабораторных испытаний штатной и предлагаемой сборок УУ был изготовлен специальный пластмассовый прозрачный корпус (рис. 10).

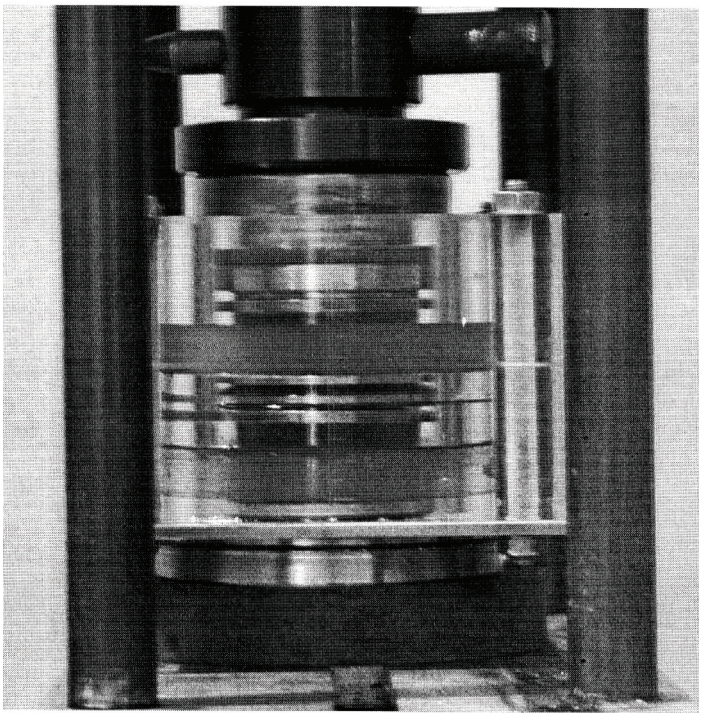


Рис. 10 Корпус испытательного устройства

В процессе осевого нагружения изучалось деформирование различных вариантов сборки. Так, для оценки эффективности расположения в УУ блоков тарельчатых пружин рассматривались два варианта. Первый вариант представляла такая сборка УУ, у которой между блоками полиуретановых колец устанавливался блок сдвоенных тарельчатых пружин. Второй вариант отличался тем, что один блок (по одной встречно развернутой тарельчатой пружине) располагался между блоками полиуретановых колец, а второй – со стороны приложения осевой сжимающей нагрузки. Для создания более жестких условий испытаний элементы уплотнительных устройств не смазывались. После трехкратного нагружения полученных сборок было установлено, что первый вариант характеризовался определенной упругостью, хотя после каждого цикла нагружения отмечалась остаточная деформация (рис. 11). Второй вариант сборки обусловливает накапливание остаточной деформации после каждого цикла нагружения (рис. 12). Полученные результаты позволили сделать вывод о предпочтительности установки жесткого упругого элемента между блоками полиуретановых колец, а также о необходимости смазывания УЭ графитовой смазкой перед сборкой УУ.

С учетом результатов предварительных испытаний были проведены сравнительные циклические испытания сальниковых и полиуретановых сборок УУ. Работа сальникового УУ сопровождалась накоплением большой остаточной деформации (рис. 13).

Сравнительная оценка графиков деформирования полиуретановых УУ с одним центральным блоком сдвоенных тарельчатых пружин и двумя разнесенными блоками одинарных пружин показывает (рис. 14) предпочтительность первого варианта сборки, характеризуемого более высокой упругостью перед вторым, который упруго работает в области нагружения до 800 Н.

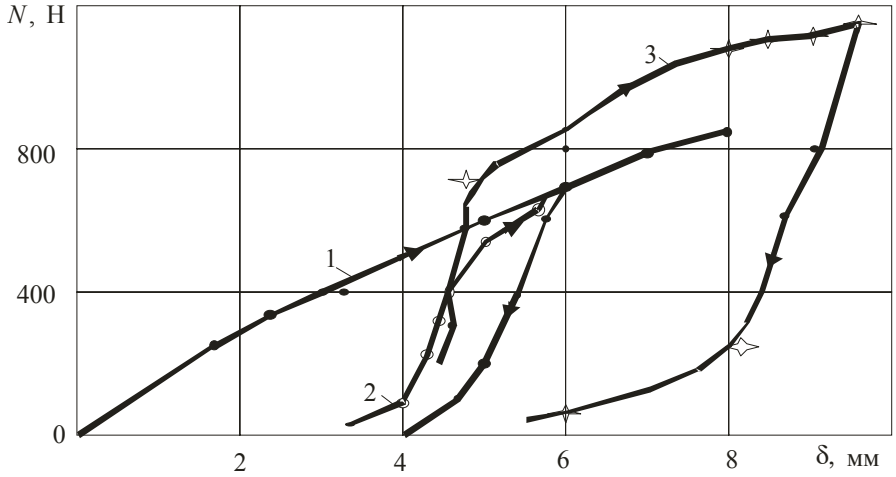


Рис. 11 Деформирование полиуретанового УУ с блоком сдвоенных тарельчатых пружин при циклическом нагружении: 1, 2, 3 – циклы нагружения

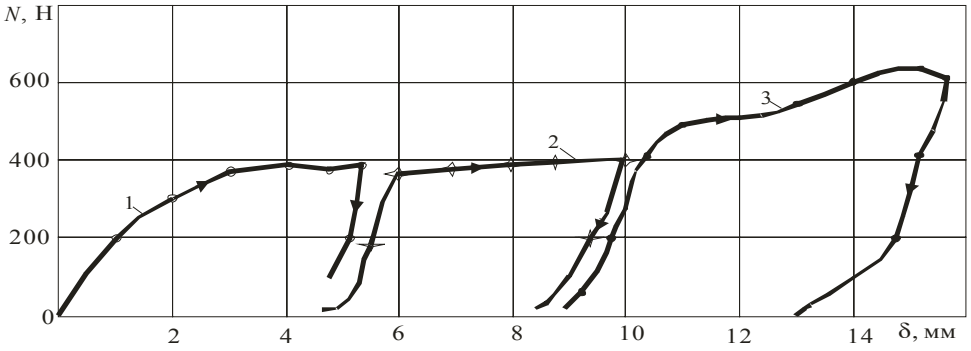


Рис. 12 Деформирование полиуретанового УУ с двумя блоками одинарных тарельчатых пружин: 1, 2, 3 – циклы нагружения

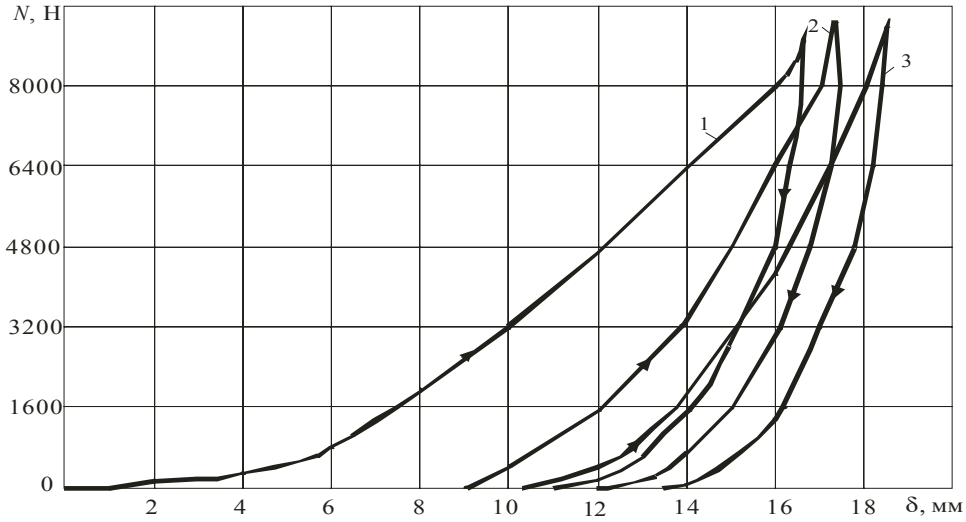


Рис. 13 Деформирование сальниковых УУ при циклическом нагружении: 1, 2, 3 – циклы нагружения

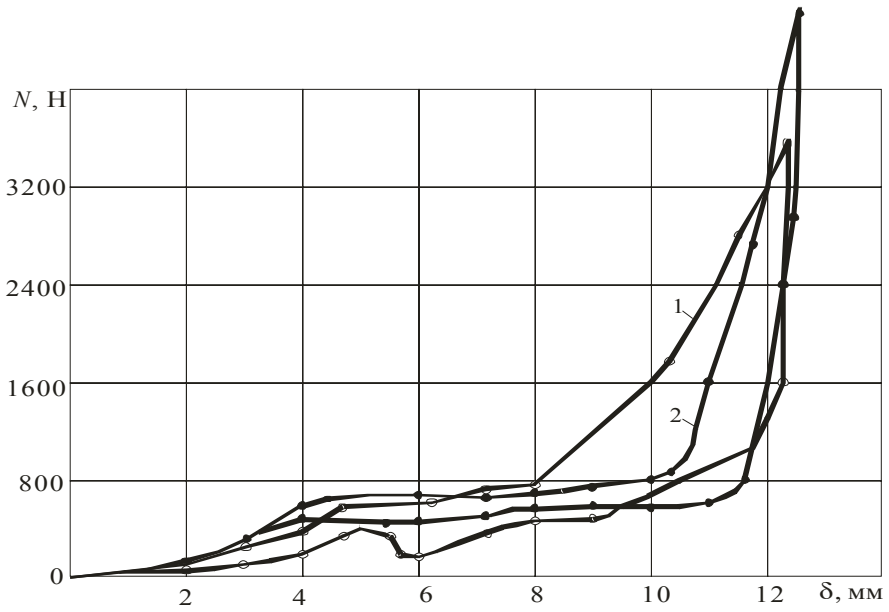


Рис. 14 Деформирование полиуретановых УУ при циклическом нагружении:
1 – с одним центральным блоком сдвоенных тарельчатых пружин;
2 – с двумя разнесенными блоками одинарных тарельчатых пружин

Оценка эффективности полиуретановых УУ проводилась на специально сконструированном стенде [2]. Цель данных испытаний состояла в экспериментальной проверке адекватности используемых математических моделей, а также в сравнении ресурса штатных сальниковых и предлагаемых полимерных уплотнений. Испытания показали, что ресурс новой конструкции УУ в 3,27 раза превышает ресурс сальникового уплотнения.

Заключение

Автоматизация рутинных операций проектирования, выбора и испытаний материалов, идентификации параметров определяющих соотношений, инженерного анализа вариантов конструкций во многом определяет оперативность разработки конкурентоспособной продукции. Данные исследования показали перспективы предложенного метода создания новых и модернизацию существующих УУ различного функционального назначения без необходимости проведения объемных стендовых и полигонных испытаний ИТМ.

Список литературы

1. **Макаров, Г. В.** Уплотнительные устройства / Г. В. Макаров. – Л. : Машиностроение, 1973. – 207 с.
2. **Савицкий, В. Я.** Оценка эффективности замены традиционных узлов трения на полимерные / В. Я. Савицкий и др. // Новые промышленные технологии. – Вып. 4–5. – М. : Минатом, 1999. – С. 65–72.

Савицкий Владимир Яковлевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики,
Пензенский артиллерийский
инженерный институт

Savizkiy Vladimir Jakovlevich
a Dr. Sci. Tech., the professor,
managing chair physicists,
the Penza artillery engineering institute

E-mail: paii08@mail.ru

Сухорукова Ирина Антоновна
преподаватель, кафедра физики,
Пензенский артиллерийский
инженерный институт

Sukhorukova Irina Antonovna
the teacher, chair of physics,
the Penza artillery engineering institute

E-mail: paii08@mail.ru.

Сухоруков Игорь Васильевич
кандидат технических наук,
преподаватель, кафедра № 3,
Пензенский артиллерийский
инженерный институт

Sukhorukov Igor Vasilevich
a Cand.Tech.Sci.,
the teacher, chair № 3,
the Penza artillery engineering institute

E-mail: paii08@mail.ru.

УДК 658.589

Савицкий, В. Я.

Модернизация уплотнительных устройств в рамках *CAE*-технологий / В. Я. Савицкий, И. А. Сухорукова, И. В. Сухоруков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 151–162.

УДК 656.2

Е. А. Ефимова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Аннотация. Проводится анализ имеющихся экспертных систем и транспортных диаграмм, а также рассматривается создание экспертной системы принятия решений по пропускной способности на городской транспортной сети, которая поможет в планировании и реконструкции автомобильных дорог, изменении их конфигурации. Дан анализ существующей транспортной ситуации и подходов к моделированию конкретного участка дороги. Разработан программный продукт, позволяющий упростить процесс корректировки транспортной информации.

Ключевые слова: анализ, имитационная модель, экспертная система, транспортная сеть, программный продукт.

Abstract. The analysis of available expert systems and transport diagrammes is carried out, and also creation of new software product, expert system on throughput decision-making on a city transport network by means of imitating modelling which will help with planning and reconstruction of highways, change of their configuration by means of necessary data such as standard documents, the analysis of an existing situation, etc. is considered., and modelling of a concrete site of the road, also the given software product allows to make changes and to correct the information.

Keywords: the analysis, imitating model, expert system, a transport network, software product.

Введение

Увеличение автомобильного парка в крупных городах приводит к очень высокой плотности транспортного потока, средняя скорость движения транспорта на некоторых магистралях в «час пик» приближается к скорости пешехода, значительно перегружается улично-дорожная сеть. По России количество легковых автомобилей ежегодно увеличивается на 3,8 % и, по прогнозам специалистов, в 2012 г. приблизится к 29 427 958 единицам.

Городские дорожные сети, построенные в 70-х гг. и рассчитанные на меньшую загруженность, перестают справляться с постоянно растущими транспортными потоками, что приводит в крупных и особенно в крупнейших городах к «транспортному параличу» городского движения, главным образом в центральных районах города в «часы пик».

Проблема автомобильных «пробок» охватывает все большее число улиц города, «пробки» увеличиваются по своим размерам, их труднее ликвидировать. Помимо таких негативных последствий, как потеря времени, перерасход топлива, преждевременный износ двигателей, повышенное загрязнение воздуха, «пробки» являются наиболее раздражающим фактором для участников дорожного движения. Одной перенастройкой режима работы светофоров данную проблему решить не удается, поэтому необходимо вносить изменения и в конфигурацию дорожных развязок, принимать решение о строительстве дополнительных автодорог [1].

При проектировании автодорог следует учитывать, что при внесении изменений на одном участке дороги обстановка может ухудшиться на участках, где проблем с прохождением автотранспорта не наблюдалось.

1 Анализ существующих программных средств

Эффективным способом повышения пропускной способности городских дорог является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на базе современных информационных технологий, основным назначением которых является моделирование транспортного потока на городских автомагистралях с целью оптимизации взаиморасположения объектов дорожной и городской инфраструктуры, обеспечивающей ее максимальную пропускную способность как по отдельным участкам, так и по автомагистрали в целом в пределах существующей геометрии дорожно-транспортной сети в условиях роста городского автопарка. В настоящий момент на рынке ПО известны только узконаправленные экспертные системы, которые лишь затрагивают данную область. Приведем несколько примеров.

Экспертная система RoadExpert ориентирована на решение проблем ДТП, произошедших на определенном участке дороги, а Геограком 5W предназначена для определения потребности и уровня обеспеченности населения и экономики региона транспортной сетью и решает задачи в большей степени систем класса ГИС, нежели планирования загруженности автомагистралей.

Расчетно-экспертная система «ТЕНДЕР» предназначена для автоматизации проведения подрядных торгов на дорожно-строительные, проектно-изыскательские и научно-исследовательские работы; а «ГЕОГРАД-1» – для стратегического планирования городского транспорта.

ITS (Intelligence Transport Systems) – системы, обеспечивающие «зеленую волну» на трассе, автоматическое регулирование перекрестков и ликвидацию пробок, «автопилотность» наземного транспорта, диспетчеризацию транспортного процесса, в том числе с использованием GPS. Среди последних для примера можно привести железнодорожные диспетчерские системы Rail 2.0, разработанные НПО «Глобо-центр» (Беларусь), и «Перевозки» фирмы Lester, а также IndorGIS 5.2 – универсальную геоинформационную систему, IndorCAD 5.2 – универсальную систему автоматизированного проектирования инженерных сетей и дорог, ранее известную как ReCAD, IndorDraw 5.2 – систему подготовки чертежей, ранее известную как RoAD.

Все вышеперечисленные системы, как правило, используют для моделирования потоков модифицированные методы (особенно из теории графов), поскольку до сих пор прогноз потоков является главной составляющей инвестиционных транспортных проектов.

Существуют и другие программные продукты, которые включают элементы искусственного интеллекта, мощные СУБД, такие как HDM-4 и TRIPS, они широко используются в комплексных транспортных системах городов.

Предпринимаются попытки компьютеризировать стратегическое планирование (в современном понимании) транспортных потоков. Одной из самых удачных таких попыток является виртуальный коллоквиум «Computer-aided policymaking», где представлены три системы поддержки принятия решений.

Таким образом, анализ существующих программных продуктов показывает необходимость разработки инструментария, позволяющего моделиро-

вать транспортные потоки на городских автомагистралях. Входными данными нового программного инструментария являются результаты поэлементного анализа автомагистрали на основе транспортной диаграммы каждого участка дороги, значения пропускной способности автомагистрали и их пересечений.

В настоящее время пропускная способность дороги является важнейшим критерием, характеризующим качество ее функционирования. Под пропускной способностью понимают максимально возможное число автомобилей, которые могут пройти через данный участок дороги за единицу времени.

Теория транспортных потоков рассматривает движение дискретных объектов по двумерным транспортным сетям, а с учетом многоярусных развязок – и по трехмерным транспортным сетям. Она имеет много общего с теорией систем массового обслуживания и с теорией телетрафика.

Известны три основных свойства транспортного потока, характеризующих его как самостоятельную систему:

– время обслуживания и пребывания машины на дороге как функция скорости движения автомобиля;

– интенсивность движения, характеризующая входной поток, она имеет нелинейную зависимость от плотности машин на дороге и скорости движения; таким образом, поток обслуженных машин нелинейно связан с входным потоком;

– физические размеры транспортных средств и сетей – соизмеримые величины, поэтому в отдельных местах возможно возникновение помех движению и скопление транспорта.

Обобщение математических исследований транспортных потоков были предложены Ф. Хейтом [2].

2 Анализ транспортных диаграмм

По транспортным диаграммам можно составить обширную библиографию, где в качестве примеров назовем работы Крейтона, Уордропа, Форбеса и Гриншилдса (табл. 1).

Здесь случай 2 удовлетворяет условию для потока большой плотности. Каметани и Сасаки рассматривают довольно сложную систему, в которой учитывают характер движения автомобиля. Они ввели уравнение, которое содержит ускорение головного и ведомого автомобилей, а также допускается изменение скорости головного автомобиля. Данное уравнение используется для выведения «показателя безопасности».

В случае 3 выполняется одно из условий для потока малой плотности. В результате Эдай показывает, что уравнения (2) и (3) можно рассматривать совместно. Однако в уравнениях нарушается непрерывность, что соответствует разрыву между свободным движением транспорта и затором.

В случаях 4 и 5 рассматривается движение нескольких параллельных транспортных потоков в одном направлении.

Линейная зависимость скорости группы автомобилей от плотности впервые предложена Гриншилдсом (случай 6).

Вариант 7 базируется на применении экспериментальных данных.

Таблица 1

Анализ транспортных диаграмм

№ случая	Формула интенсивности потока	Автор	Данные	
			Входные	**Выходные**
1	$\rho = C\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda'}\right)$	Пайпс	λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$; C – оптимальная скорость	Зависимость между интенсивностью и плотностью потока при плотном потоке
2	$\rho = C\lambda \log \frac{\lambda'}{\lambda}$	Гейзис/ Кометани и Сасаки	C – оптимальная скорость; λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$, $\lambda = 0$	
3	$\rho = m_0 \lambda e^{-C\lambda}$	Эдай	C – оптимальная длительность промежутка времени между последовательными автомобилями; m_0 – скорость группы автомобилей	Зависимость между интенсивностью и плотностью потока при редком потоке
4	$\rho = \frac{m_0 \lambda \alpha \log \frac{\lambda'}{\lambda}}{\beta \log \frac{\lambda'}{\lambda} + \alpha}$	Гейзис	λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$, $\lambda = 0$; α и β – постоянные величины; m_0 – средняя скорость автомобиля	Средняя скорость бесконечно быстрого автомобиля
5	$\rho = \frac{A\lambda(\lambda' - \lambda)}{B\lambda' + C\lambda}$	Гейзис, Герман, Ротери	A, B, C – постоянные величины; λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$, $\lambda = 0$	
6	$\rho = \lambda m_0 \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda'}\right)$	Гриншилдс	λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$, $\lambda = 0$; m_0 – средняя скорость автомобиля	Линейное соотношение между средней скоростью и плотностью потока (теоретически)
7	$\rho = \frac{\lambda m_0 \sqrt{(\lambda' - \lambda)}}{A m_0 + \sqrt{(\lambda' - \lambda)}}$	Герин и Пальмер	λ – плотность потока при $\lambda = \lambda'$, $\lambda = 0$; m_0 – средняя скорость автомобиля; A – постоянная величина	Линейное соотношение между средней скоростью и плотностью потока (опытном путем)

Интенсивность потока должна удовлетворять простым граничным условиям:

1) $\rho = 0$ для $\lambda = 0$ – автомобиль может иметь скорость свободного движения лишь при отсутствии транспортного потока;

2) $\rho = 0$ для $\lambda = \lambda'$ – в случае затора автомобиль останавливается;

3) $m = 0$ при $\lambda = \lambda'$ – возможность при желании остановить автомобиль;

4) $m = m_0$ при $\lambda = 0$ – скорость автомобиля равна скорости группы автомобилей при отсутствии транспортного потока;

5) $\lambda = 0$ абсолютно свободная дорога, где средняя скорость выражается в виде предела $\lim\limits_{\lambda \to 0} m(\lambda) = m_0$.

Из табл. 1 следует, что случаи 1, 2, 4, 6 не содержат понятия пропускной способности, случай 3 может соответствовать понятию пропускной способности, а случаи 5 и 7 соответствуют определению пропускной способности. Также по табл. 1 можно определить выполнение граничных условий: в случае 1, 2 не выполняется ни одно граничное условие. Рассматривая случай 3, можно сказать, что условия 1–4 не выполняются, а 5 – частично, в случае 4 выполняются условия 1–4, а в случае 5 граничное условие не выполняется. Более полно выполняются все граничные условия в случае 7, а в случаях 5 и 6 выполняются условия 1–4, но зато 5 выполняется частично.

Для достижения максимальной точности получаемого результата при прогнозировании ситуаций на автомагистралях генерируемый трафик должен адекватно описывать взаимодействия интенсивности и плотности автомобильного потока, времени восстановления движения как функции средней скорости движения по отдельным участкам и по всей автомагистрали в целом. С этой целью проводится поэлементный анализ автомагистрали с использованием основной транспортной диаграммы каждого участка дороги, на основе которого выделяются дорожные участки с минимальной пропускной способностью. Теоретически устанавливается их максимально возможная величина пропускной способности, и по критерию min max (по минимальному значению максимально возможной величины пропускной способности из всего множества всех элементов дороги) проводится оптимизация взаиморасположения объектов дорожной и городской инфраструктуры, обеспечивающей согласованную пропускную способность по всей автомагистрали в целом.

Автором предложена математическая модель трафика, описывающая основную транспортную диаграмму и время восстановления движения, как функции средней скорости, так и ее изменений. Математическая модель, опирающаяся на аналитические результаты, позволяет оптимизировать систему в отличие от имитационной модели, которая проигрывает ситуацию.

Чтобы учесть конечные размеры машины и связать их со временем обслуживания автомобиля дорогой, введем δ участок дороги, который представляет собой прямую линию, перпендикулярную движению транспорта.

Автомобиль, двигаясь со скорость v, будет занимать δ участок дороги в течение времени

$$\Theta = l / v, \tag{1}$$

где l – длина машины.

Таким образом, длительность промежутка времени Θ будет представлять собой время обслуживания автомобиля δ участком дороги, или в более общей форме соотношение (1) можно записать через интеграл свертки в виде

$$\Theta = \frac{\int\limits_0^{\infty} \delta(x - l) L(x) dx}{v}, \tag{2}$$

где $L(x)$ – функция, описывающая длину автомобиля, например, имеющая прямоугольную форму: $L(x) = 1$, если $0 < x < l$, и $L(x) = 0$ – для остальных x. Если автомобиль движется с постоянной скоростью по участку дороги длиной $L_{уч}$, то время нахождения машины на указанном участке или время обслуживания автомобиля данным участком дороги будет определяться композицией трех функций:

$$\Theta_{L_{уч}} = \frac{\int_0^\infty \delta(x-u) \int_0^\infty L_{уч}(z-u)L(z)dzdx}{v}, \tag{3}$$

которая для $L_{уч}(x) = 1$, если $0 < x < L_{уч}$, и $L(x) = 0$, для остальных x она дает следующее соотношение:

$$\Theta_{L_{уч}} = \frac{L_{уч} + 2l}{v}. \tag{4}$$

Полученное выражение показывает, что обслуживание машины дорогой начинается с момента въезда переднего бампера на указанный участок и заканчивается, как только задний бампер машины покинет его.

Введем следующие характеристики потока машин: τ_i – длительность промежутка времени между последовательными автомобилями, которая характеризует интервал – $\tau_i v$ – между задним бампером i машины и передним бампером $i + 1$ машины. Тогда величина $T_i = \tau_i + \Theta_i$ будет характеризовать мгновенное значение периода следования машин, а произведение $T_i v = 1$ ин. расстояние между последовательными автомобилями. Согласно определениям, приведенным в [1], при синхронном счете плотность автомобилей на дороге λ и интенсивность потока ρ записываются в следующей форме:

$$\lambda = \frac{\Delta N}{\Delta t}, \qquad \rho = \frac{\Delta N}{\Delta x}, \tag{5}$$

здесь ΔN – число машин, проехавших мимо наблюдателя за время Δt, а Δx – длина дороги, на которой, например методами точной аэрофотосъемки, зарегистрировано ΔN автомобилей. Хотя число машин – это дискретная величина, однако если наблюдается фиксированное число машин за промежуток времени Δt или на длине дороги Δx, которые могут непрерывно изменяться в зависимости от условий движения, то функциональные соотношения (5) обладают свойством непрерывности. Тогда, возвращаясь к первому соотношению (5), умножив и разделив его правую часть на Δx, получим

$$\lambda = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t}\frac{\Delta x}{\Delta x} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\frac{\Delta N}{\Delta x} = v\frac{\Delta N}{\Delta x} = v \cdot \rho. \tag{6}$$

В общем случае, скорости машин являются функцией времени. Воспользовавшись свойством непрерывности, продифференцируем соотношение

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dv}{dt}\rho + v\frac{d\rho}{dt} = \frac{dv}{dt}\rho + v\frac{d\rho}{dx}\frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dt}\rho + v^2\frac{d\rho}{dx} \tag{7}$$

или, используя соотношения (5), получим

$$\frac{d^2N}{dt^2} = \frac{dv}{dt}\frac{dN}{dx} + v^2\frac{d^2N}{dx^2} \tag{8}$$

со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{dN}{dt} = 0 \text{ при } v = 0, \\ \rho &= \frac{dN}{dx} = \frac{1}{l} \text{ при } v = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

и с начальными условиями при $t_{\text{нач}} = 0$, $v = v_{\text{нач}}$ и при $t = t_{\text{кон}}$, $v = v_{\text{кон}}$, которые подробнее будут рассматриваться ниже.

Обращаясь к граничным условиям, необходимо отметить, что из трех величин λ, v и ρ теоретически только ρ имеет максимальное значение. Этим значением можно считать величину, обратную длине автомобиля, поскольку превышение данного значения уже описывает аварийную ситуацию – одна машина въехала в другую. В действительности можно наблюдать некоторые максимальные значения параметров λ и v, однако, с теоретической точки зрения, не имеет смысла устанавливать какой-либо абсолютный верхний предел интенсивности потока или скорости движения. Решение полученного уравнения (8), представляющего собой квазиволновое уравнение, составляет определенные трудности. Здесь для решения данного уравнения используем асимптотические методы: решим уравнение (8) в области низких и предельных значений плотности автомобильного потока, а затем, используя двухточечную аппроксимацию Паде, срастим предельные выражения для получения общего решения.

В области малых значений для плотности автомобильного потока, когда расстояния между автомобилями велики, L превышает 1, если изменения плотности существенно меньше самой величины, т.е. $\rho > \frac{d\rho}{dx}$. Интегрируя уравнение $\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dv}{dt}\cdot\rho$ при граничных условиях $\lambda = 0$ при $v = 0$, получим следующее решение – $\lambda = v\cdot\rho$. Таким образом, для малых значений плотности транспортного потока интенсивность движения линейно связана с плотностью и образует семейство прямых, параметрически зависящих от скорости. Для другой предельной области плотность автомобильного потока может увеличиваться и приближаться к его предельным значениям только при снижении скоростей автомобилей. Если машины начинают тормозить с постоянным ускорением a, то с течением времени расстояние между машинами начинает уменьшаться, а средняя плотность машин на дороге начнет возрастать по следующему закону: $\rho = \frac{1}{l + \frac{a(\tau - t)^2}{2}}$. При втором граничном условии (9) найдем следующее выражение для интенсивности потока машин в зависимости от времени и параметров изменения скорости:

$$\lambda(t)=\frac{dN}{dt}=\int\frac{d^2N}{dt^2}dt=\int\left\{\frac{-2a}{2l+a(\tau-t)^2}-\frac{4a^2(\tau-t)^2}{\left[2l+a(\tau-t)^2\right]^2}\right\}dt=$$

$$=-2\frac{(\tau-t)}{2l+a(\tau-t)^2}+2a\sqrt{\frac{2}{l\cdot a}}\operatorname{arctg}\left[\frac{1}{2}a(\tau-t)\sqrt{\frac{2}{l\cdot a}}\right].$$

Далее используем технику двухточечной аппроксимации Паде, которая описывает, при заданных условиях движения, основную транспортную диаграмму, и получаем аппроксимирующие решения:

$$\lambda[v,a,\rho]=\frac{v\rho}{2,09\sqrt{a}-4,24\sqrt{a}\cdot\left(\frac{1}{\frac{1}{\rho}-4,5}\right)^{\frac{1}{2}}+10,61\sqrt{a}\cdot\left(\frac{1}{\frac{1}{\rho}-4,5}\right)^{\frac{3}{2}}}. \qquad (10)$$

Анализ показывает, что максимальная интенсивность потока машин при средней скорости их движения v = 60 км/ч равна $\lambda_{\max}=4,5$ маш./мин, при этом среднее расстояние между машинами составляет 9,1 м, а средний промежуток между ними (от заднего бампера ведущей машины до переднего бампера следующей машины) равен 4,6 м. При средней скорости потока, равной 45 км/ч, максимальная интенсивность потока машин составляет 6 маш./мин и при v = 24км/ч $\lambda_{\max}=15,6$ маш./мин, соответственно. Полученные значения можно использовать для анализа условий возникновения на дороге предзаторовых и заторовых ситуаций.

В предложенной математической модели, где основные характеристики транспортного потока рассматриваются как меняющиеся величины в процессе движения (интенсивность и плотность потока, средняя скорость движения в зависимости от дорожных условий и дорожной и городской инфраструктуры), появилось ускорение, т.к. в процессе движения происходит либо ускорение, либо торможение.

Заключение

Таким образом, получена транспортная диаграмма, необходимая для схемы организации движения. На основании транспортной диаграммы можно сформулировать правила для принятия управляющих и регулирующих решений к экспертной системе по повышению пропускной способности городской транспортной сети. А также появляется возможность получать точные объективные показатели загруженности той или иной магистрали, графики суточных и сезонных пиков и спадов движения транспорта. Эта информация поможет при разработке ИТС дорожно-транспортной сети города.

В ходе исследований транспортного потока была разработана система для автоматизированного контроля и анализа предзаторовых ситуаций транспортных потоков на каждой из полос движения и выдачи предупреждающих сигналов о возможном развитии автомобильных заторов. Система состоит из

радиолокационных сенсоров, расположенных над каждой из полос движения, и блока регистрации и управления, который содержит устройство определения скорости движения транспортного средства (ТС), устройство классификации объема ТС, а также устройство анализа предзаторовых ситуаций. Анализ предзаторовых ситуаций базируется на полученной математической модели транспортного потока.

Список литературы

1. **Кременец, Ю. А.** Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М. : Академкнига, 2005.
2. **Хейт, Ф.** Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – М. : Мир, 1966.
3. **Ефимова, Е. А.** Контроль и анализ предзаторовых ситуаций транспортных потоков / Е. А. Ефимова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – № 9 (35). – С. 82–84.
4. **Холодов, Ю. В.** Анализ развития автомобильного затора с использованием основной транспортной диаграммы / Ю. В. Холодов, Е. А. Ефимова // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности : сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции (18–20 апреля 2007 г.). – Астрахань, 2007. – С. 66–72.

Ефимова Евгения Аркадьевна
ассистент,
кафедра управления качеством,
Астраханский государственный университет

Efimova Evgenia Arkadevna
the assistant,
chair quality management,
the Astrakhan state university

E-mail: kachestvo@aspu.ru

УДК 656.2

Ефимова, Е. А.

Сравнительный анализ создания имитационной модели пропускной способности городской транспортной сети / Е. А. Ефимова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 163–171.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья обязательно должна сопровождаться индексом УДК, а также краткой аннотацией.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными надписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версия 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования необходимо соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Номер источника указывается в квадратных скобках. В списке указывается:

- для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц;
- для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, выпуск, страницы;
- для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, страницы.

В конце статьи допускается указание наименования программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

К материалам статьи должна прилагаться информация для заполнения учетного листа автора: фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Рукопись, полученная редакцией, не возвращается.

Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- ***информатика***
- ***вычислительная техника***
- ***управление***
- ***электроника***
- ***измерительная техника***
- ***радиотехника***
- ***машиностроение***
- ***машиноведение***

Стоимость одного номера журнала – 250 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 56-34-96, тел.: 36-82-06, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на второе полугодие 2009 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы» тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

– –

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2009 г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное)_____

_____

ИНН _____ КПП_____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область_____

Город (населенный пункт)_____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность_____

Тел. _____ Факс _____ E-mail_____

Руководитель предприятия _____ _____

(подпись) (ФИО)

Дата «____» _____ 2009 г.