ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 3 (39) 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Макарычев П. П., Артамонов Д. В. Модельные представления данных на основе прямого тензорного исчисления 3

Косников Ю. Н., Хоанг Тхай Хо Моделирование объектов интерфейса виртуального окружения для эргатических систем 16

Федюнин Р. Н. Блок арифметико-логического устройства для реализации умножения больших чисел 29

Андреева Т. В., Кузнецова М. В. Методика оценивания качества научно-исследовательских работ и инновационных проектов студентов на основе нечетких множеств 41

Тычков А. Ю. Применение технологии виртуального проектирования для разработки медицинских диагностических систем 53

Мартяшин Г. В., Тархов К. Ю., Калачев А. В., Бальзанникова Е. А., Пащенко Д. В. Формальное описание алгоритма декомпозиции сложных систем на основе сетей Петри с использованием тензорной методологии 62

Коннов Н. Н., Семенов А. О. Стохастический подход к диспетчеризации очередей в коммутаторах 72

Евсеева Ю. И., Бождай А. С. Метод структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды 84

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Ашанин С. Е., Федотов В. Н., Федотов А. В. Алгоритмизация обработки тепловизионного изображения мобильного объекта в системе слежения 93

Кикот В. В., Маланин В. П., Щербаков М. А. Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара 105

Геращенко М. С., Волкова Н. А., Геращенко С. М. Использование гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров с повышенной точностью 114

UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION

ENGINEERING SCIENCES

№ 3 (39) 2016

CONTENT

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Makarychev P. P., Artamonov D. V. Model-based presentations of data on the basis of direct tensor calculus 3

Kosnikov Yu. N., Khoang Tkhay Kho Modeling of virtual environment interface objects for ergatic systems 16

Fedyunin R. N. Arithmetic logic modules for multiplication of large numbers 29

Andreeva T. V., Kuznetsova M. V. Quality evaluation technique for students' scientific research and innovative projects based on fuzzy sets 41

Tychkov A. Yu. Application of virtual design technologies for the development of medical diagnostic systems 53

Martyashin G. V., Tarkhov K. Yu., Kalachev A. V., Bal'zannikova E. A., Pashchenko D. V. A formal description of a decomposition algorithm for complex systems based on petri nets using tensor methods 62

Konnov N. N., Semenov A. O. A stochastic approach to switch queue dispatching 72

Evseeva Yu. I., Bozhday A. C. The method of structural and parametric synthesis of adaptive software components of the virtual learning environment 84

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

Ashanin S. E., Fedotov V. N., Fedotov A. V. Algorithmization of mobile object's thermal image processing in a tracking system 93

Kikot V. V., Malanin V. P., Shcherbakov M. A. Correction of a temperature error of a piezoelectric dynamic pressure sensor under thermal shock 105

Gerashchenko M. S., Volkova N. A., Gerashchenko S. M. Using a hydro-cuff tonometer for evaluation of hemodynamic parameters with enhanced precision 114

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-1

П. П. Макарычев, Д. В. Артамонов

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ТЕНЗОРНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. В информационных системах анализ данных, как правило, выполняется с точки зрения множественности измерений. Концептуально модельные представления строятся на основе таких понятий, как объект, класс, отношение. Для формализованного описания данных используются матричное исчисление, алгебра кортежей, тензорное исчисление.

Материалы и методы. Данные могут быть представлены в виде обобщенной тензорной модели, которая может интерпретироваться в различные предметные области.

Результаты. Разработана модель представления классов, объектов и отношений в предметном пространстве информационной системы. Модель отличается прямой тензорной формой записи отношений, арифметических и логических операций. Классы (объекты) предметного пространства задаются в виде диад, характеризующих предметное пространство. Предметные пространства «Звезда», «Снежинка» и «Созвездие» задаются в виде тензоров второго порядка – неупорядоченной совокупности диад, ассоциированных с классами. Разработано тензорное представление запросов к реляционным структурам данных, арифметических и логических операций. Рассмотрены процедуры обработки и анализа данных. Приведен пример реализации кластерного анализа данных.

Выводы. Предложено тензорное модельное представление реляционных структур данных. Представление обеспечивает формализованное описание простых и сложных запросов к базам данных, арифметических и логических операций, процедур обработки и анализа данных.

Ключевые слова: модель данных, тензорное исчисление, диада, инвариант, тензорси соотношения, тензорси предиката.

P. P. Makarychev, D. V. Artamonov

MODEL-BASED PRESENTATIONS OF DATA ON THE BASIS OF DIRECT TENSOR CALCULUS

Abstract.

Background. In information systems, data analyses are usually performed from the point of view of the plurality of measurements. Conceptual model representations are based on concepts such as an object, a class, a relation. For a formalized description of data one uses matrix calculus, algebra of tuples and tensor calculus.

Materials and methods. Data can be presented in the form of a generalized tensor model, which may be interpreted in different subject areas.

Results. The authors developed a model of representation of classes, objects and relationships of the subject space of information systems. The model has a direct tensor notation of relations, arithmetic and logical operations. Classes (objects) of the subject space are defined in the form of dyads that characterize the object space. The subject spaces "Star", "Snowflake" and "Constellation" are specified in the form of tensors of the second order – disordered aggregate dyads associated with the classes. The researchers developed a tensor representation of queries in relational data structures, arithmetic and logical operations, reviewed procedures for data processing and analysis, and described an example of cluster analysis implementation.

Conclusions. The authors have suggested the tensor model representation of relational data structures. The representation provides formalized description of simple and complicated queries to databases, arithmetic and logical operations, procedures of data processing and analysis.

Key words: data model, tensor calculus**,** dyad, invariant, tensors ratio, tensors predicate.

Введение

Как известно, тензорное исчисление представляет собой математическое средство, с помощью которого формулируются инвариантные соотношения между величинами изучаемых объектов. В теории информационных систем признание принципа инвариантности означает, что объекты существуют независимо от субъективных систем координат (измерений) предметного пространства, заданных наблюдателем [1, 2]. В современном тензорном исчислении используются три формы записи соотношений: координатная (арифметическая, индексная), матричная и безындексная (прямая). При координатной форме тензор представляется в виде набора чисел $T_{\gamma\ldots\delta}^{\alpha\ldots\beta}$, в котором индексы $\alpha\ldots\delta$ пробегают значения от 1 до $n \geq 1$. Эта форма очень практична и широко распространена [2]. При бескоординатной форме описания тензора индексы не пробегают целочисленные значения, а рассматриваются как метки, несущие информацию о типе тензора и возможных операциях над тензором [3]. Матричное представление предполагает соблюдение соответствия между размерностью матрицы и рангом тензора, между строками, столбцами и индексами [4].

Все три формы практически равнозначны. Однако матрицы сами по себе не соответствуют структурам данных информационных систем, представленным в виде сущностей реляционных баз данных. Безындексная форма концептуально более предпочтительна в том смысле, что тензоры естественно рассматривать не как наборы чисел, а как некоторые линейные отображения. Безындексная форма представления тензоров обеспечивает несложное преобразование к индексной и матричной формам представления. В данной работе приводится обоснование применимости безындексной формы записи тензорных модельных представлений данных, алгебраических и логических операций.

Тензорное представление предметного пространства

На рис. 1 приведена структура обобщенной реляционной модели данных «Снежинка» (хранилища данных), содержащая измерения и факты [5].

В качестве измерений модель содержит сущности (классы): «Кафедра», «Факультет», «Научный Руководитель», «Научная Специальность», «Аспирант» и «Показатель». Сущность «Запись» содержит факты о деятельности аспирантов. Каждый экземпляр сущности соответствует записи оценки деятельности аспиранта по одному из показателей. Факт фиксируется с указанием номера записи n и времени выполнения записи t. Линии связи между сущностями отражают функциональные зависимости между ключевыми атрибутами сущностей $(n,t) \to h, p;\ h \to r, s;\ r \to k, d$.

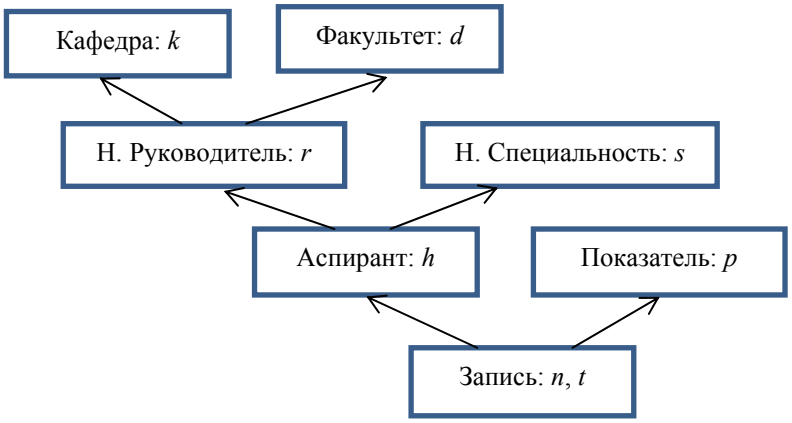


Рис. 1. Структура модели данных «Снежинка»

Для построения тензорного модельного представления расположим и зафиксируем классы предметного пространства в следующей последовательности: $A = (h, p, r, s, k, d, (n,t)) = (h, p, r, s, k, d, z)$.

Предположим, что $\mathbf{h}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, ..., \mathbf{z}$ и $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, ..., \mathbf{e}_7$ являются тензорами первого ранга (векторами), характеризующими классы и отношения классов предметного пространства информационной системы. Размерности векторов равны. Векторы-столбцы $\mathbf{h}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, ..., \mathbf{z}$ пространства T_1 характеризуют функциональные отношения между классами, а векторы-строки $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, ..., \mathbf{e}_7$ пространства T_2 – отношение заданного порядка в последовательности A. В этом случае для сущностей измерений $\mathbf{h}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, ..., \mathbf{d}$ и сущности фактов $\mathbf{z}$ рассматриваемого предметного пространства тензоры первого ранга имеют вид (рис. 1):

$$\mathbf{h}^{\mathrm{T}} = (m_{11}\ \ 0\ \ m_{31}\ \ m_{41}\ \ 0\ \ 0\ \ 0);\ \mathbf{e}_1 = (n_1\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0);$$

$$\mathbf{p}^{\mathrm{T}} = (0\ \ m_{22}\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0);\ \mathbf{e}_2 = (0\ \ n_2\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0);$$

$$\mathbf{r}^{\mathrm{T}} = (0\ \ 0\ \ m_{33}\ \ 0\ \ m_{53}\ \ m_{63}\ \ 0);\ \mathbf{e}_3 = (0\ \ 0\ \ n_3\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0);$$

$$\mathbf{s}^{\mathrm{T}} = (0\ \ 0\ \ 0\ \ m_{44}\ \ 0\ \ 0\ \ 0);\ \mathbf{e}_4 = (0\ \ 0\ \ 0\ \ n_4\ \ 0\ \ 0\ \ 0);$$

$$\mathbf{k}^{\mathrm{T}} = (0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ m_{55}\ \ 0\ \ 0),\ \ \mathbf{e}_5 = (0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ n_5\ \ 0\ \ 0);$$

$$\mathbf{d}^{\mathrm{T}} = (0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ m_{66}\ \ 0),\ \ \mathbf{e}_6 = (0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ n_6\ \ 0);$$

$$\mathbf{z}^{\mathrm{T}} = (m_{17} \quad m_{27} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad m_{77});\ \mathbf{e}_7 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad n_7). \quad (1)$$

Значение каждого элемента $m_{ii}, i = 1,2,...,7,$ вектора пространства T_1 равно количеству байт, необходимых для регистрации атрибутов экземпляра сущности (объекта класса). Значения элементов $m_{ij}, i \neq j, \quad i = 1,2,...,7,$ $j = 1,2,...,7,$ векторов пространства T_1 равны количеству байт, необходимых для регистрации внешних ключей сущностей модели данных. Векторы пространства T_2 содержат элементы n_j, $j = 1,2,...,7$, значения которых определяются количеством экземпляров сущностей (объектов класса). Каждую упорядоченную пару векторов ($\mathbf{h} \otimes \mathbf{e}_1, \mathbf{p} \otimes \mathbf{e}_2, ..., \mathbf{z} \otimes \mathbf{e}_7$) из пространств T_1, T_2 можно рассматривать как единое целое (диаду векторов), представляющее собой элемент множества прямого декартового произведения двух векторных пространств [1]. Например, для сущности «Научный Руководитель» диада имеет следующий вид:

$$\mathbf{r} \otimes \mathbf{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_{33} \\ 0 \\ m_{53} \\ m_{63} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33}n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{53}n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{63}n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $m_{33}n_3$ – количество байт в записи данных о научном руководителе, $m_{53}n_3$, $m_{63}n_3$ – количество байт, содержащихся в записях внешних ключей.

При этом предметное пространство может быть определено как тензор второго ранга, заданный суммой диад:

$$\mathbf{V} = \mathbf{h} \otimes \mathbf{e}_1 + \mathbf{p} \otimes \mathbf{e}_2 + \mathbf{r} \otimes \mathbf{e}_3 + ... + \mathbf{z} \otimes \mathbf{e}_7. \quad (2)$$

Таким образом, тензор $\mathbf{V}$ является конечной неупорядоченной совокупностью упорядоченных пар тензоров первого ранга. След каждой диады в (2) равен скалярному произведению тензоров первого ранга:

$$\mathrm{tr}(\mathbf{a} \otimes \mathbf{e}_i) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{e}_i,\ \mathbf{a} \in \{\mathbf{h}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, ..., \mathbf{z}\},\ i = 1,2,...,7,$$

составляющих диаду.

Для модели данных, представленной на рис. 1, тензор второго ранга, характеризующий предметное пространство в матричной форме, имеет вид

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} m_{11}n_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{17}n_7 \\ 0 & m_{22}n_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{27}n_7 \\ m_{31}n_1 & 0 & m_{33}n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{41}n_1 & 0 & 0 & m_{44}n_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{53}n_3 & 0 & m_{55}n_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{63}n_3 & 0 & 0 & m_{66}n_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{77}n_7 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, след тензора второго ранга определяется формулой

$$\mathrm{tr}(\mathbf{V}) = \mathrm{tr}(\mathbf{h}\cdot\mathbf{e}_1 + \mathbf{p}\cdot\mathbf{e}_2 + \mathbf{r}\cdot\mathbf{e}_3 + ... + \mathbf{z}\cdot\mathbf{e}_7) = \sum_i^7 m_{ii}n_i.$$

Эта важная характеристика тензора второго ранга является одним из инвариантов и обладает следующим свойством: $\mathrm{tr}(\mathbf{V}) = \mathrm{tr}(\mathbf{V}^{\mathrm{T}})$.

Пусть определен второй вариант предметного пространства типа «Звезда» с тем же набором объектов (сущностей). Данное пространство имеет такую же размерность, но число уровней иерархии равно двум [5]. Для этого пространства тензор имеет вид

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} m_{11}n_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{17}n_7 \\ 0 & m_{22}n_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{27}n_7 \\ m_{31}n_1 & 0 & m_{33}n_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{41}n_1 & 0 & 0 & m_{44}n_4 & 0 & 0 & 0 \\ m_{51}n_1 & 0 & 0 & 0 & m_{55}n_5 & 0 & 0 \\ m_{61}n_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{66}n_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{77}n_7 \end{bmatrix}.$$

Предположим, что для тензора второго ранга $\mathbf{V}$ определитель $\det\mathbf{V} \neq 0$ и имеется обратный тензор $\mathbf{V}^{-1}$ такой, что $\mathbf{V}^{-1}\cdot\mathbf{V} = \mathbf{V}\cdot\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{E}$. В этом случае, используя скалярное произведение двух тензоров, можно определить тензор преобразования предметных пространств. Например:

$$\mathbf{N} = \mathbf{W}\cdot\mathbf{V}^{-1}.$$

При этом скалярное произведение тензора второго ранга $\mathbf{N}$ на тензор первого ранга представляет собой линейное преобразование объектов одного пространства в объекты другого пространства. Это линейное преобразование осуществляется следующим образом:

$$\mathbf{b} = \mathbf{N}\cdot\mathbf{a}, \tag{3}$$

где $\mathbf{a} \in \{\mathbf{h}, \mathbf{p}, \mathbf{r}, ..., \mathbf{z}\}$, $\mathbf{b} \in \{\mathbf{h}^*, \mathbf{p}^*, \mathbf{r}^*, ..., \mathbf{z}^*\}$.

Рассмотренный выше подход к заданию тензорного модельного представления данных можно использовать при анализе различных информационных и технических систем. Введенные в рассмотрение тензоры второго ранга $\mathbf{V}, \mathbf{W}$ характеризуют не только структуру предметного пространства информационной системы. Одновременно тензоры $\mathbf{V}, \mathbf{W}$ содержат компоненты количественных характеристик: общее число экземпляров в одной сущности (количество строк в таблице), объем хранимых данных (атрибутов, байт, бит) в одном экземпляре сущности (строке таблицы). Например, пусть диада $\mathbf{r}\otimes\mathbf{e}_3$ образована из тензоров следующего вида:

$$\mathbf{r}^{\mathrm{T}} = (0 \quad 0 \quad m_{33} \quad 0 \quad m_{53} \quad m_{63} \quad 0) \quad \mathbf{e}_3 = (0 \quad 0 \quad n_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0),$$

где $m_{33} = 233, m_{53} = 10, m_{63} = 10, n_3 = 17$.

Очевидно, что след диады имеет вид

$$tr(\mathbf{r} \otimes \mathbf{e}_3) = m_{3,3} n_3 = 3961 \text{ байт}$$

и общий объем данных, соответствующий в структуре данных сущности «Научный Руководитель» (см. рис. 1), равен

$$Q_r = \sum_{j=1}^{7} (r \otimes e_3)_{j,3} = m_{3,3} n_3 + m_{5,3} n_3 + m_{6,3} n_3 = 4301 \text{ байт.}$$

Аналогично можно определить и объемы данных для остальных шести диад (объектов) модели данных «Снежинка». В результате получим общий объем данных в структуре предметного пространства «Снежинка»:

$$Q_V = \sum_{i}^{7} \sum_{j}^{7} V_{i,j} = \sum_{i}^{7} \sum_{j}^{7} m_{i,j} n_j = 5.521 \cdot 10^4 \text{ байт.} \quad (4)$$

При этом объем хранимых данных в структуре предметного пространства «Звезда» составит

$$Q_W = \sum_{i}^{7} \sum_{j=1}^{7} W_{i,j} = \sum_{i}^{7} \sum_{j=1}^{7} m_{i,j} n_j = 5.663 \cdot 10^4 \text{ байт}. \quad (5)$$

Из выражений (4), (5) видно, что объем данных, хранимых в структуре «Звезда», увеличился.

Тензорное модельное представление объектов

Каждую сущность предметного пространства можно представить в виде суммы диад. Например, для сущности «Аспирант» сумма диад

$$\mathrm{q}_h^{r,s} = h \otimes e_1 + r \otimes e_3 + s \otimes e_4,$$

где q – символ сущности; h, r, s – метки, отражающие элементы диад, значения которых могут быть отличны от нуля.

Таким образом, предметное пространство, соответствующее модели данных «Снежинка», как тензор второго ранга $\mathbf{V}$, может быть задано неупорядоченной последовательностью сумм диад:

$$\mathbf{V} = \mathbf{q}_h^{r,s} + \mathbf{q}_p + \mathbf{q}_r^{k,d} + \mathbf{q}_s + \mathbf{q}_k + \mathbf{q}_d + \mathbf{q}_z^{a,p}. \quad (6)$$

В выражении (4) верхние и нижние символы в неупорядоченной последовательности диад не являются индексами. Это метки, которые определяют структуры диад и возможные действия с диадами. Нижние метки соответствуют первичным ключам сущностей, верхние – внешним ключам сущностей. В результате выполнения операции преобразования $\mathbf{N}$ линейного предметного пространства (6) имеем

$$\mathbf{W} = \mathbf{N}\mathbf{V} = \mathbf{q}_h^{r,s,k,d} + \mathbf{q}_p + \mathbf{q}_r + \mathbf{q}_s + \mathbf{q}_k + \mathbf{q}_d + \mathbf{q}_z^{h,p}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что линейное преобразование **N** связано с уменьшением уровней иерархии за счет операции денормализации применительно к сущности «Аспирант», представленной в выражении (7) суммой из 5 диад $q_h^{r,s,k,d}$ (рис. 2).

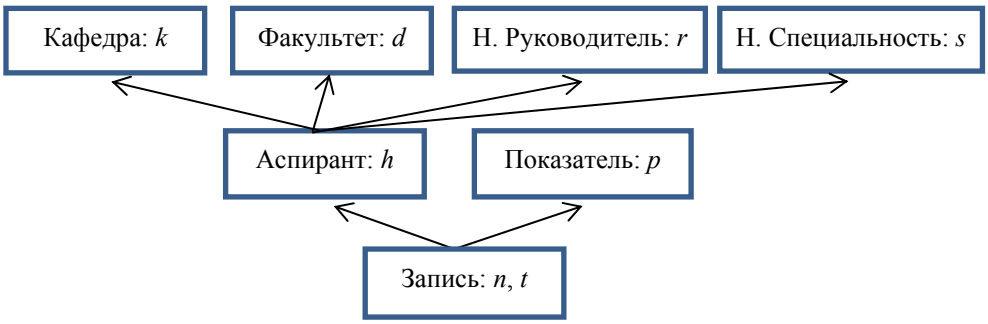


Рис. 2. Структура модели данных

Рассмотрим применение тензорного исчисления при разработке модельного представления и анализа данных на уровне сущностей. Если воспользоваться понятием тензорси (3), то класс объектов «Аспирант» можно представить в виде функциональных графиков. При этом представлении классов (сущностей) определяется закон формирования функциональных графиков $\langle h,r\rangle$ и $\langle h,s\rangle$ из множеств H,R,S, где H – множество аспирантов (экземпляров сущности), R – множество руководителей, S – множество научных специальностей. Согласно этому подходу графики q_h^r, q_h^s, соответствующие суммам диад, не содержат пар с одинаковыми нижними и различными верхними метками. В этом представлении сумму диад $q_h^{r,s}$ можно рассматривать как объединение двух функциональных графиков $q_h^{r,s} = q_h^r \cup q_h^s$, сумму диад $q_a^{r,s,k,d}$ – четырем функциональным графикам.

При проектировании модели данных содержание каждой диады должно быть раскрыто как можно более полно. Например, для сущности «Кафедра» из рассматриваемой модели данных диада $\mathbf{q}_k = \mathbf{k} \otimes \mathbf{e}_1$ может быть суммирована с диадами, отражающими функциональную зависимость неключевых атрибутов от первичного ключа $\langle k,a_1\rangle,\langle k,a_2\rangle,...,\langle k,a_m\rangle$:

$$\mathbf{q}_k^{a_1,a_2,...,a_m} = \mathbf{k} \otimes \mathbf{e}_1 + \mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{e}_2 + \mathbf{a}_2 \otimes \mathbf{e}_3 + ... + \mathbf{a}_m \otimes \mathbf{e}_{m+1},$$

где $\mathbf{k}$ – вектор первичного ключа; $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, ..., \mathbf{a}_m$ – векторы неключевых атрибутов сущности.

Следует отметить, что математический объект $\mathbf{q}_k^{a_1,a_2,...,a_m}$ в алгебре кортежей рассматривается как *C*-кортеж, представляющий собой множество элементарных кортежей $[k,a_1,a_2,...,a_m]$ одной и той же размерности или

многоместное отношение [5]. На основе элементарных кортежей и C-кортежей в алгебре кортежей вводятся и другие структуры данных и операции: операций алгебры множеств, операции с атрибутами, включая перестановку атрибутов, добавление фиктивного атрибута и элиминацию атрибута. Аналогичные операции могут быть осуществлены и использованием тензорного представления структур данных.

Таким образом, сущность в модели данных можно рассматривать как сумму диад или кортеж функциональных графиков:

$$q_r^{k,d}(a_r^1, a_r^2, ..., a_r^m) = q_r^{k,d} \cup q_r^{a_1, a_2, ..., a_m} = q_r^{k,d,a_1 \cdot a_2, ..., a_m}.$$

В выражениях (6), (7) возможные типы атрибутов: Int (Целое число), Real (Действительное число), Date (формат MM/DD/YY), Text (Строка), List (Список значений, разделенных запятой), Command (Команда – выполняемая строка).

Над диадами можно осуществлять преобразования, описываемые тензорси соотношений и тензорси предикатов [3]. Например, операцию сложения значений атрибутов $b = a_1 + a_2$ можно представить как тензорси $g1^b_{a_1,a_2} = \left(+^b_{a_1,a_2}\right)$, а операцию умножения значений атрибутов $b = a_1 \cdot a_2$ – тензорси $g2^b_{a_1,a_2} = \left(\times^b_{a_1,a_2}\right)$. При этом запись операции сложения атрибутов диады с использованием суффиксной формы будет выглядеть следующим образом:

$$q_h^{r,s} q_h^{a_1,a_2,a_3,a_4} = q_h^{r,s} q_h^{a_1,a_2,a_3} g1^{a_4}_{a_1,a_2} = q_h^{r,s} q_h^{a_1,a_2,a_3} \left(+^{a_4}_{a_1,a_2}\right).$$

Аналогично можно выполнять запись и логических операций типа $\vee, \wedge$. Например: $\left(\vee^{a_k}_{a_i,a_j}\right)$, $\left(\wedge^{a_k}_{a_i,a_j}\right)$, $i, j, k \in \{1,2,...,m\}$ и т.д.

В работе [5] введен тензорси предикатов, обозначающий множество действий над множеством пар атрибутов $\langle a, b \rangle$. Результаты действий принимают значения из множества $\Re = \{0,1\}$. Следуя работе [5], будем задавать тензорси предикатов в виде символа γ, снабженного метками и обозначающего множество вычислений над множествами пар атрибутов. Например, запись $\gamma^{\Re}_{a,b}$ эквивалента записи $(\leq^{\Re}_{a,b})$. На месте символа «$\leq$» в тензорси предикатов могут быть символы «<», «=» и др. Эти вычисления характерны для двухместных предикатов, имеющих значение «истина» или «ложь».

С использованием принятых соглашений простой запрос на формирование списка научных руководителей, имеющих научную степень «кандидат технических наук, «*ктн*», можно записать в следующем виде:

$$q_h^{r,s}\, q_h^{a_1,a_2,"ктн",a_4} = q_r^{k,s} q_h^{a_1,a_2,a_3,a_4} \left(=^{\Re}_{a_3,"ктн"}\right),$$

где суффикс, отражающий формирование факта наличия в составе научных руководителей лиц со степенью «кандидат технических наук».

Область применения

Эффективная работа с реляционными базами данных осуществляется на основе запросов. Для описания запросов, как правило, используют язык QBE (Query By Example, язык запросов по образцу) или язык SQL (Structured Query Language, структурированный язык запросов). Однако данные языки предназначены в основном для управления данными конкретной базы данных. Вместе с тем на начальном этапе проектирования базы данных целесообразно проведение анализа объектов и операторов, обеспечивающих доступ к данным пользователя формализованными методами. Один из эффективных подходов к этому анализу осуществляется на основе тензорного исчисления в форме безындексной записи соотношений.

Рассмотрим возможности прямой формы записи тензоров на примере кластерного анализа неиерархическим методом. Предположим, что имеется множество объектов $A: q_k^{a_i}$, $k = 1,2,...,m$, $i = 1,2,...,p$, и множество центров кластеров $B: q_l^{a_i}$, $l = 1,2,...,n$.

Первый шаг. Для фиксированного $k^* \in \{1,2,...,m\}$ формируем тензор разности между атрибутами центров кластеров и атрибутами выбранного объекта (функциональный график):

$$q_l^{b_i} = q_{k^*}^{a_i} - q_l^{a_i},\ l = 1,2,...,n,\ i = 1,2,...,p.$$

Второй шаг. Вычисляем свертку тензоров и формируем тензор $q_l^{a_i,c}$:

$$q_l^c = q_l^{b_i} \circ q_l^{b^i},\ q_l^{a_i,c} = q_l^{a_i} \cup q_l^c,\ l = 1,2,...,n\ .$$

Третий шаг. Определяем расстояния d от объекта $q_{k^*}^{a_i}$ до центров всех кластеров $q_l^{a_i}$, $l = 1,2,...,n$, и формируем тензор $q_l^{a_i,c,d}$. При этом

$$q_l^{c,d} = q_l^c \left(sqrt\, {}_c^d \right),\ l = 1,2,...,n,$$

где $sqrt\, {}_c^d$ – функция извлечения корня квадратного ($d = \sqrt{c}$).

Четвертый шаг. Определяем минимальное расстояние от объекта до центра кластера $q_l^{a_i,c,d}$ из множества B:

$$q_{k^*}^{a_i,e} = q_l^d \left(\min\nolimits_{D(d)}^e \right),$$

где $D(d)$ – домен значений атрибута d в функциональном графике q_l^d.

Пятый шаг. Размещаем выбранный объект в кластере l. Другими словами, определяем в функциональном графике q_l^d значение метки l, для которой $d = e$:

$$q_{k^*}^{l,a_i} = q_{k^*}^{e,a_i} q_l^{c,d} \left(match\, {}_{(e,q_l^d)}^{l} \right),$$

где $\text{match}_{(e,d)}^{l}$ – функция определения значения метки центра кластера l, до которого расстояние от объекта $q_{k^*}^{e,a_i}$ минимально, $e = match(e, q_l^d)$.

Рассмотрим реализацию кластерного анализа в среде математического пакета Mathcad. Поскольку пакет не поддерживает тензорного представления, то воспользуемся матричной формой. Пусть A – множество объектов $q_k^{a_i}$, $k = 1,2,...,N$, $i = 1,2,...,6$; B – множество заданных центров кластеров $q_l^{a_i}$, $l = 1,2,3$, $i = 1,2,...,6$. Множества A, B заданы таблично. Ввод выполнен с применением операции импорта из базы данных. Листинг (рис. 3) содержит множество *B* и фрагмент множества *A*.

A :=

	1	2	3	4	5	6
1	4.9	5.1	4.3	6.2	5.1	3.1
2	6.8	7.2	6.2	8.3	7.1	5.2
3	5.2	5.2	4.1	6.1	5.2	3
4	6.7	7.2	7.1	8.1	7.3	7.1
5	4.9	5.2	4.2	6.2	5.1	...

B :=

	1	2	3	4	5	6
1	6.7	6.7	6.6	6.6	6.6	6.5
2	5	5	5	5	5	5
3	7	7	7	7	7	...

Рис. 3. Импорт данных

Решение задачи размещения объектов в кластерах (листинг) приведено на рис. 4. Программа разработана с использованием встроенных функций пакета Mathcad.

Результаты кластерного анализа приведены в листинге вывода данных (рис. 5). В этом листинге столбцы с номерами 1–6 содержат значения атрибутов, столбец 7 – номера кластеров.

Приведенный пример кластерного анализа является не единственным. Тензорное представление данных может быть использовано в различных методах интеллектуального анализа данных и методах искусственного интеллекта.

Заключение

Рассмотренные выше модельные представления данных позволяют сделать следующие выводы.

1. При проектировании реляционных баз данных может эффективно использоваться безындексная форма записи тензорных модельных представлений предметных пространств, классов и объектов.

2. С использованием безындексной формы записи тензоров возможна запись арифметических и логических операций над тензорами первого ранга, представляющими объекты предметного пространства информационной системы.

```
Pr(A,B) := | "определение количества объектов и центров"
           | m ← rows(A)
           | n ← rows(B)
           | "определение количества параметров объектов"
           | p ← cols(B)
           | for k ∈ 1..m
           |     for q ∈ 1..n − 1
           |         "выделение объекта и центра кластера"
           |         U ← submatrix(A,k,k,1,p)
           |         W ← submatrix(B,q,q,1,p)
           |         "вычисление расстояний объект-центры"
           |         V ← U − W
           |         S_q ← sqrt(V·V^T)
           |     "вычисление минимального расстояния"
           |     D_k ← min(S)
           |     "размещение объекта в кластере"
           |     A_{k,p+1} ← |match(D_k,S)|
           | A
```

Рис. 4. Размещение объектов в кластерах

Pr(A,B) =

	1	2	3	4	5	6	7
1	4.9	5.1	4.3	6.2	5.1	3.1	2
2	6.8	7.2	6.2	8.3	7.1	5.2	1
3	5.2	5.2	4.1	6.1	5.2	3	2
4	6.7	7.2	7.1	8.1	7.3	7.1	3
5	4.9	5.2	4.2	6.2	5.1	3.1	2
6	4.9	5.1	4.3	6.3	5.2	3.2	2
7	6.8	7.3	6.5	8.3	7.1	5.2	1
8	6.5	7.1	6.2	8.2	7.2	5.1	1
9	5.2	5.2	4.3	6.1	5.3	4.9	2
10	7.2	6.7	6.5	7.3	7.5	6.7	3
11	7.8	8.1	8.2	7.9	7.5	7.7	3
12	4.7	4.1	3.7	4.7	4.4	3.9	2
13	8.1	7.7	6.7	6.6	8.4	8.1	3
14	6.6	6.3	5.9	6.7	5.7	6.7	1
15	4.4	4.7	5.3	5.5	5.8	4.9	2
16	5.1	5.5	5.4	5.1	5.2	5.3	2

Рис. 5. Вывод результатов

3. Безындексная форма записи тензоров обеспечивает формализованную запись двухместных предикатов над множеством пар атрибутов объектов предметного пространства.

4. На основе безындексной формы тензорных модельные представлений данных можно анализировать параметры структур данных, реализуемость простых и сложных запросов к реляционным базам данных.

Список литературы

1. **Арменский, А. Е.** Тензорные методы построения информационных систем / А. Е. Арменский. – М. : Наука, 1989. – 152 с.
2. **Крон, Г.** Тензорный анализ сетей : пер. с англ. / Г. Крон ; под ред. Л. Т. Кузина, П. Г. Кузнецова. – М. : Сов. радио, 1978. – 720 с.
3. **Чижухин, Г. Н.** Тензорная методология в дискретной системотехнике / Г. Н. Чижухин, Ю. Г. Бочкарева. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 184 с.
4. **Кулик, Б. А.** Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Б. А. Кулик, А. А. Зуенко, А. Я. Фридман. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 235 с.
5. **Макарычев, П. П.** Построение моделей классов и объектов с применением тензорной методологии / П. П. Макарычев, Н. А. Попова // Университетское образование : сб. ст. XVII Международная науч.-метод. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – С. 457–458.

References

1. Armenskiy A. E. *Tenzornye metody postroeniya informatsionnykh sistem* [Tensor methods of information system building]. Moscow: Nauka, 1989, 152 p.
2. Kron G. *Tenzornyy analiz setey: per. s angl.* [Tensor analysis: translation from English]. Moscow: Sov. radio, 1978, 720 p.
3. Chizhukhin G. N., Bochkareva Yu. G. *Tenzornaya metodologiya v diskretnoy sistemotekhnike* [Tensor methodology in discrete systems engineering]. Penza: Izd-vo PGU, 2006, 184 p.
4. Kulik B. A., Zuenko A. A., Fridman A. Ya. *Algebraicheskiy podkhod k intellektual'noy obrabotke dannykh i znaniy* [Algebraic approach to intelligent treatment of data and knowledge]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010, 235 p.
5. Makarychev P. P., Popova N. A. *Universitetskoe obrazovanie: sb. st. XVII Mezhdunarodnaya nauch.-metod. konf.* [University education: proceedings of XVII International scientific and methodological conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2013, pp. 457–458.

Макарычев Петр Петрович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического обеспечения и применения ЭВМ, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: makpp@yandex.ru

Makarychev Petr Petrovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub–department of computer application and software, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Артамонов Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, профессор, кафедра автономных информационных и управляющих систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aius@pnzgu.ru

Artamonov Dmitriy Vladimirovich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of autonomous information and control systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.3

Макарычев, П. П.

Модельные представления данных на основе прямого тензорного исчисления / П. П. Макарычев, Д. В. Артамонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 3–15. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-1

УДК 004.925.83, 004.946
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-2

Ю. Н. Косников, Хоанг Тхай Хо

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРФЕЙСА ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ ДЛЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является реконструкция формы объектов интерфейсного пространства по множеству характерных точек. Предмет исследования – методы геометрического моделирования неаналитических поверхностей с применением смешивающих функций. Целью работы является представление научных принципов геометрического моделирования и отображения объектов интерфейса «человек – компьютер» на основе применения смешивающих функций.

Материалы и методы. Предлагается двухэтапное моделирование геометрической формы пространственных объектов с применением смешивающих функций радиального и ортогонального базиса.

Результаты. Предложена методика геометрического моделирования пространственных объектов, включающая следующие этапы: создание модели поверхности объекта по исходному набору опорных точек с применением радиальных базисных функций, замена исходных опорных точек на новые – равномерно расставленные на поверхности, построение модели поверхности на основе смешивающих функций ортогонального базиса, переход к конечным разностям. Применение методики обеспечивает высокую производительность графической системы компьютера в сочетании с хорошими изобразительными возможностями. Применение перечисленных принципов позволяет строить пространственные объекты произвольной формы для интерфейсов виртуального окружения в системах управления и обработки информации различного назначения.

Выводы. Упорядоченное размещение опорных точек упрощает алгоритм перехода к полигональному представлению объекта. Применение смешивающих функций ортогонального базиса позволяет применить быстрый алгоритм вычисления вершин и нормалей полигональной модели на основе конечных разностей. Перечисленные приемы помогают обеспечить высокую производительность вычислений в сочетании с хорошими изобразительными возможностями и экономией памяти графической системы.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, виртуальное окружение, опорная точка, интерполяция, смешивающая функция, радиальный базис, ортогональный базис, конечная разность.

Yu. N. Kosnikov, Khoang Tkhay Kho

MODELING OF VIRTUAL ENVIRONMENT INTERFACE OBJECTS FOR ERGATIC SYSTEMS

Abstract.

Background. The research object is reconstruction of forms of interface environment objects by multiple characteristic points. The research subject is methods of geometric modeling of nonanalytical surfaces using mixing functions. The aim of the research is to introduce scientific principles of geometric modeling and imaging of objects of the “human-computer” interface on the basis of mixing functions.

Materials and methods. The article suggests two-stage modeling of a geometric form of spatial objects using mixing functions of radial and orthogonal bases.

Results. The authors have suggested a method of geometric modeling of spatial objects including the following stages: creation of an object's surface model by an initial set of control points using radial basis functions, substitution of initial control points by new ones – equally distributed on the surface, building of a surface model using mixing functions of the orthogonal basis, switching to finite differences. Application of the described principles allows to build spatial objects of arbitraty shape for virual environment interfaces in various data control and processing systems.

Conclusions. Ordered distribution of control points simplifies the algorithm of transition to the polygonal object presentation. Application of mixing functions of the orthogonal basis allows to use a fast algorithm for calculation of vertexes and normals of a polygonal model on the basis of finite differences. The described methods provide high performance of calculations in combination with high graphic capacities and storage efficiency of graphic systems.

Key words: human-computer interface, virtual environment, control point, interpolation, mixing function, radial basis, orthogonal basis, finite difference.

Введение

Современные эргатические системы характеризуются высокой сложностью и, зачастую, должны функционировать в режиме реального времени (РВ). Человек в таких системах испытывает большую психофизиологическую нагрузку, что может привести к снижению эффективности его работы. Эргатические системы, как правило, имеют компьютерную поддержку, поэтому человек взаимодействует с элементами системы через человеко-машинный интерфейс. В настоящее время осуществляется переход от традиционных WIMP-интерфейсов к интерфейсам нового типа, построенным на основе речевого, жестового, тактильного, биометрического взаимодействия человека с компьютером.

Для визуального представления объектов интерфейса все шире применяются принципы виртуальной реальности. Виртуальная реальность является одной из форм человеко-машинного интерфейса. Цель применения такого интерфейса – комплексно воздействуя на органы чувств человека, погрузить его в созданную компьютером среду высокой реалистичности. Решение прикладных задач зачастую не требует такого погружения, но, в то же время, человек лучше понимает ситуацию в эргатической системе, если ее элементы имеют знакомые из реального мира вид и поведение. В этом случае эффективной средой взаимодействия человека с элементами системы является интерфейс виртуального окружения (ИВО), создаваемый средствами геометрического моделирования и компьютерной графики. В нем могут комбинироваться условные и реалистичные образы объектов, дополняемые традиционными средствами интерфейса – обозначениями, надписями, навигаторами и т.д. Проектирование ИВО – важная и сложная многоплановая задача, от качества решения которой во многом зависит эффективность функционирования эргатической системы.

1. Требования к математическим моделям объектов интерфейса

Средствами интерфейса человеку представляется информация о поведении самых различных рукотворных и природных объектов. Например, при

решении таких задач, как проектирование сооружений и коммуникаций, мониторинг транспортных средств, компьютерное обучение навыкам пространственной навигации, управление воинскими подразделениями, интерфейсное пространство должно содержать объекты разнообразной геометрической формы. Для их описания необходимо использовать методы математического (геометрического) моделирования. Наиболее сложной задачей является моделирование объектов неаналитической формы, например, рельефа местности и других природных объектов. Их форма описывается скалярным полем, т.е. пространственным набором характерных (опорных) точек. Опорные точки могут быть получены путем замеров, вычислений, обработки 3D-сканером реальных объектов, указания специалистом-разработчиком. Поверхность объекта по его опорным точкам реконструируется с помощью интерполяции.

Из математики известно множество методов построения интерполяционных моделей, однако в рассматриваемом случае назначение объектов интерполяции накладывает ограничения на выбор методов. Интерполяционные модели объектов интерфейса подлежат дальнейшей визуализации и должны быть узнаваемыми. В связи с этим к моделям предъявляются следующие требования:

– точное прохождение поверхности объекта через опорные точки;

– гладкость поверхности;

– отсутствие у поверхности феномена Рунге (осцилляций);

– возможность повысить реалистичность изображения объекта известными приемами компьютерной графики;

– возможность применить быстрые алгоритмы перехода от непрерывной поверхности к ее полигональному представлению, поддерживаемому графической системой компьютера.

Еще одним требованием является по возможности малая ресурсоемкость моделей как на этапе их хранения в памяти компьютера, так и на этапе вывода на поле отображения. Это требование связано с тем, что формирование интерфейса является важной, но не единственной задачей эргатической системы. Ее основной задачей является сбор данных, их обработка, выработка решений и управляющих воздействий и т.д., т.е. выполнение работы, для которой система тематически предназначена.

2. Методы геометрического моделирования на основе смешивающих функций

Традиционные методы полиномиальной интерполяции плохо подходят для моделирования объектов ИВО. Они требуют больших вычислительных затрат и дают поверхность с осцилляциями. Более приемлемые результаты дают методы на основе смешивающих функций (СФ). Суть этих методов в том, что координаты текущей точки поверхности находятся путем суммирования (смешивания) «вкладов», которые вносят опорные точки [1]. Величины этих «вкладов» функционально зависят от расстояний между текущей точкой и опорными точками. В различных методах используются различные функциональные зависимости от расстояний (различные смешивающие функции).

Самой простой интерполяционной моделью поверхности является полигональная сетка, в которой опорные точки скалярного поля становятся вершинами полигонов. Такая модель хранится в памяти вычислительной системы в виде набора опорных точек и заранее вычисленных для этих точек

нормалей к поверхности. Операции обработки (динамика, текстурирование, затенение) полигональной модели просты и поддерживаются графическим процессором вычислительной системы. На этапе вывода модели на поле отображения вычислительная система использует именно полигональную сетку. С этой точки зрения полигональная интерполяция кажется предпочтительной: она сразу дает результат, пригодный для отображения. Однако при неравномерной или редкой расстановке опорных точек поверхность, полученная в результате полигональной интерполяции, имеет явно выраженные грани. Для повышения реалистичности формы число опорных точек нужно увеличивать, что приводит к росту затрат памяти на хранение модели и времени ее обработки. Тогда в случае информативно насыщенного интерфейса возникают сложности с обеспечением режима РВ.

3. Моделирование методами билинейной и сплайновой интерполяции

Просто строится модель поверхности на основе билинейной интерполяции. Поверхность составляется из четырехугольных отсеков, каждый из которых имеет в качестве угловых вершин 4 опорные точки скалярного поля. Описание отсека, как ясно из названия метода, содержит линейные СФ по каждой координатной оси и для отсека, построенного на опорных точках $P_k(x_k,y_k,z_k)$ ($k = 1,\ldots,4$), имеет вид

$$z = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1}\left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}z_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}z_2\right) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}\left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}z_3 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}z_4\right).$$

Отсек в общем случае имеет криволинейную форму, что повышает изобразительные возможности модели.

Однако применение билинейной интерполяции не дает гладкой стыковки соседних отсеков поверхности. Действительно, билинейная поверхность является двулинейчатой: ее образующие в направлениях обеих координат-аргументов являются прямыми линиями. Тогда в любой точке на линии стыковки двух соседних отсеков будут сходиться две прямолинейные образующие: образующая первого отсека и образующая второго отсека. Сопряжение отсеков будет гладким, если наклоны этих образующих одинаковы, что возможно лишь в частных случаях.

Гладкую стыковку отсеков можно получить, применив сплайновую интерполяцию [2]. Точное прохождение поверхности через опорные точки и гладкую стыковку отсеков обеспечивает, например, интерполяция сплайнами Безье. Это известный инструмент геометрического моделирования, широко применяемый на практике. Однако сплайн-интерполяция имеет недостатки. Если опорные точки расположены в пространстве случайным образом, то для сплайна Безье алгоритмически сложно определить дополнительные вершины характеристического многогранника. Если же в качестве таких вершин использовать сами опорные точки, то поверхность Безье не будет точно проходить через эти вершины. Кроме того, бикубические СФ сплайнов достаточно сложны в вычислительном отношении.

4. Интерполяция *R*-примитивами

Более простой вид, по сравнению со сплайнами, имеют рельеф-примитивы (*R*-примитивы) [3]. Описание *R*-примитива имеет вид

$$z = \sum_{i=1}^{N} z_i bf_{xi} bf_{yi} \ , \tag{1}$$

где i – номер опорной точки; z_i – высота i-й опорной точки; bf_{xi}, bf_{yi} – смешивающие функции i-й опорной точки, действующие вдоль координатных осей; N – количество опорных точек, влияние которых учитывается при построении отсека поверхности.

Координата z текущей точки находится как сумма взвешенных высот опорных точек, причем в качестве весовых коэффициентов выступают значения смешивающих функций. Эти значения пропорциональны расстояниям между текущей точкой и опорными точками. Область влияния каждой опорной точки определяется в плоскости аргументов x,y, т.е. «вклад» каждой опорной точки в координаты текущей точки определяется расстоянием между проекциями этих точек на плоскость xy. Смешивающие функции i-й опорной точки R-примитива выглядят следующим образом:

$$bf_{xi} = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{|x - x_i|}{A_x}\right)^{mx} & \text{при } |x - x_i| < A_x, \\ 0 & \text{при } |x - x_i| \geq A_x, \end{cases} \tag{2}$$

$$bf_{yi} = \begin{cases} \left(1 - \dfrac{|y - y_i|}{A_y}\right)^{my} & \text{при } |y - y_i| < A_y, \\ 0 & \text{при } |y - y_i| \geq A_y, \end{cases} \tag{3}$$

где x_i, y_i – координаты i-й опорной точки в плоскости аргументов; x, y – координаты текущей точки в плоскости аргументов; mx, my – характеристики рельефа – это показатели степени, значения которых определяют характер рельефа отсека; A_x, A_y – размеры области влияния i-й опорной точки вдоль координатных полуосей (положительных и отрицательных).

Смешивающие функции R-примитива обладают следующими свойствами:

– при совпадении проекции текущей точки с проекцией опорной точки ($x = x_i$, $y = y_i$) СФ этой опорной точки принимает единичное значение;

– при удалении текущей точки от опорной точки вдоль каждой координаты плоскости xy «вклад» опорной точки по каждой координате уменьшается по степенному закону;

– при выходе текущей точки за границы области влияния опорной точки СФ этой опорной точки принимает нулевое значение.

Для применения R-примитива не нужно находить никаких дополнительных точек. Смешивающие функции R-примитива более просты, чем у сплайнов, а гладкая стыковка отсеков получается за счет расширения области влияния опорных точек. На рис. 1 показано расположение в декартовом пространстве двадцати опорных точек P_1, …, P_{20}. Для простоты представления принято, что их проекции на плоскость аргументов расставлены равномерно.

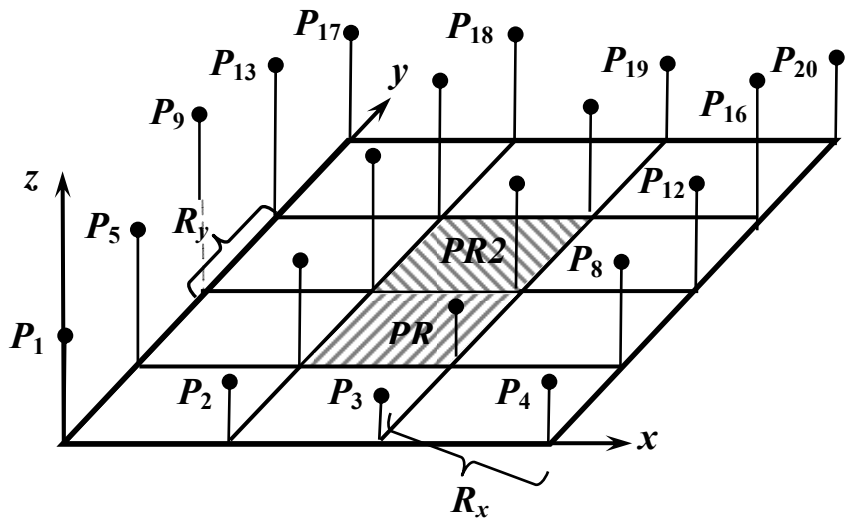


Рис. 1. Задание двух отсеков рельеф-примитива набором из двадцати опорных точек

Область влияния опорной точки предполагается равной двум шагам координатной сетки в направлении каждой координатной полуоси, на рис. 1 эти шаги координатной сетки обозначены R_x, R_y. Проекции двух средних сопрягающихся отсеков поверхности на плоскость *xy* отмечены штриховкой и обозначениями *PR*1, *PR*2. Характеристики рельефа выбраны равными двум. Тогда для вычисления высоты текущей точки первого (z_{I}) и второго (z_{II}) отсеков служат выражения

$$z_{\text{I}} = \sum_{i=1}^{16} z_i \left(1 - \frac{|x - x_i|}{2R_x}\right)^2 \left(1 - \frac{|y - y_i|}{2R_y}\right)^2, \quad (4)$$

$$z_{\text{II}} = \sum_{i=5}^{20} z_i \left(1 - \frac{|x - x_i|}{2R_x}\right)^2 \left(1 - \frac{|y - y_i|}{2R_y}\right)^2. \quad (5)$$

Вид *R*-примитивов, построенных по выражениям (4), (5) для некоторого набора опорных точек, показан на рис. 2 (получен в среде 3D-Grapher). Он демонстрирует гладкость сопряжения отсеков.

Интерполяция *R*-примитивами имеет один недостаток. В случае совпадения текущей точки с некоторой *k*-й опорной точкой ($x = x_k$, $y = y_k$) соответствующее слагаемое в математическом описании *R*-примитива принимает значение высоты z_k *k*-й опорной точки. Однако другие слагаемые принимают не нулевые, а некоторые конечные значения, которые суммируются с z_k. В итоге вычисленное значение высоты в текущей точке не совпадает с высотой в *k*-й опорной точке.

Этот эффект относится ко всем опорным точкам. В результате поверхность, полученная путем интерполяции, не проходит через опорные точки. Чтобы устранить этот недостаток, нужно ввести масштабные коэффициенты,

индивидуальные для каждой опорной точки. Тогда модель отсека *R*-примитива принимает вид

$$z = \sum_{i=1}^{N} m_i z_i bf_{xi} bf_{yi} \ ,$$

где bf_{xi}, bf_{yi} – значения смешивающих функций *i*-й опорной точки, действующих вдоль координатных осей; *N* – количество опорных точек, влияющих на текущую точку отсека.

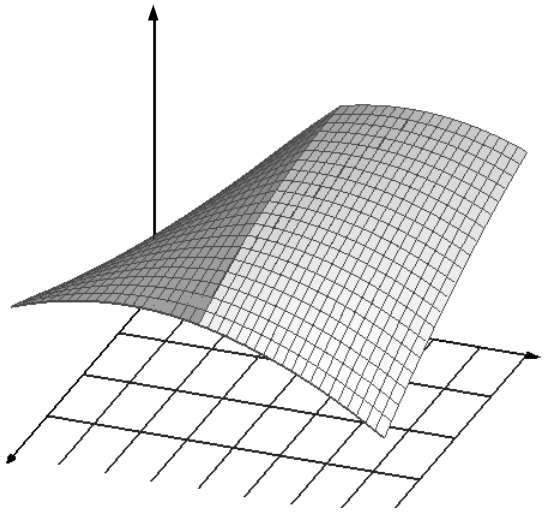


Рис. 2. Сопряжение двух отсеков в виде *R*-примитивов

Введя обозначение $\lambda_i = m_i z_i$ и определив λ_i как коэффициент влияния *i*-й опорной точки, получим выражение

$$z = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i bf_{xi} bf_{yi}, \qquad (6)$$

которое при ближайшем рассмотрении оказывается сходным с описанием интерполяции на основе радиальных базисных функций.

5. Функции радиального и ортогонального базиса

Радиальные базисные функции (РБФ) широко используются для интерполяции функциональных зависимостей, но особенности их применения для последующей визуализации поверхностей в известных информационных источниках раскрыты недостаточно. Интерполянт на основе РБФ обычно описывается в декартовом пространстве в общей (неявной) форме:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \varphi(r_i) = 0, \qquad (7)$$

где $\varphi(r_i)$ – значения РБФ для *i*-й опорной точки. Это значение зависит от декартова расстояния r_i между текущей точкой интерполируемой поверхности и *i*-й опорной точкой (т.е. от координат *i*-й опорной точки); λ_i – коэффициент влияния *i*-й опорной точки.

На основе (7) составляется система уравнений из условия прохождения интерполянта через определенные точки пространства. Для исключения тривиального решения системы уравнений в (7) добавляется полином малой степени [4]. Решение полученной системы уравнений позволяет найти коэффициенты влияния λ_i опорных точек для заданной ими поверхности. Подстановка λ_i в (7) дает аналитическое описание поверхности. Для визуализации поверхности с помощью (7) нужно найти набор принадлежащих ей промежуточных точек и сделать их вершинами полигональной сетки. Далее для каждой вершины нужно найти нормаль к поверхности. Нормали к поверхности нужны для моделирования ее освещения на этапе визуализации. Для нахождения нормали в вершине полигональной сетки нужно найти нормали ко всем полигонам, которым принадлежит эта вершина, а затем найти нормаль в вершине путем усреднения нормалей к полигонам. Полученное описание полигональной сетки (координаты вершин и нормальных векторов) передаются в графический процессор компьютера для визуализации.

Описанный алгоритм плохо подходит для моделирования и визуализации динамических объектов в режиме РВ. Для протяженных поверхностей, например рельефа местности, количество слагаемых в выражении (7) может достигать нескольких сотен, а известные разновидности РБФ (thin-plate spline, инверсный квадрик, инверсный мультиквадрик, гауссиан и др.) имеют в своем составе степенные и логарифмические функции, радикалы, дроби. Кроме того, при вычислении промежуточных точек поверхности, описанной в общей форме, приходится применять переборный метод. В соответствии с ним организуется обход по какому-то закону точек пространства, которые проверяются на принадлежность поверхности. Если при подстановке координат очередной точки в выражение (7) его левая часть принимает нулевое значение, точка принадлежит поверхности и может быть принята за очередную вершину полигональной сетки. Такой алгоритм полигонизации работает медленно и не может быть реализован в режиме РВ. Это означает, что формирование полигональной модели поверхности нужно выполнять заранее и далее работать с ней в режиме РВ. Однако полигональная модель протяженной поверхности характеризуется большим объемом памяти компьютера, необходимой для ее хранения, и большим временем геометрических преобразований (сдвиг, поворот, проецирование). В результате затраты компьютерных ресурсов растут, особенно в случае интерфейса большой информационной емкости.

Можно предложить вместо функций радиального базиса использовать в математической модели объекта смешивающие функции ортогонального базиса (СФОБ) и вернуться к описанию модели в виде выражения (6). Достоинство СФОБ в том, что их значения зависят от расстояний между текущей и опорными точками поверхности, вычисляемых раздельно по координатам-аргументам, например, в декартовом пространстве – по координатам *x* и *y* как в выражениях (2), (3). Если опорные точки расположены в узлах ортогональной координатной сетки и нахождение промежуточных точек идет вдоль

координатных линий, то значения СФОБ вычисляются по разностным формулам с помощью только операций суммирования [5]. Например, СФ bf_x вычисляется по выражениям

$$\Delta^k bf_{x(j+1)} = \Delta^k bf_{xj} + \Delta^{k+1} bf_{xj} \ , \quad k = 0,1\ldots, \tag{8}$$

где $\Delta^k bf_{xj}$ – конечная разность функции bf_x порядка k на j-м шаге вычисления, причем $\Delta^0 bf_x \equiv bf_x$.

Вычисления каждой конечной разности начинаются на нулевом шаге с некоторого начального значения $\Delta_0^k bf_{xi}$. Вычисления функции bf_y выполняются по аналогии с вычислением bf_x.

Применение СФОБ и разностных формул позволяет проводить полигонизацию поверхности в режиме РВ. Для реализации описанного подхода предлагается следующая методика.

6. Методика геометрического моделирования пространственных объектов интерфейса виртуального окружения

На первом этапе моделирования по исходному набору опорных точек составляется модель поверхности с применением любых подходящих РБФ и методик моделирования. В информационных источниках описаны свойства различных РБФ [4, 6, 7], которые можно использовать на данном этапе.

Первый этап можно значительно упростить, если функция-интерполянт является однозначной. Тогда для ее описания можно применить явную или параметрическую форму. Для этого множество исходных опорных точек с помощью известных геометрических преобразований сдвига и поворота переводится в подходящую вспомогательную систему координат (ВСК) [8]. Для протяженных незамкнутых поверхностей подходит описание в декартовых координатах:

$$z(x,y) = \sum_{i=1}^{M} \lambda_i \varphi(r_i), \quad r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \ , \tag{9}$$

где r_i – декартово расстояние между проекциями i-й опорной точки и текущей точки поверхности на плоскость аргументов; M – количество опорных точек.

Описание замкнутых поверхностей представляется, например, в сферических координатах ρ (полярный радиус), φ (азимутальный угол), θ (полярный угол):

$$\rho(\varphi,\theta) = \sum_{i=1}^{M} \lambda_i \varphi(\alpha_i), \tag{10}$$

$$\alpha_i = \arccos\left(\cos\theta \cdot \cos\theta_i + \sin\theta \cdot \sin\theta_i \cdot \cos(\varphi - \varphi_i)\right),$$

где φ_i, θ_i – сферические координаты i-й опорной точки; α_i – угловое расстояние между текущей и опорной точками.

Коэффициенты влияния λ_i ($i = 1, \ldots, M$) опорных точек находятся из условия прохождения поверхности через эти точки.

Если получить описание поверхности в виде однозначной функции в одной ВСК затруднительно, нужно ввести несколько координатных систем и в них разместить отдельные отсеки поверхности (отдельные подмножества опорных точек). Тогда возникает составная поверхность, отсеки которой необходимо стыковать между собой. Если учесть, что исходное множество опорных точек задается в мировой системе координат, то ВСК можно считать локальной системой координат графического объекта (СКО), как это обычно делается в системах компьютерной графики. Первый этап моделирования является предварительным, выполняется не в режиме РВ и по причине его важности может выполняться с участием человека.

На втором этапе исходный набор опорных точек заменяется новым набором, точки которого равномерно расставлены на поверхности аргументов СКО. Для этого поверхность аргументов (x, y или φ, θ) обходится с постоянным шагом и для каждого сочетания значений аргументов отыскиваются значения координаты z или ρ по выражениям (9), (10). Полученные тройки координат x, y, z или φ, θ, ρ принимаются за координаты новых опорных точек и образуют новое описание поверхности в СКО. Путем сортировки по аргументам СКО опорные точки упорядочиваются в пространстве.

На третьем этапе в соответствии с выражением (6) строится модель поверхности на основе СФОБ. Вид СФОБ и размеры областей их влияния выбираются заранее исходя из требований к погрешности интерполяции. Например, эксперимент показывает, что хорошие результаты дают СФОБ вида

$$bf_{xi} = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{x - x_i}{A_x} \right)^2 & \text{при } |x - x_i| < A_x, \\ 0 & \text{при } |x - x_i| \geq A_x, \end{cases} \tag{11}$$

$$bf_{yi} = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{y - y_i}{A_y} \right)^2 & \text{при } |y - y_i| < A_y, \\ 0 & \text{при } |y - y_i| \geq A_y \ . \end{cases} \tag{12}$$

Применение таких СФ позволяет просто вычислять координаты нормалей к поверхности. Как известно, в случае явного описания поверхности координаты n_x, n_y, n_z нормали находятся из выражений:

$$n_x = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad n_y = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad n_z = -1.$$

Выполнив необходимые действия над (6) с учетом (11), (12), получим выражения

$$n_x = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \overline{bf}_{xi} bf_{yi} \ , \ n_y = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i bf_{xi} \overline{bf}_{yi}.$$

В них входят и прежние СФ (11), (12) и СФ другого вида:

$$\overline{bf}_{xi} = \frac{2(x_i - x)}{A_x^2}, \quad \overline{bf}_{yi} = \frac{2(y_i - y)}{A_y^2}.$$

Таким образом, описания поверхности и нормали к этой поверхности имеют идентичную структуру.

Четвертый этап оперирует конечно-разностной моделью поверхности объекта. Предварительно вычисляются начальные значения конечных разностей, входящих в описание поверхности, и нормалей в ее точках. Затем в режиме РВ по формулам вида (8) осуществляется вычисление координат промежуточных точек поверхности и нормалей в этих точках. Полученные точки принимаются за вершины полигональной модели поверхности.

Множество вершин и нормалей передается в процессор графического адаптера компьютера. Вместе с ними в графический процессор передаются параметры размещения СКО в исходной (мировой) системе координат. Графический процессор вычисляет текущие положения вершин и нормалей полигональной модели объекта в соответствии с параметрами размещения объекта в мировой системе координат и параметрами динамики объекта в процессе его пространственных эволюций.

Заключение

Описание объекта ограниченным множеством опорных точек экономит память графической системы. Упорядоченное размещение опорных точек упрощает алгоритм перехода к полигональному представлению объекта. Применение СФОБ позволяет применить быстрый алгоритм вычисления вершин и нормалей полигональной модели на основе конечных разностей. Перечисленные приемы помогают обеспечить высокую производительность вычислений в сочетании с хорошими изобразительными возможностями и экономией памяти графической подсистемы эргатической системы.

Список литературы

1. **Александрова, Н. В.** Смешивающие функции в геометрическом моделировании и визуализации поверхностей свободных форм / Н. В. Александрова, А. П. Зимин, Ю. Н. Косников, Хоанг Тхай Хо // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – Т. 1, № 03 (25). – С. 51–60.
2. **Косников, Ю. Н.** Применение бикубических сплайнов в графических системах реального времени / Ю. Н. Косников // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2005. – № 4 (9). – С. 30–36.
3. **Kosnikov, Yu. N.** The integrated primitives application for mapping three-dimensional objects in real-time mode // Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems. – 2000. – № 2 (10). – P. 37–42.
4. Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions / J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, T. R. Evans // SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001. – P. 67–76.
5. **Kosnikov, Yu. N.** Increasing the information capacity of the interface of the control system for multyparametric objects / Yu. N. Kosnikov // Application of Information and Communication Technologies – AICT2015 : 9th International Conference, Conference

Proceedings (Russia, Rostov-on-Don, 14–16 October 2015). – Rostov-on-Don, 2015. – P. 446–449.
6. Interpolating Implicit Surfaces From Scattered Surface Data Using Compactly Supported Radial Basis Functions / B. S. Morse, T. S. Yoo, P. Rheingans, D. T. Chen, K. R. Subramanian // Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI ’01). – M., 2001. – P. 92–102.
7. **Cuomo, S.** Surface Reconstruction from Scattered Point via RBF Interpolation on GPU / S. Cuomo, A. Galletti, G. Giunta, A. Starace // Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. – M., 2013. – P. 433–440.
8. **Косников, Ю. Н.** Методика и технология компьютерного моделирования поверхностей свободных форм с применением радиальных базисных функций / Ю. Н. Косников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс: Периодическое научное издание. Сер. Технические науки. Информационные технологии. – 2014. – № 03 (19). – С. 176–183.

References

1. Aleksandrova N. V., Zimin A. P., Kosnikov Yu. N., Khoang Tkhay Kho *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2015, vol. 1, no. 03 (25), pp. 51–60.
2. Kosnikov Yu. N. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2005, no. 4 (9), pp. 30–36.
3. Kosnikov Yu. N. *Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems*. 2000, no. 2 (10), pp. 37–42.
4. Carr J. C., Beatson R. K., Cherrie J. B., Mitchell T. J., Fright W. R., McCallum B. C., Evans T. R. *SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 2001, pp. 67–76.
5. Kosnikov Yu. N. *Application of Information and Communication Technologies – AICT2015: 9th International Conference, Conference Proceedings (Russia, Rostov-on-Don, 14–16 October 2015)*. Rostov-on-Don, 2015, pp. 446–449.
6. Morse B. S., Yoo T. S., Rheingans P., Chen D. T., Subramanian K. R. *Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Applications (SMI ’01)*. Moscow, 2001, pp. 92–102.
7. Cuomo S., Galletti A., Giunta G., Starace A. *Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. Moscow, 2013, pp. 433–440.
8. Kosnikov Yu. N. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus: Periodicheskoe nauchnoe izdanie. Ser. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii* [XXI century: results of the past and problems of the present plus: a scientific periodical. Series: Engineering sciences. Information technologies]. 2014, no. 03 (19), pp. 176–183.

Косников Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-вычислительных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: jkos@pnzgu.ru

Kosnikov Yuriy Nikolaevich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of data-processing systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Хоанг Тхай Хо
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Khoang Tkhay Kho
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: hoangthaiho@gmail.com

УДК 004.925.83 :: 004.946

Косников, Ю. Н.

Моделирование объектов интерфейса виртуального окружения для эргатических систем / Ю. Н. Косников, Хоанг Тхай Хо // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 16–28. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-2

УДК 004.272.42
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-3

Р. Н. Федюнин

БЛОК АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ УМНОЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ЧИСЕЛ

Аннотация.

Актуальность и цели. Способы реализации функциональных блоков, обработки чисел большой разрядности для специализированных арифметико-логических устройств (АЛУ) являются актуальным направлением исследования на протяжении последних 20 лет, о чем свидетельствуют разработки и множество статей по данной тематике. Необходимость в проектировании данных видов блоков возникает в результате того, что диапазон чисел, который используется в реальных задачах, порой доходит до нескольких сот и даже тысяч десятичных цифр. Такой диапазон чисел не соответствует базовым типам данных современных архитектур АЛУ и требует особого подхода при реализации АЛУ.

Материалы и методы. Исследование и реализация функциональных блоков АЛУ проведены на основе формализма теории недетерминированных автоматов с последующим функциональным моделированием блоков АЛУ в САПР ALTERA QUARTUS. В качестве основного алгоритма исследования и реализации блоков взят алгоритм умножения длинных чисел (алгоритм Карацубы).

Результаты. Приведено подробное описание soft-процессора, на базе которого планируется эксплуатация функционального блока умножения больших чисел. Получена модель функционирования блока умножения больших чисел на основе теории недетерминированных автоматов. Предложена система канонических уравнений на основе математической модели алгоритма умножения. Произведена схемотехническая реализация функционального блока умножения с последующим моделированием в САПР Altera Quartus.

Выводы. Предложен способ реализации функциональных блоков умножения больших чисел. Использована теория недетерминированных автоматов для реализации модели функционального блока умножения. Произведено математическое описание, а затем функциональное моделирование устройства умножения на уровне soft-процессора.

Ключевые слова: soft-процессор, функциональный блок умножения, большие числа, алгоритм Карацубы, САПР Altera Quartus.

R. N. Fedyunin

ARITHMETIC LOGIC MODULES FOR MULTIPLICATION OF LARGE NUMBERS

Abstract.

Background. Ways to implement functional units that process large numbers for specialized arithmetic and logic units (ALU) have been the actual direction of research over the past twenty years. The need for these types of design units arises from the fact that the range of numbers used in real applications is sometimes up to several hundreds and even thousands of decimal digits. This range of numbers does not correspond to the basic data types of modern ALU architectures.

Materials and methods. Research and implementation of ALU functional units were based on the formalism of the theory of nondeterministic automata, followed

by functional simulation of ALU functional units in the ALTERA QUARTUS CAD. The authors used the algorithm of long numbers multiplication (the Karatsuba algorithm) as the main algorithm of research and unit implementation.

Results. The researcher described the soft-processor in detail, on the basis of which the functioning of the large numbers multiplication unit was planned. The author obtained a model of the large numbers multiplication unit, based on the theory of non-deterministic automata. The article suggests a system of canonical equations based on the mathematical model of the multiplication algorithm. The researcher has designed a circuit of the functional multiplication unit with subsequent modeling in the Altera Quartus CAD.

Conclusions. The article suggests a method of implementation of functional units for large numbers multiplication. The theory of nondeterministic automata was used implement the function multiplication unit model. The author mathematically described and then functionally designed the multiplication device at the soft-processor level.

Key words: soft-processor, function multiplication unit, large numbers, Karatsuba algorithm, Altera Quartus CAD.

Введение

Одним из эффективных путей, позволяющих сократить сроки и снизить стоимость разработки системы на кристалле (СнК), является применение в процессе проектирования встраиваемых soft-процессоров (рис. 1).

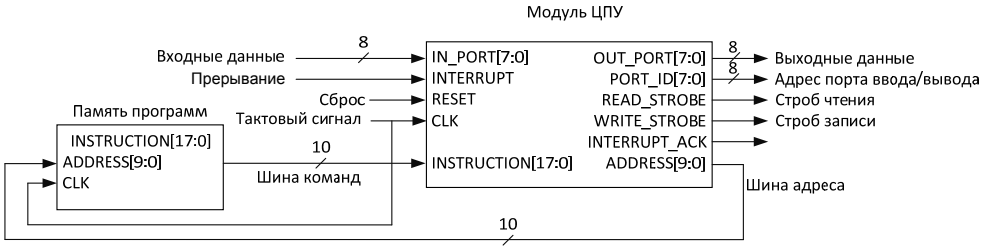


Рис. 1. Обобщенная структура стандартного soft-процессора

Интегрируя в проекте готовые функциональные блоки сторонних разработчиков и блоки, разрабатываемые собственными проектными группами, можно обеспечить необходимый компромисс между стоимостью и сроками создания конечного продукта (рис. 2). Для сокращения сроков проектирования требуются недорогие и надежные библиотеки функциональных блоков.

Преимущество готовых блоков заключается в том, что при их использовании проектировщик не тратит время и средства на разработку и верификацию. Для решения ряда задач можно использовать библиотеки функциональных блоков, предлагаемые различными компаниями по «открытой» лицензии (например, GNU General Public License – открытое лицензионное соглашение GNU). Для дальнейшего коммерческого применения полученных результатов обычно требуется приобрести соответствующую лицензию у разработчика библиотеки.

В статье рассматривается способ проектирования функционального блока для реализации умножения больших чисел и интеграция его в soft-процессор, основанный на soft-ядрах сторонних разработчиков [1].

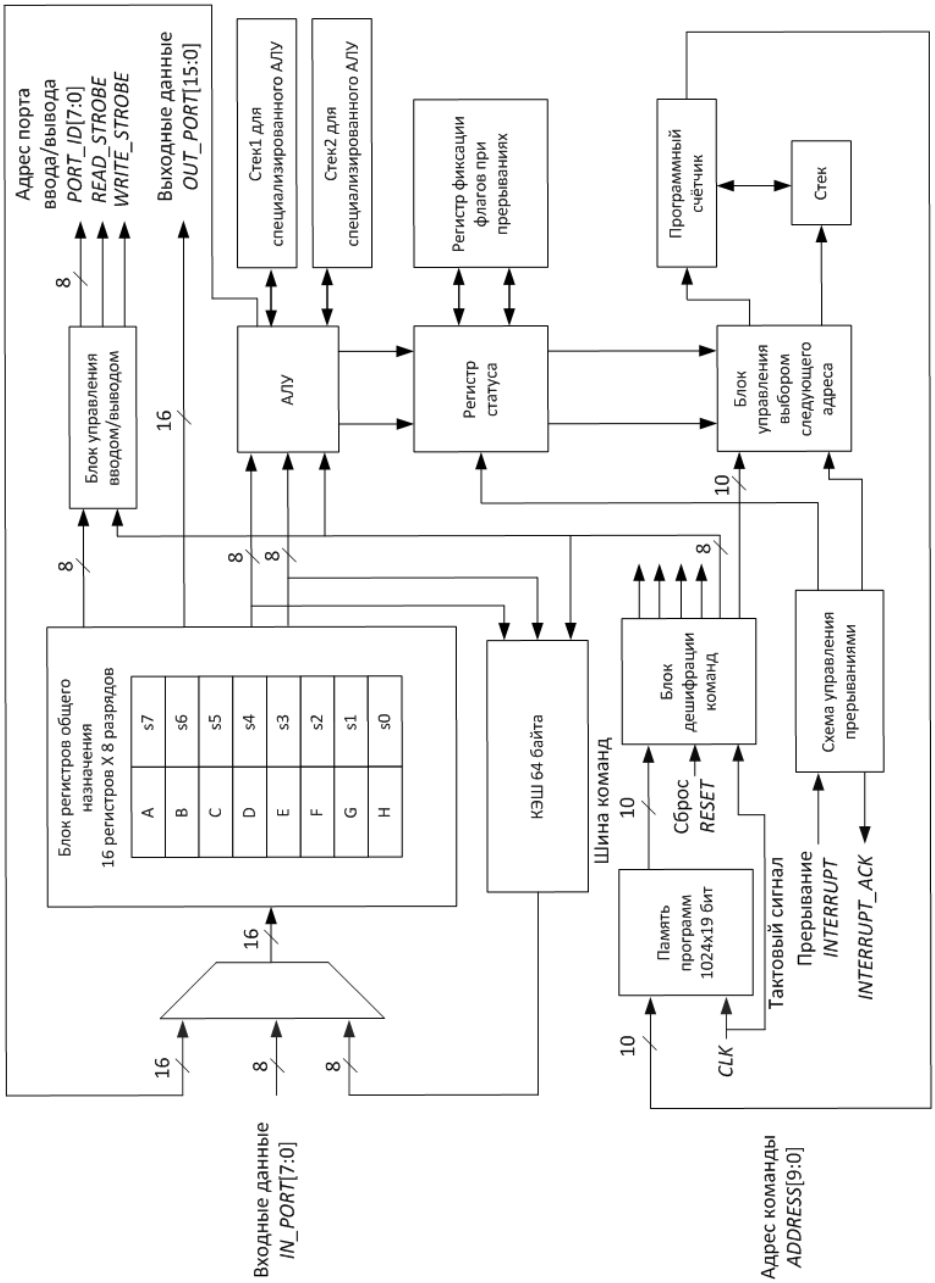


Рис. 2. Архитектура модуля стандартного soft-процессора

Функциональный блок умножения больших чисел (устройство умножения арифметико-логического устройства (АЛУ) – рис. 2) выполнен на основе алгоритма Карацубы [2]. Данный алгоритм поддерживает эффективную работу с числами в диапазоне от 1024 до 4096 разрядов [2].

1. Формальное описание функционального блока умножения с помощью теории недетерминированных автоматов

На основании исследований, представленных в [3–5], составляется математическая модель функционального блока умножения (рис. 3).

События (рис. 3) представляют собой состояния недетерминированного автомата в i единицу времени:

S_p – сравнение с порогом;

S_{mux} – простое умножение;

S_r – разбиение на две части;

S_a – число a, равное левой половине числа A;

S_b – число b, равное правой половине числа A;

S_c – число c, равное левой половине числа B;

S_d – число d, равное правой половине числа B;

S_{s1} – сумма чисел a и b;

S_{s2} – сумма чисел c и d;

S_{T1} – находим T, которое равно половине от разрядности входных чисел;

ус1 – управляющий сигнал 1;

ус2 – управляющий сигнал 2;

кон – сигнал об окончании промежуточного умножения;

$S_{\text{сч}}$ – считывание значений A и B;

$S_{\text{ст1}}$ – стек 1;

$S_{\text{ст2}}$ – стек 2;

$S_{\text{тк}}$ – считанное значение из стека 1 является числом;

$S_{\text{код}}$ – считанное значение из стека 1 является значением КОД;

S_1 – первое значение сверху в стеке 2;

S_2 – второе значение сверху в стеке 2;

S_3 – третье значение сверху в стеке 2;

S_4 – вычитание из S_2 Значения S_3;

S_k – вычисление значения k;

$S_{\text{сд}}$ – сдвиг влево на $S_{\text{т1}}$ разрядов;

$S_{\text{м}}$ – суммирование со значением S_1;

S_{mx} – суммирование – значение умножения для чисел, которые меньше порога;

$c1 \ldots c6$ – сигналы для соблюдения последовательности действий при промежуточном умножении;

$S_{\text{сох}}$ – сохранение результата в стеке 2;

Ответ – вывод ответа.

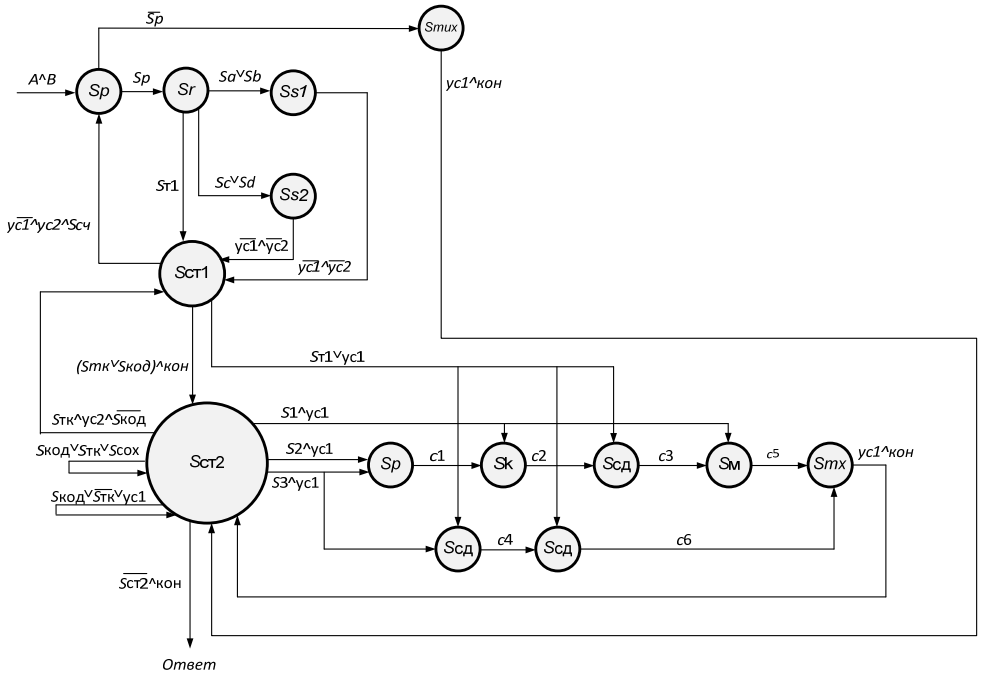


Рис. 3. Математическая модель функционального блока умножения больших чисел

Для последующей программной и схемотехнической реализации функционального блока умножения в рамках soft-процессора на основе описанных состояний и рис. 3 составим систему канонических уравнений алгоритма умножения больших чисел:

$$S_p(t+1) = (A \wedge B) \vee S_{\text{ст1}} \wedge (\overline{\text{yc1}} \wedge \text{yc2} \wedge S_{\text{сч}}),$$

$$S_r(t+1) = S_p,$$

$$S_{s1}(t+1) = S_r \wedge (S_a \vee S_b),$$

$$S_{s2}(t+1) = S_r \wedge (S_c \vee S_d),$$

$$S_{mux}(t+1) = \overline{S_p},$$

$$S_{\text{ст1}}(t+1) = (S_r \wedge S_{m1}) \vee (S_{s1} \wedge S_{s1}) \cdot (\overline{\text{yc1}} \wedge \overline{\text{yc2}}) \vee S_{\text{ст2}} \wedge (S_{\text{тк}} \wedge \text{yc2} \wedge \overline{S_{\text{код}}}),$$

$$S_{\text{ст2}}(t+1) = S_{\text{ст1}} \wedge ((S_{\text{тк}} \vee S_{\text{код}}) \wedge \text{кон}) \vee (S_{mx} \wedge S_{mux}) \wedge (\text{yc1} \wedge \text{кон}) \vee S_{\text{ст2}} \wedge$$

$$\wedge (S_{\text{код}} \vee \overline{S_{\text{тк}}} \vee \text{yc1}) \vee S_{\text{ст2}} \wedge (S_{\text{код}} \vee S_{\text{тк}} \vee S_{\text{сох}}),$$

$$S_p(t+1) = S_{\text{ст2}} \wedge (S_2 \wedge S_3 \wedge \text{yc1}),$$

$$S_k(t+1) = S_p \wedge c1 \vee S_{\text{ст2}} \wedge (S_1 \vee \text{yc1}),$$

$$S_{\text{сд}}(t+1) = (S_k \wedge c2 \vee S_{\text{ст2}} \wedge (S_3 \vee \text{yc1}) \vee S_{\text{сд}} \wedge c4) \wedge S_{\text{ст1}} \wedge (S_{m1} \vee \text{yc1}),,$$

$$S_m(t+1) = S_{\text{сд}} \wedge c2 \wedge S_{\text{ст2}} \wedge S_1 \wedge \text{yc1},$$

$$S_{mx}(t+1) = S_m \wedge c5 \wedge S_{\text{сд}} \wedge c6\,,$$

$$\text{Ответ}(t+1) = \overline{S_{\text{ст}2}} \wedge \text{кон}.$$

2. Схемотехническое описание функционального блока умножения

Формальное математическое описание и материал [6] позволяют реализовать следующую схему функционального блока умножения (рис. 4).

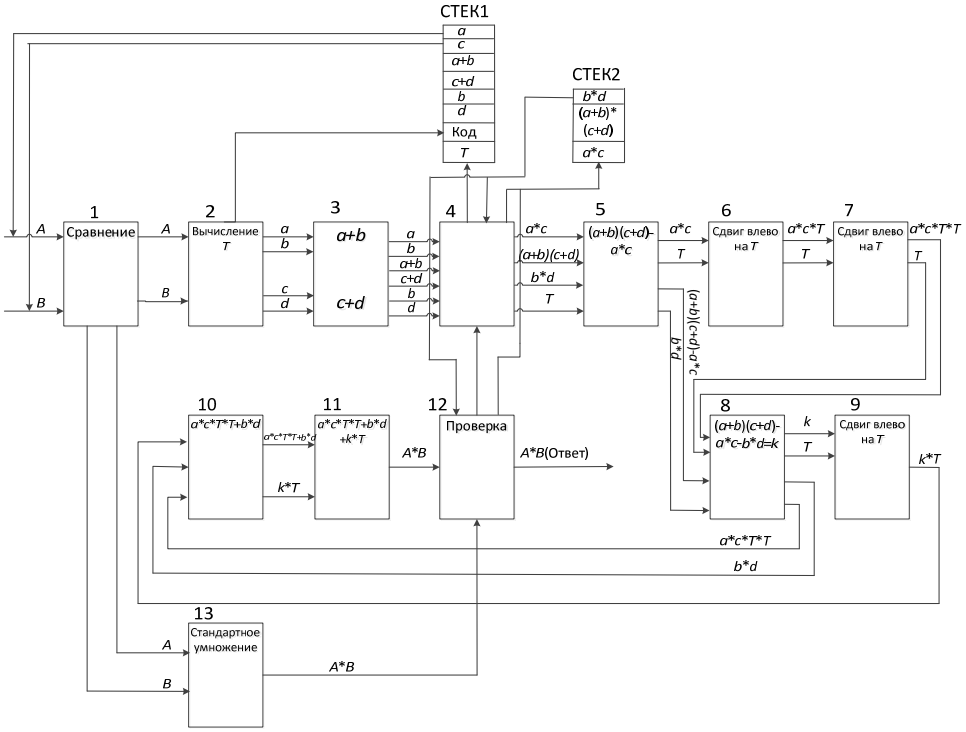


Рис. 4. Схемотехническая реализация функционального блока умножения

Устройство (рис. 4) работает следующим образом: исходные данные A и B подаются на информационные входы блока 1, где данные сравниваются с пороговым значением P (порог задается исходя из потребностей реализации) и если они превышают его, то A и B передаются в блок 2, иначе данные коммутируются в блок 13, где обрабатываются по правилам чисел с малой разрядностью (рис. 5). В блоке 2 данные разбиваются на части: A разбивается на a и b, B разбивается на c и d (рис. 6). После чего определяется разрядность полученных промежуточных значений: a, b, c, d. Далее полученные промежуточные результаты блока 2 (a, b, c, d) поступают в блок 3. В блоке 3 производится сложение поступивших данных по формулам: $A1 = a + b$, $B1 = c + d$ (рис. 7). Далее данные поступают в блок 4, где в зависимости от значений управляющих сигналов происходит работа с запоминающим устройством.

Поступившие промежуточные результаты обрабатываются блоком 5 по формуле $C1 = A1 \cdot B1 - a \cdot c$. Далее данные передаются в блок 6, где происходит их сдвиг на половину значащих разрядов большего числа. В блоке 7 происходит повторный сдвиг полученного в блоке 6 числа (рис. 8).

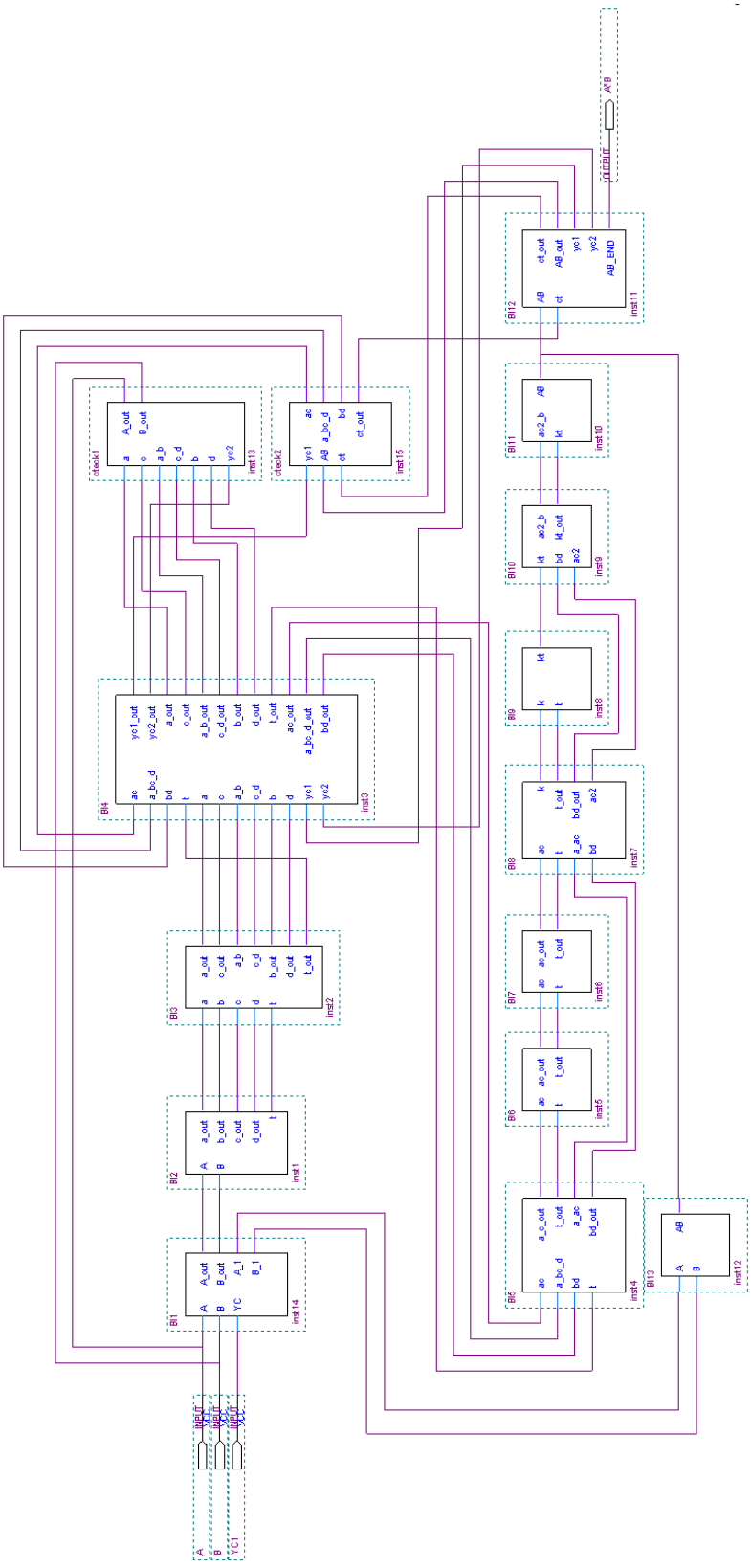


Рис. 5. Схема функционального блока умножения (реализация *Altera Quartus*)

Затем в блоке 8 происходит вычисление по формуле $C1 = C1 - b \cdot d$. Далее в блоке 9 происходит сдвиг числа, полученного в блоке 8, на половину значащих разрядов большего числа. В следующем блоке 10 происходит вычисление по формуле $C2 = a \cdot c \cdot T^2 + b \cdot d$. Результаты, вычисленные в предыдущих блоках ($C1$ и $C2$), суммируются в блоке 11 и на выходе получается конечный результат.

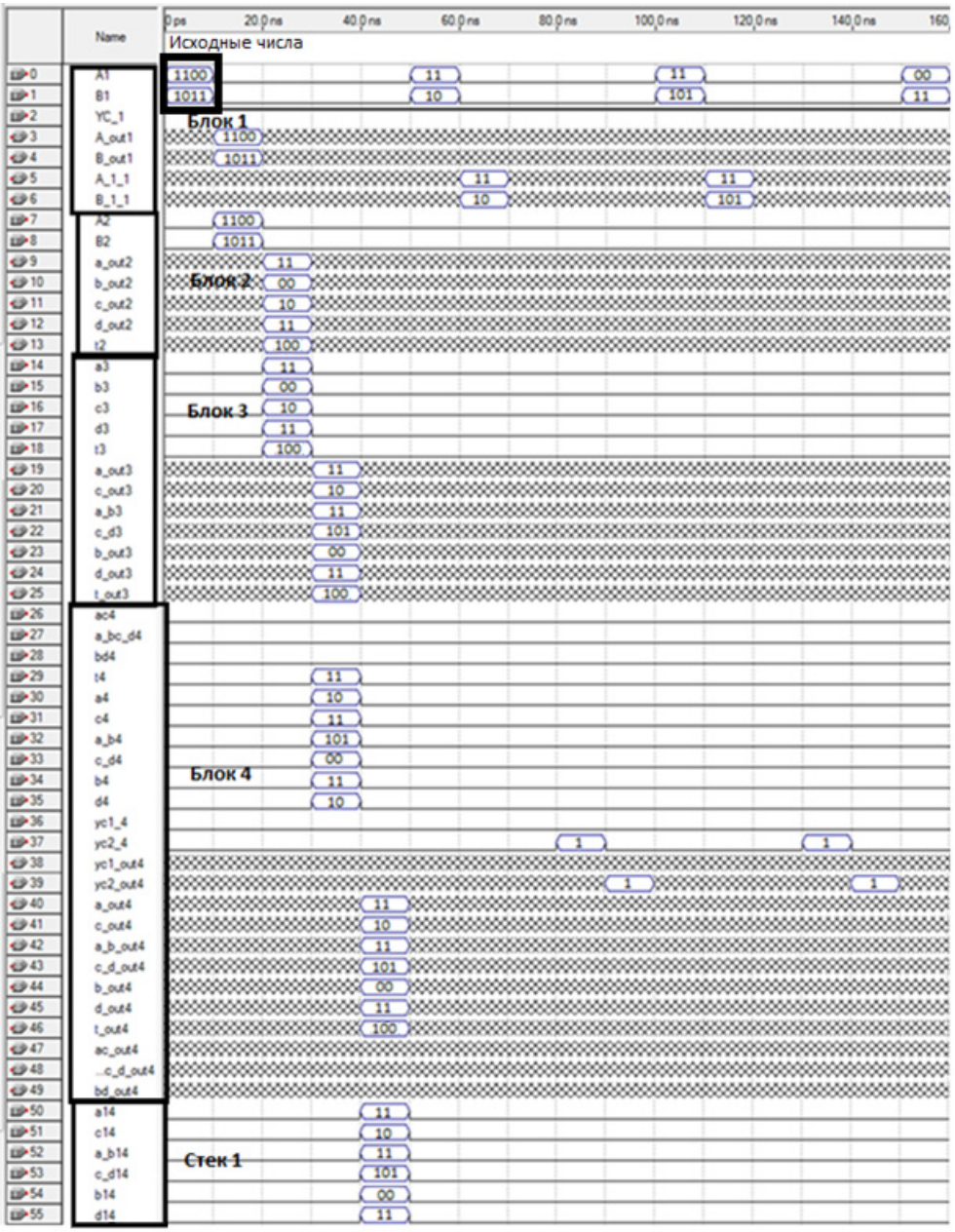


Рис. 6. Временные диаграммы работы функционального блока умножения больших чисел

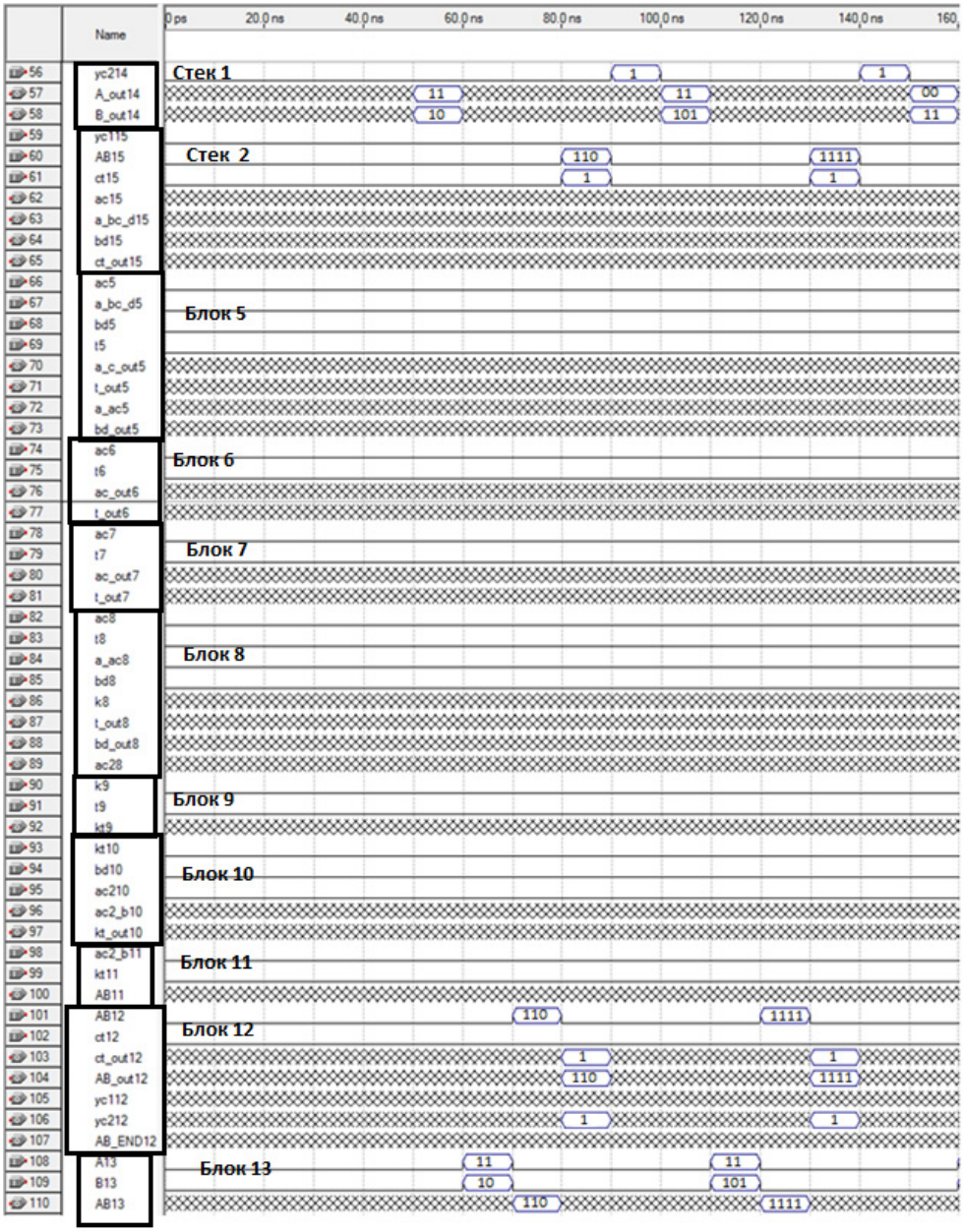


Рис. 7. Временные диаграммы работы функционального блока умножения больших чисел

3. Реализация разработанного устройства в САПР ALTERA QUARTUS

Выбор ALTERA QUARTUS 12.0 связан с тем, что САПР обеспечивает минимальное время компиляции [7], что позволяет разработчикам сосредоточиться на вопросах внедрения инноваций в конечное решение и оптимизации процесса разработки. По сравнению с аналогичными продуктами при использовании данного САПР пользователи серии ПЛИС для работы с soft-ядрами могут достичь сокращения времени компиляции проекта на 35 %, что важно

при реализации масштабных проектов (реализация параллельных и распределенных сред, многомерные систолические структуры и т.д.).

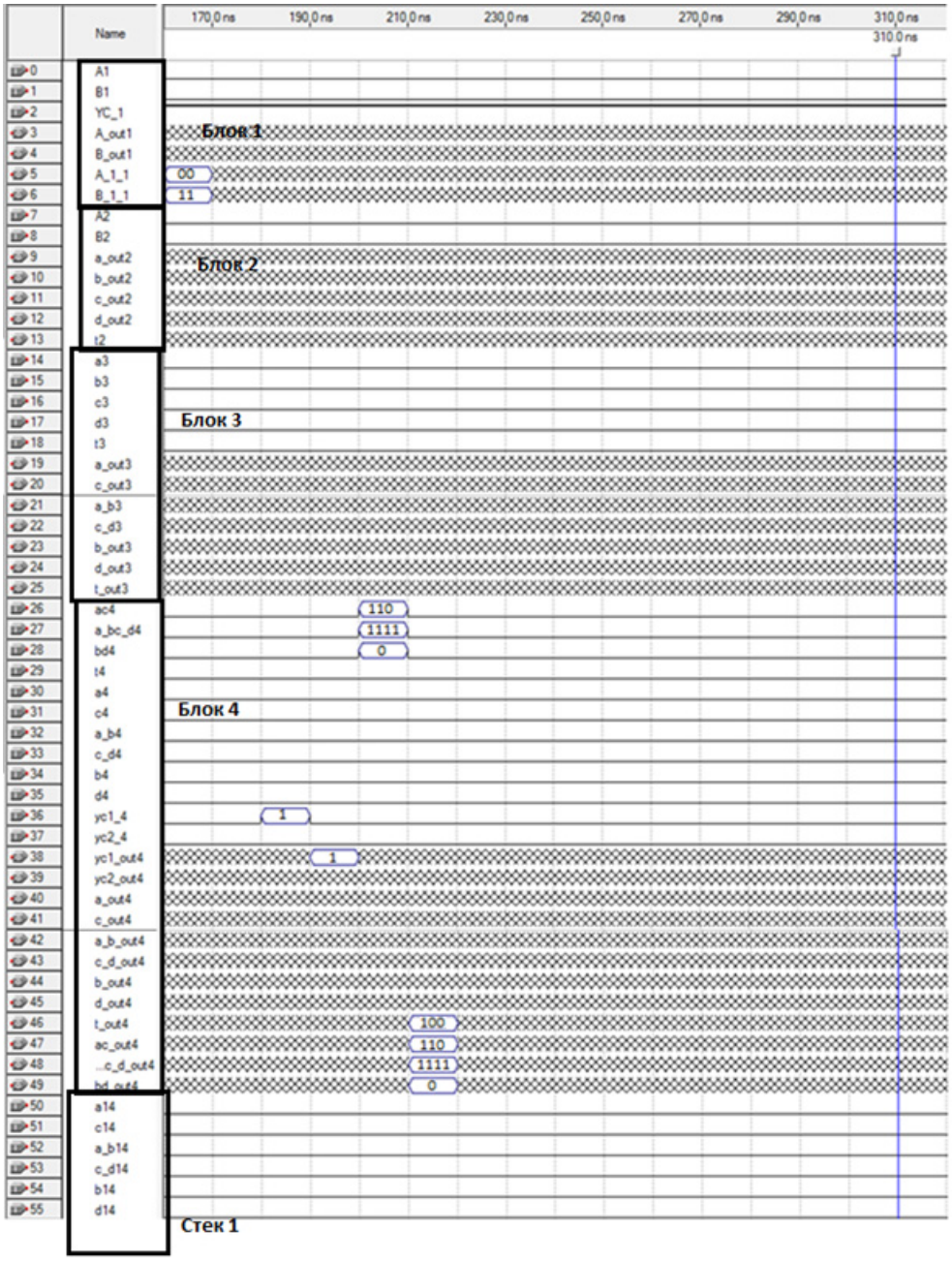


Рис. 8. Временные диаграммы работы функционального блока умножения больших чисел

В результате реализация вышеописанного функционального блока была произведена с использованием САПР *ALTERA Quartus*. Корректность работы разработанного устройства проверена имитационным макетированием

блока умножения с помощью временных диаграмм (рис. 9). Исходные данные: A=1100, B=1011, порог равен 2.

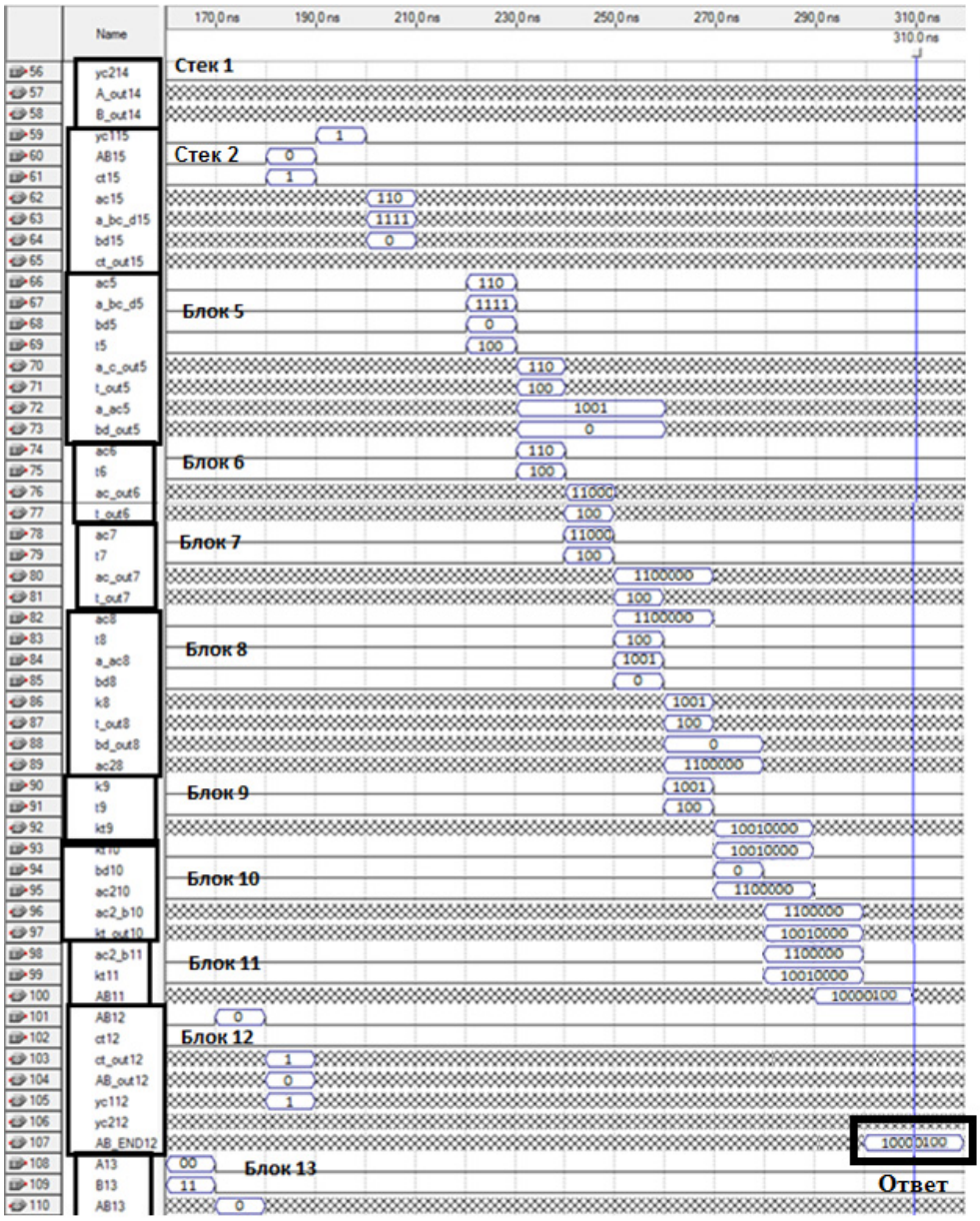


Рис. 9. Временные диаграммы работы функционального блока умножения больших чисел

Заключение

Требуется отметить, что данный вид устройств относится к классу специфических и узконаправленных [6], так как под каждую конкретную задачу составляется свое soft-ядро. Вместе с тем в мире вычислительной техники всегда найдутся задачи, для которых потребуется реализация нетривиальных и в чем-то уникальных вычислительных систем.

Список литературы

1. URL: https://www.altera.com/
2. **Карацуба, Е. А.** Быстрые алгоритмы и метод БВЕ / Е. А. Карацуба. – М. : Вильямс, 2008. – 341 с.
3. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки : учеб. пособие / Н. П. Вашкевич. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2004. – 280 с.
4. **Вашкевич, Н. П.** Формальное описание алгоритма управления взаимодействующими параллельными процессами в задаче «производители–потребители» с использованием кольцевого согласующего буфера / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, А. А. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 98–106.
5. **Федюнин, Р. Н.** Функциональные блоки АЛУ для конвейерно-параллельной обработки информации на базе однородных вычислительных структур / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 32–41.
6. **Федюнин, Р. Н.** Способ реализации аппаратного слоя VLIW архитектуры на базе систолических структур / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 15–22.

References

1. Available at: https://www.altera.com/
2. Karatsuba E. A. *Bystrye algoritmy i metod BVE* [Fast algorithms and the FEE method]. Moscow: Vil'yams, 2008, 341 p.
3. Vashkevich N. P. *Nedeterminirovannye avtomaty v proektirovanii sistem parallel'noy obrabotki: ucheb. posobie* [Non-deterministic automata in parallel processing system design]. Penza: Izd-vo PGU, 2004, 280 p.
4. Vashkevich N. P., Biktashev R. A., Tarakanov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 4, pp. 98–106.
5. Fedyunin R. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 32–41.
6. Fedyunin R. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2013, no. 2 (26), pp. 15–22.

Федюнин Роман Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра вычислительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: frn_penza@mail.ru

Fedyunin Roman Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of computer engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.272.42

Федюнин, Р. Н.

Блок арифметико-логического устройства для реализации умножения больших чисел / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 29–40. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-3

УДК 004.9, 378.1
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-4

Т. В. Андреева, М. В. Кузнецова

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ И ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ СТУДЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Необходимость решения высшими учебными заведениями задач развития научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов и формирования систем поиска и отбора талантливой молодежи, имеющей способности к научному творчеству и стремление работать в сфере образования, науки и инноваций, выдвигает в ряд актуальных вопросов создание способов и средств вовлечения студентов в научную и инновационную деятельность. Одним из эффективных способов стимулирования развития студенческой науки в вузах является создание системы научных мероприятий конкурсного характера, при этом наиболее важной задачей становится обеспечение объективной экспертной оценки научно-исследовательских работ и инновационных проектов, представленных студентами на вузовские научные конкурсы, выставки, олимпиады и конференции. Это и определило цель настоящего исследования – разработку методики оценки качества студенческих научных работ и инновационных проектов для совершенствования процедур экспертного оценивания.

Материалы и методы. Исследование проводилось на основе конкурсной документации и материалов студенческих научных мероприятий, проведенных в 2014–2015 гг. в Пензенском государственном технологическом университете. Для решения поставленной задачи использовались методы экспертного оценивания с применением аппарата теории нечетких множеств.

Результаты. Предложена универсальная иерархическая система критериев, позволяющая производить оценивание качества любых научно-исследовательских работ и инновационных проектов студентов, представленных на различные конкурсные мероприятия. Разработана методика оценки качества студенческих научных работ, отличающаяся применением нечетко-множественной модели, что позволяет усовершенствовать процедуры экспертного оценивания.

Выводы. Применение предлагаемой методики позволяет повысить объективность оценки научно-исследовательских работ и инновационных проектов студентов, обеспечить информационную поддержку процесса принятия решений при проведении конкурсных мероприятий научного и инновационного характера для студентов.

Ключевые слова: научно-исследовательская работа, инновационный проект, студент, качество, экспертная оценка, нечеткое множество.

T. V. Andreeva, M. V. Kuznetsova

QUALITY EVALUATION TECHNIQUE FOR STUDENTS' SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATIVE PROJECTS BASED ON FUZZY SETS

Abstract.

Background. At the present time universities need to solve problems of developing the students' research and innovative activities and forming the search and selection system of talented youth having scientific creativity and the desire to work in education, science and innovations. This raises a number of topical issues regarding ways and means of involving students in scientific and innovative activities. One of the effective ways to activate the development of students' science at universities is to create a system of scientific events of competitive nature, the most important task is to provide objective expert evaluation of scientific research and innovative projects presented by students in university scientific competitions, exhibitions, competitions and conferences. These determine the objective of this study - to develop methods of quality assessment of student's scientific works and innovative projects for improvement of expert assessment procedures.

Materials and methods. The study was performed on the basis of contest data and materials of students' scientific competitions in 2014–2015 at Penza State Technological University. To solve this problem the authors applied methods of expert evaluation using the fuzzy set theory technique.

Results. A universal hierarchical system of criteria allowing to carry out quality evaluation of any students' scientific research and innovation projects presented at various competitive events has been proposed. The technique of quality evaluation of students' scientific works using a fuzzy set model that allows to improve procedures of expert estimation has been developed.

Conclusions. The proposed technique allows to increase the objectivity of students' research works and innovation projects evaluation, to provide the information support to decision making process in scientific and innovative competitive events for students.

Key words: research work, innovative project, student, quality, expert evaluation, fuzzy set.

Введение

Концепция Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2014–2020 гг. [1] в качестве одной из основных целей обозначает «стимулирование притока талантливой молодежи и закрепление в сфере науки, образования и высоких технологий...». Для достижения указанной цели в рамках группы мероприятий «Популяризация среди молодежи научной и творческой деятельности, выявление талантливой молодежи» предусматриваются «организация и проведение всероссийских и международных молодежных научных конференций, олимпиад и конкурсов», «обеспечение развития системы научно-технического творчества молодежи».

Расширение масштабов вовлечения молодежи в научно-исследовательскую и инновационную деятельность достигается в вузе в числе прочего за счет создания системы конкурсных научных мероприятий для студентов. Организация вузовских студенческих научных конференций, конкурсов, выставок и олимпиад позволяет повысить эффективность научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов вуза, осуществить отбор лучших студенческих научных и инновационных проектов для представления на конкурсных мероприятиях более высокого уровня – региональных, всероссийских и международных. При этом необходимо обеспечить максимальную объективность оценки качества научно-исследовательских работ (НИР) и ин-

новационных проектов (ИП) студентов. Решение проблемы оценивания НИР и ИП студентов предполагает формирование универсальной иерархической системы критериев качества, позволяющей производить оценку по различным аспектам, разработку математической модели, предоставляющей возможность описать слабоформализованные объекты оценки, а также методики определения интегрального показателя качества НИР и ИП с учетом многокритериальности данной задачи.

1. Система показателей качества НИР и ИП студентов

Оценивание качества НИР и ИП студентов имеет свои особенности, связанные прежде всего с многообразием видов и форм конкурсных мероприятий для студентов. Во-первых, большинство мероприятий имеют полидисциплинарный характер, т.е. на них принимаются работы по различным укрупненным направлениям знаний. Во-вторых, мероприятия различаются по видам, это может быть конференция (симпозиум, семинар), конкурс научно-исследовательских работ или инновационных проектов, выставка научно-технического творчества молодежи, олимпиада, конкурс грантов. В-третьих, номинации мероприятий также различны, это могут быть номинации на лучший доклад, лучшую НИР или ИП, лучшую выпускную квалификационную работу и т.п. В-четвертых, различаются форматы проведения: мероприятие может проводиться в один этап (заочный или очный) или в два этапа (и заочный, и очный). В этих условиях первоочередной задачей становится разработка универсальной системы показателей, характеризующей все аспекты качества НИР или ИП и позволяющей дать оценку любой студенческой работы.

Критерии оценки НИР и ИП студентов, как правило, определяются положением о конкурсном мероприятии. Ранее [2] на основе анализа конкурсной документации различных научных мероприятий для молодежи (в частности, требований положения об открытом конкурсе на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам, положения о ежегодной всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ», положения о программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса – У.М.Н.И.К.» и др.) была предложена универсальная оценочная система, характеризующая все аспекты качества НИР или ИП. Система включает пять основных показателей; каждый основной показатель в свою очередь характеризуется набором частных критериев качества (табл. 1).

Универсальная система критериев позволяет произвести оценивание любой студенческой работы посредством выбора председателем экспертного совета показателей оценки НИР или ИП в соответствии с конкурсной документацией конкретного студенческого мероприятия.

2. Методика оценки качества НИР и ИП студентов

Основу методики оценивания качества НИР и ИП студентов способен составить алгоритм нечетко-множественной классификации, предложенный А. О. Недосекиным [3], являющийся одним из самых гибких, достоверных и хорошо зарекомендовавшим себя при решении социально-экономических задач [4, 5]. В приложении к поставленной задаче методика включает этапы, описанные ниже.

Таблица 1

Система критериев качества НИР и ИП студентов

Основной показатель	Частный критерий
1	2
Y^1 – актуальность и обоснованность задачи исследования	Y_1^1 – уровень обоснования важности исследования для решения реальных проблем
	Y_2^1 – качество формулировки цели и задач исследования, выводов по работе
	Y_3^1 – качество выделения объекта, предмета и гипотезы исследования
	Y_4^1 – уровень обоснования выбора методов и программы исследования
	Y_5^1 – полнота литературного обзора
Y^2 – научная новизна, теоретический и прикладной уровень выполненной работы	Y_1^2 – достоверность и обоснованность установленных фактов, проведенных расчетов и полученных данных
	Y_2^2 – теоретическая и практическая значимость исследования
	Y_3^2 – научная новизна решаемой задачи и полученных результатов
	Y_4^2 – глубина проработанности темы исследования
	Y_5^2 – реализация результатов исследования
	Y_6^2 – область применения и перспективы исследования
Y^3 – инновационная составляющая	Y_1^3 – сравнение с существующими аналогами, выявление конкурентных преимуществ
	Y_2^3 – техническая значимость продукции
	Y_3^3 – возможность коммерциализации проекта
	Y_4^3 – наличие плана реализации проекта
	Y_5^3 – состояние разработки
	Y_6^3 – исследование рынка
	Y_7^3 – экономическая эффективность проекта
Y^4 – научная компетентность автора	Y_1^4 – уровень публикаций по теме исследования
	Y_2^4 – патентная чистота исследования
	Y_3^4 – полученные награды по теме исследования
	Y_4^4 – полнота обоснования авторской позиции
	Y_5^4 – степень самостоятельности выполнения работы
	Y_6^4 – личностные качества автора

Окончание табл. 1

1	2
Y^5 – качество представления результатов работы	Y_1^5 – грамотность изложения
	Y_2^5 – культура выступления
	Y_3^5 – качество разработки презентации
	Y_4^5 – качество иллюстративного материала
	Y_5^5 – качество ответов на вопросы

1. Формирование системы показателей $\{Y_i^k\}$ качества НИР и ИП. На рис. 1 верхнему уровню соответствует интегральный показатель качества Y^0, следующему уровню – основные показатели Y^k, нижнему уровню – частные критерии Y_i^k.

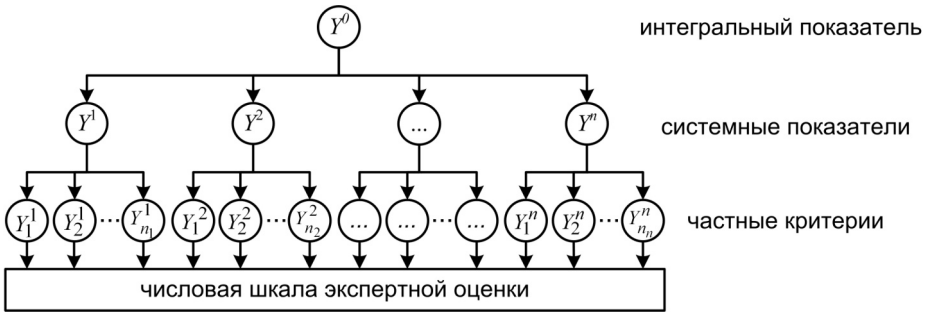


Рис. 1. Иерархическая система оценки качества НИР и ИП студентов

2. Определение весовых коэффициентов показателей. Экспертами – членами жюри конкурсного мероприятия – производится ранжирование показателей (первый по значимости критерий имеет ранг 1). Вес α_i показателя Y_i определяется по правилу Фишберна:

$$\alpha_i = \frac{2(n - r_i + 1)}{(n+1)n},$$

где r_i – ранг i-го показателя; n – количество показателей.

При этом производится проверка согласованности экспертных оценок, для чего используется коэффициент множественной ранговой корреляции (конкордации):

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где $S = \sum_{j=1}^{n}\left(\sum_{i=1}^{m} r_{ij} - \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} r_{ij}\right)^2$ – сумма квадратов отклонений суммы рангов r_{ij} каждого показателя от их средней величины; m – количество экспертов.

При наличии одинаковых рангов в ранговой последовательности одного эксперта коэффициент конкордации рассчитывается по формуле

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n) - m\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{l}(t_k^3 - t_k)},$$

где t_k – число одинаковых значений в k -й группе (связке); l – число связок (групп с одинаковыми значениями) в ранговой последовательности i -го эксперта.

В зависимости от степени согласованности мнений экспертов коэффициент конкордации может принимать значения от 0 (при полном отсутствии совпадений мнений экспертов) до 1 (при полном совпадении всех ранговых последовательностей экспертов).

Для определения значимости коэффициента конкордации используется критерий Пирсона «хи-квадрат». Для проверки нулевой гипотезы $h_0 : W = 0$ (мнения экспертов не согласованы) при альтернативной $h_1 : W = 1$ (мнения экспертов согласованы) вычисляется эмпирическое значение $\chi^2 = m(n-1)W$, которое затем сравнивается с критическими $\chi^2_\alpha(n-1)$, вычисленными для числа степеней свободы $(n-1)$ и соответствующих уровней значимости α. Коэффициент конкордации значимо отличается от нуля ($p < 0,01$), если эмпирическое значение попадает в критическую область $\chi^2_{0,01}(n-1)$.

3. Определение лингвистических переменных и нечетких подмножеств. Полное множество уровней качества E студенческого проекта разбивается на пять подмножеств вида: E_1 – подмножество «очень низкое качество»; E_2 – подмножество «низкое качество»; E_3 – подмножество «среднее качество»; E_4 – подмножество «высокое качество»; E_5 – подмножество «очень высокое качество». Для произвольного показателя качества Y_i полное множество его значений B_i разбивается на пять подмножеств: B_{i1} – подмножество «очень низкий уровень»; B_{i2} – подмножество «низкий уровень»; B_{i3} – подмножество «средний уровень»; B_{i4} – подмножество «высокий уровень»; B_{i5} – подмножество «очень высокий уровень».

Лингвистическая переменная «Уровень показателя Y» имеет терм-множество значений «Очень низкий», «Низкий», «Средний», «Высокий», «Очень высокий». Для описания подмножеств терм-множества вводится система из пяти функций принадлежности трапецеидального вида (рис. 2) на носителе $U = [0;1]$:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & 0 \le x < 0,15, \\ 10(0,25 - x), & 0,15 \le x < 0,25, \\ 0, & 0,25 \le x \le 1; \end{cases} \quad \mu_2(x) = \begin{cases} 0, & 0 \le x < 0,15, \\ 10(0,15 - x), & 0,15 \le x < 0,25, \\ 1, & 0,25 \le x < 0,35, \\ 10(0,45 - x), & 0,35 \le x < 0,45, \\ 0, & 0,45 \le x \le 1; \end{cases}$$

$$\mu_3(x)=\begin{cases}0, & 0\le x<0,35,\\ 10(x-0,35), & 0,35\le x<0,45,\\ 1, & 0,45\le x<0,55,\\ 10(0,65-x), & 0,55\le x<0,65,\\ 0, & 0,65\le x\le 1;\end{cases}\quad \mu_4(x)=\begin{cases}0, & 0\le x<0,55,\\ 10(x-0,55), & 0,55\le x<0,65,\\ 1, & 0,65\le x<0,75,\\ 10(0,85-x), & 0,75\le x<0,85,\\ 0, & 0,85\le x\le 1;\end{cases}$$

$$\mu_5(x)=\begin{cases}0, & 0\le x<0,75,\\ 10(x-0,75), & 0,75\le x<0,85,\\ 1, & 0,85\le x\le 1.\end{cases}$$

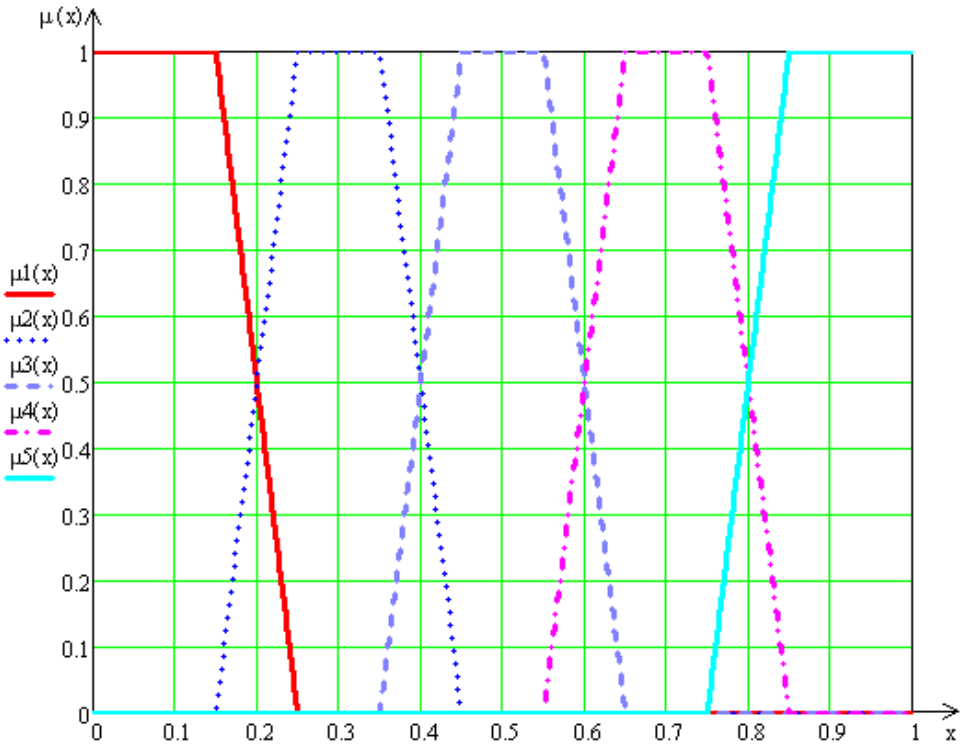


Рис. 2. Графики функций принадлежности

Вводится набор узловых точек $\sigma_i=\{0,1;0,3;0,5;0,7;0,9\}$, которые являются абсциссами максимумов соответствующих функций принадлежности и равномерно отстоят друг от друга на носителе $U=[0;1]$, а также симметричны относительно узла 0,5.

4. Классификация значений показателей и уровня показателей. Каждому частному показателю ставится в соответствие вербально-числовая шкала, например шкала Харрингтона (табл. 2), с помощью которой эксперт осуществляет субъективную оценку значения данного параметра.

Производится классификация текущих значений y_i частных показателей Y_i^k как критерий разбиения полного множества их значений на подмножества вида B (табл. 3).

Таблица 2

Вербально-числовая шкала Харрингтона

Лингвистическая оценка уровня	Числовые значения
Очень высокий	0,8–1,0
Высокий	0,64–0,8
Средний	0,37–0,64
Низкий	0,2–0,37
Очень низкий	0,0–0,2

Таблица 3

Классификация значений показателей

Пока-затель	Критерий разбиения по подмножествам				
	B_{i1}	B_{i2}	B_{i3}	B_{i4}	B_{i5}
Y_1^k	$0,0 \le y_1 < 0,2$	$0,2 \le y_1 < 0,37$	$0,37 \le y_1 < 0,64$	$0,64 \le y_1 < 0,8$	$0,8 \le y_1 \le 1,0$
Y_2^k	$0,0 \le y_2 < 0,2$	$0,2 \le y_2 < 0,37$	$0,37 \le y_2 < 0,64$	$0,64 \le y_2 < 0,8$	$0,8 \le y_2 \le 1,0$
…	…	…	…	…	…
Y_n^k	$0,0 \le y_n < 0,2$	$0,2 \le y_n < 0,37$	$0,37 \le y_n < 0,64$	$0,64 \le y_n < 0,8$	$0,8 \le y_n \le 1,0$

Производится классификация текущих значений y_i по критерию табл. 3. Результатом проведенной классификации является табл. 4, где $\lambda_{ij} = 1$, если $b_{i(j-1)} < y_i < b_{ij}$, и $\lambda_{ij} = 0$ в противном случае.

Таблица 4

Классификация уровня показателей

Показатель	Значение λ				
	$\lambda_1(y_i)$	$\lambda_2(y_i)$	$\lambda_3(y_i)$	$\lambda_4(y_i)$	$\lambda_5(y_i)$
Y_1^k	$\lambda_{11}(y_1)$	$\lambda_{12}(y_1)$	$\lambda_{13}(y_1)$	$\lambda_{14}(y_1)$	$\lambda_{15}(y_1)$
Y_2^k	$\lambda_{21}(y_2)$	$\lambda_{22}(y_2)$	$\lambda_{23}(y_2)$	$\lambda_{24}(y_2)$	$\lambda_{25}(y_2)$
…	…	…	…	…	…
Y_n^k	$\lambda_{n1}(y_n)$	$\lambda_{n2}(y_n)$	$\lambda_{n3}(y_n)$	$\lambda_{n4}(y_n)$	$\lambda_{n5}(y_n)$

5. Определение значений основных и интегрального показателей. Значение каждого из основных показателей Y^k определяется по формуле двойной свертки: $Y^k = \sum_{i=1}^{n_k} \alpha_{ki} \sum_{j=1}^{5} \sigma_j \lambda_{ij}(y_i)$, где σ_j – узловые точки стандартного классификатора; α_{ki} – вес частного критерия в свертке. Количественное значение интегрального показателя определяется по формуле $Y^0 = \sum_{k=1}^{N} \alpha_k \sum_{j=1}^{5} \sigma_j \mu_{kj}(Y^k)$, где $\mu_{kj}(Y^k)$ – значение функции принадлежности

j-го качественного уровня относительно текущего значения k-го основного показателя; α_k – вес основного показателя.

3. Применение методики оценки качества НИР и ИП студентов

Этапы предложенной методики проиллюстрируем на примере оценки конкретного студенческого ИП, представленного на конкурс грантов по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса – У.М.Н.И.К.».

1. В качестве системы показателей оценивания взята универсальная система, представленная в табл. 1. При этом конкретному ИП студента экспертами дана следующая (усредненная) оценка качества: Y_1^1 – низкое, Y_2^1, Y_3^1 – среднее, Y_4^1 – низкое, Y_5^1 – высокое; Y_1^2 – низкое, Y_2^2, Y_3^2, Y_4^2, Y_5^2 – среднее, Y_6^2 – высокое; Y_1^3 – очень высокое, Y_2^3 – среднее, Y_3^3, Y_4^3, Y_5^3 – высокое, Y_6^3, Y_7^3 – очень высокое; Y_1^4 – среднее, Y_2^4 – высокое, Y_3^4 – среднее, Y_4^4 – низкое, Y_5^4 – высокое, Y_6^4 – очень высокое; Y_1^5 – высокое, Y_2^5 – очень высокое, Y_3^5 – высокое, Y_4^5 – среднее, Y_5^5 – высокое.

2. В результате определения весовых коэффициентов основных показателей десятью экспертами получены следующие значения: $\alpha_1 = 0{,}2$; $\alpha_2 = 0{,}267$; $\alpha_3 = 0{,}333$; $\alpha_4 = 0{,}133$; $\alpha_5 = 0{,}067$. Весовые коэффициенты частных критериев представлены в табл. 5.

Таблица 5

Показатель	Вес	Значение λ				
		$\lambda_1(y_i)$	$\lambda_2(y_i)$	$\lambda_3(y_i)$	$\lambda_4(y_i)$	$\lambda_5(y_i)$
1	2	3	4	5	6	7
Y_1^1	0,333	0	1	0	0	0
Y_2^1	0,267	0	0	1	0	0
Y_3^1	0,133	0	0	1	0	0
Y_4^1	0,2	0	1	0	0	0
Y_5^1	0,067	0	0	0	1	0
Y_1^2	0,19	0	1	0	0	0
Y_2^2	0,143	0	0	1	0	0
Y_3^2	0,095	0	0	1	0	0
Y_4^2	0,048	0	0	1	0	0
Y_5^2	0,238	0	0	1	0	0
Y_6^2	0,286	0	0	0	1	0
Y_1^3	0,214	0	0	0	0	1
Y_2^3	0,143	0	0	1	0	0

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7
y_3^3	0,179	0	0	0	1	0
y_4^3	0,036	0	0	0	1	0
y_5^3	0,071	0	0	0	1	0
y_6^3	0,107	0	0	0	0	1
y_7^3	0,25	0	0	0	0	1
y_1^4	0,238	0	0	1	0	0
y_2^4	0,286	0	0	0	1	0
y_3^4	0,095	0	0	1	0	0
y_4^4	0,048	0	1	0	0	0
y_5^4	0,143	0	0	0	1	0
y_6^4	0,19	0	0	0	0	1
y_1^5	0,267	0	0	0	1	0
y_2^5	0,2	0	0	0	0	1
y_3^5	0,133	0	0	0	1	0
y_4^5	0,067	0	0	1	0	0
y_5^5	0,333	0	0	0	1	0

3. Этап полностью соответствует описанному в методике.

4. Результаты проведенной фаззификации представлены в табл. 5.

5. В результате определения значений основных показателей получим $Y^1 = 0,407$; $Y^2 = 0,519$; $Y^3 = 0,786$; $Y^4 = 0,652$; $Y^5 = 0,727$; значение интегрального показателя – $Y^0 = 0,613$. Осуществив процесс дефаззификации, т.е. распознав полученный интегральный показатель с помощью используемого пятиуровневого классификатора на $[0;1]$-носителе, получаем

$$Y^0 = (0;0;0,366;0,634;0).$$

Таким образом, качество рассматриваемого студенческого ИП в целом оценено экспертами как «среднее» на 36,6 % и как «высокое» – на 63,4 %.

Заключение

Предложенная методика оценки качества студенческих научных работ позволяет производить оценивание качества практически любых студенческих научных работ, представленных на различные конкурсные мероприятия. Применение рассмотренной методики дает возможность усовершенствовать процедуры экспертного оценивания, повысить объективность оценки НИР и ИП, обеспечить информационную поддержку процесса принятия решений при проведении конкурсных мероприятий научного и инновационного ха-

рактера для студентов. Разработанные иерархическая система критериев и методика оценки качества студенческих научных работ с применением нечетко-множественной модели использованы при создании системы информационного сопровождения научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов в Пензенском государственном технологическом университете [6].

Список литературы

1. Концепция Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2014–2020 годы [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fcpk.ru/Attachment.aspx?Id=2895.
2. **Андреева, Т. В.** Экспертное оценивание качества научно-исследовательских работ и инновационных проектов студентов / Т. В. Андреева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 10 (14). – С. 76–82.
3. **Недосекин, А. О.** Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний : дис. … д-ра экон. наук : 08.00.13 / Недосекин А. О. – СПб., 2003. – 280 с.
4. **Костенко, С. А.** Сравнительный анализ существующих технологий оценки эффективности предприятий / С. А. Костенко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4 (42). – С. 241–248.
5. **Штырова, И. А.** Мониторинг качества вузовского дополнительного образования на основе интегрированных показателей : дис. … канд. техн. наук : 05.13.10 / Штырова И. А. – Астрахань, 2014. – 120 с.
6. **Андреева, Т. В.** Информационная система для организации научно-исследовательской и инновационной деятельности студентов вуза / Т. В. Андреева // Современные информационные технологии : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Вып. 19. – Пенза : Изд-во ПГТУ, 2014. – С. 220–225.

References

1. *Kontseptsiya Federal'noy tselevoy programmy «Nauchnye i nauchno-pedagogicheskie kadry innovatsionnoy Rossii» na 2014–2020 gody [Elektronnyy resurs]* [The conception of the Federal target-oriented program “Scientific and pedagogical manpower of innovative Russia” for 2014-2020 (Online resource)]. Available at: http://www.fcpk.ru/Attachment.aspx?Id=2895.
2. Andreeva T. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus* [XXI century: results of the past and problems of the future plus]. 2013, no. 10 (14), pp. 76–82.
3. Nedosekin A. O. *Metodologicheskie osnovy modelirovaniya finansovoy deyatel'nosti s ispol'zovaniem nechetko-mnozhestvennykh opisaniy: dis. d-ra ekon. nauk: 08.00.13* [Methodological foundations of financial activity simulation using fuzzy-set descriptions: dissertation to apply for the degree of the doctor of economic sciences]. Saint-Petersburg, 2003, 280 p.
4. Kostenko S. A. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of contemporary science and practice. University named after V.I. Vernadsky]. 2012, no. 4 (42), pp. 241–248.
5. Shtyrova I. A. *Monitoring kachestva vuzovskogo dopolnitel'nogo obrazovaniya na osnove integrirovannykh pokazateley: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.10* [University additional education quality monitoring on the basis of integrated indexes: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Astrakhan, 2014, 120 p.
6. Andreeva T. V. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: sb. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: proceedings of the International scientific and technical conference]. Issue 19. Penza: Izd-vo PGTU, 2014, pp. 220–225.

Андреева Татьяна Владимировна
начальник отдела подготовки научных кадров, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, проезд Байдукова, 1а)

E-mail: atv@pgta.ru

Кузнецова Марина Владимировна
кандидат технических наук, доцент, кафедра информационно-вычислительных систем, начальник научно-инновационного управления, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: kmvnio@yandex.ru

Andreeva Tat'yana Vladimirovna
Head of the scientific personnel training unit, Penza State Technological University (1a Baydukova lane, Penza, Russia)

Kuznetsova Marina Vladimirovna
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of data-processing systems, head of the innovation and research division, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.9, 378.1
Андреева, Т. В.
Методика оценивания качества научно-исследовательских работ и инновационных проектов студентов на основе нечетких множеств / Т. В. Андреева, М. В. Кузнецова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 41–52. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-4

УДК 004.946
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-5

А. Ю. Тычков

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация.

Актуальность и цели. Виртуальные медицинские диагностические системы предназначены для освоения операций по основам функциональной диагностики и техническому обслуживанию оборудования на персональных компьютерах. Показана возможность разработки новых медицинских систем в условиях виртуальной реальности с использованием пакета прикладных программ Biomedical Toolkit.

Материалы и методы. Для разработки виртуальных медицинских диагностических систем используется среда графического проектирования Biomedical Toolkit, а также основы схемотехнического проектирования изделий медицинского назначения.

Результаты. Приведена классификация медицинских симуляторов, их достоинства и недостатки. На основе среды графического проектирования виртуальных медицинских систем Biomedical Toolkit продемонстрированы возможности разработки виртуальных медицинских диагностических симуляторов на персональных компьютерах. Показаны основные достоинства предлагаемой среды графического проектирования для разработки виртуальных медицинских диагностических систем.

Выводы. Предложенная концепция разработки виртуальных медицинских диагностических систем с использованием приложения Biomedical Toolkit является готовым решением для работы с медицинскими данными и оперативного анализа сигналов сложной формы.

Ключевые слова: среда графического проектирования, виртуальная реальность, сигналы сложной формы

A. Yu. Tychkov

APPLICATION OF VIRTUAL DESIGN TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF MEDICAL DIAGNOSTIC SYSTEMS

Abstract.

Background. Virtual medical diagnostic systems are designed for mastering the basics of functional diagnostics operations and maintenance of equipment on personal computers. The article shows a possibility of developing new medical systems in virtual reality using the Biomedical Toolkit applications

Materials and methods. To design virtual medical diagnostic systems, the Biomedical Toolkit graphic development environment, as well as the basics of circuit design of medical products, were used.

Results. A classification of medical simulators has been given, their advantages and disadvantages have been shown. The feasibility of virtual medical diagnostic simulators development on personal computers using the Biomedical Toolkit graphic development environment for health systems has been demonstrated. The basic

advantages of the proposed graphic development environment for the design of virtual medical diagnostic systems have been shown.

Conclusions. The proposed concept of the development of virtual medical diagnostic systems using the Biomedical Toolkit applications is a ready solution for medical data handling and operational analysis of complex waveforms.

Key words: graphical development environment, virtual reality, complex waveforms.

Введение

Рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки виртуальных медицинских диагностических систем с использованием современных информационных технологий и программных продуктов компании National Instrument.

Для развития здравоохранения виртуальные медицинские диагностические системы помогут решить важные задачи [1–3]:

– повышение качества подготовки врачей и среднего медицинского персонала, в том числе технического, для обслуживания медицинской техники;

– повышение качества оказания медицинской помощи населению;

– рост удовлетворенности пациентов медицинским обслуживанием;

– развитие и совершенствование новых образцов медицинской техники на базе разработанных симуляторов.

Таким образом, разработка и совершенствование медицинских симуляторов является важной социально-экономической задачей.

Медицинские системы/симуляторы делятся на [4]: простые физические модели анатомических структур (модели костей и тренажеры) и сложные устройства, манекены с высокой механической и виртуальной реальностью.

Виртуальная реальность (в контексте известных медицинских систем) представляет собой имитацию физиологического состояния человека с сопровождением осязательной, акустической и тактильной информации о действиях, проводимых специалистом на симуляторе [5]. Существует множество видов виртуальных медицинских систем, предназначенных для различных направлений [1]: хирургия, гинекология и стоматология. Известные виртуальные медицинские системы для диагностических целей в большинстве своем относятся к категории визуализирующих, основанных на 3D-представлении исследуемых органов и тканей (например, ультразвуковые, томографические, лапараскопические и др.). Обзор измерительных (индикаторных и регистрируемых) диагностических систем/симуляторов показал, что на рынке они представлены единичными решениями: для измерения артериального давления (АД), кардиосигналов и энцефалографических сигналов и др. [6].

Все известные медицинские системы/симуляторы имеют определенные особенности, которые могут быть рассмотрены с точки зрения их достоинств и недостатков. Совместно с медицинским оборудованием используют манекены людей и отдельных частей организма. С точки зрения достоинств, манекены позволяют наглядно продемонстрировать сложный операционный процесс. С точки зрения недостатков, на первых курсах обучения будущим специалистам необходимо и достаточно правильно разбираться в технических (функциональных) возможностях оборудования еще до начала его применения в клинической практике. Адекватное применение диагностического оборудования специалистом позволит не только автоматизировать процесс изме-

рения, но и повысить оперативность и точность измерения основных параметров жизнедеятельности.

Предлагается разрабатывать в соответствии с формулированной проблемой виртуальные медицинские диагностические системы (ВМДС), включающие в себя виртуальные элементы и узлы регистрации и обработки кардиосигналов, энцефалографических и речевых сигналов, измерения артериального давления и пульса, а также узлы акустического воздействия (внешний раздражитель). Также разрабатываемые ВМДС могут быть использованы в качестве отдельных основных узлов, выполняющих функции кардиографа, энцефалографа, тонометра и аудиометра, на которых операции с манекенами полностью будут заменены на удобный понятийный интерфейс на персональном компьютере.

Разработанные ВМДС будут представлять собой готовые программные решения для использования обучающимися в медицинских учреждениях различного профиля, в том числе в симуляционных центрах, на персональных компьютерах или могут быть реализованы в виде программно-аппаратных медицинских систем на платформе PXI (PCI eXtensions for Instrumentation bus) National Instruments с использованием соответствующих библиотек: FPGA, Sound and Vibration, LabVIEW Multicore Analysis and Sparse Matrix Toolkit, LabVIEW Digital Filter Design Toolkit, LabVIEW Mathscript RT Module и DAQ Assistant.

Для разработки ВМДС предложено использовать среду разработки лабораторных виртуальных приборов LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). LabView компании National Instruments представляет собой среду прикладного графического программирования, используемую в качестве стандартного инструмента для проведения измерений, анализа их данных и последующего управления приборами и исследуемыми объектами [7].

Разработка ВМДС будет осуществляться при поддержке регионального центра технологий National Instruments кафедры «Радиотехника и радиоэлектронные системы» Пензенского государственного университета [8] и выполняется впервые.

Использование приложения Biomedical Toolkit для виртуального проектирования медицинских систем

Среди большого количества известных программных продуктов компании National Instruments приложение LV Biomedical Toolkit предназначено специально для обработки и анализа медицинских сигналов и может быть использовано для разработки ВМДС [9].

Согласно проведенному обзору [4–6] и собственным исследованиям [10, 11] приложение LV Biomedical Toolkit позволяет работать как в режиме реального времени, используя аппаратные средства National Instruments, так и с загружаемыми файлами медицинских сигналов, хранящимися на серверах или загружаемых из различных баз данных. С помощью приложения Biomedical Toolkit возможно:

– регистрировать и обрабатывать кардиографические сигналы;

– определять уровень артериального давления;

– реконструировать медицинские изображения и т.д.

Достоинством приложения является его наглядная визуализация, представленная в графическом виде, а также широкая функциональность и простота в использовании [9].

Рассмотрим приложение Biomedical Toolkit для разработки ВМДС на примере определения уровня АД.

Диалоговое окно приложения Biomedical Toolkit для определения уровня АД приведено на рис. 1. В представленном окне визуализируется сам сигнал пульсовой волны и результаты измерений (систолическое и диастолическое давление), вычисленные по методу Котельникова.

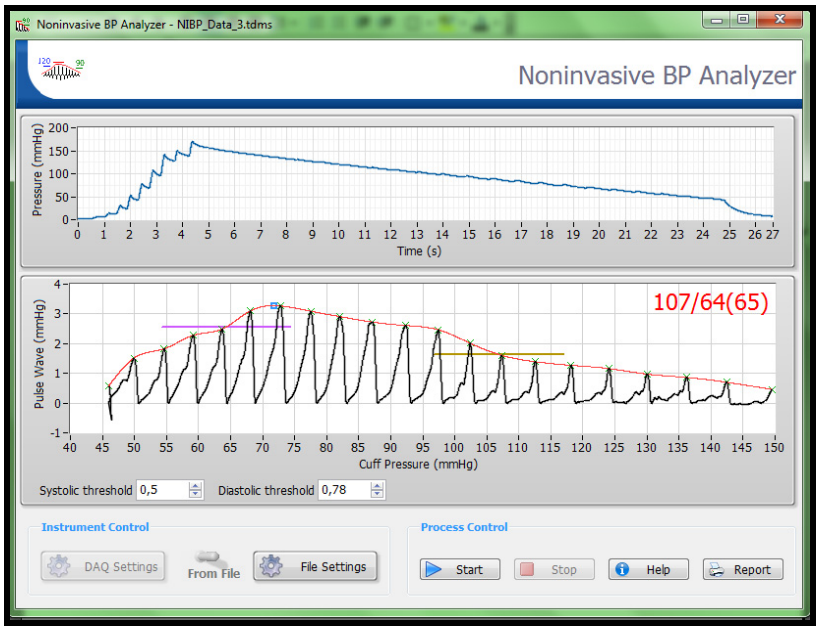


Рис. 1. Диалоговое окно приожения Biomedical Toolkit для определения уровня АД

Ввод сигнала пульсовой волны в приложении Biomedical Toolkit может осуществляться как в режиме реального времени с помощью узла сбора данных, так и загружаться из базы данных. Диалоговое окно ввода сигнала пульсовой волны и корректировки его параметров приведено на рис. 2.

При разработке ВМДС Biomedical Toolkit может быть использовано как самостоятельное приложение, так и вспомогательный узел, выполняющий этапы регистрации (ввода) и отображения медицинских сигналов и изображений.

С использованием приложения Biomedical Toolkit разработан виртуальный прибор измерения АД (рис. 3) [9].

Разработанный ВМДС [10, 11] состоит из следующих основных узлов:

– узел накачки и регулирования давления в манжете;

– узел обработки и анализа сигнала пульсовой волны;

– узел сброса результатов измерения.

Первый узел осуществляет процесс накачки давления в манжету (рис. 4). В узле сигнал снимается с датчика АД и поступает на датчик обработки сигналов. Устройство сбора данных состоит из датчика артериального давления и интерфейса сбора данных.

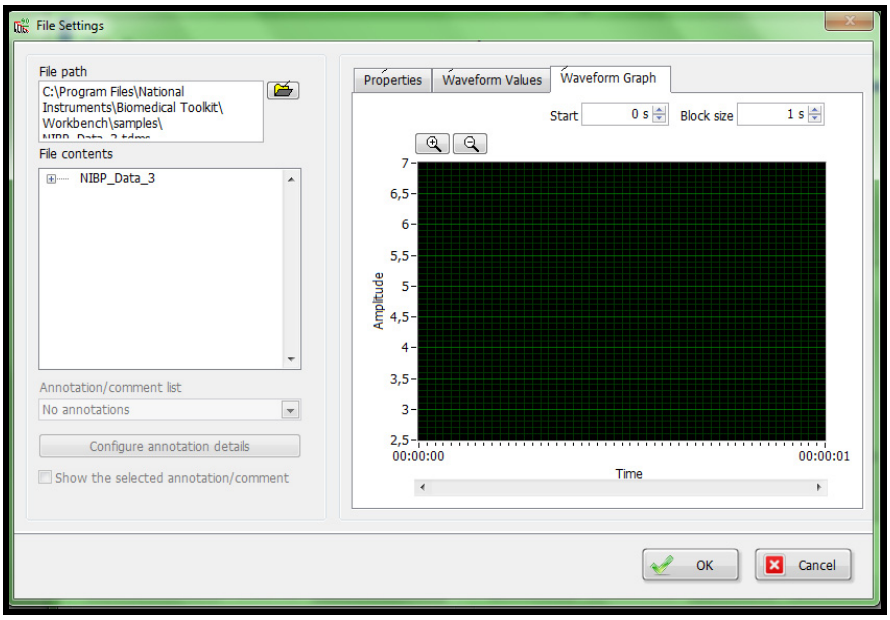


Рис. 2. Диалоговое окно ввода сигнала пульсовой волны
и корректировки его параметров

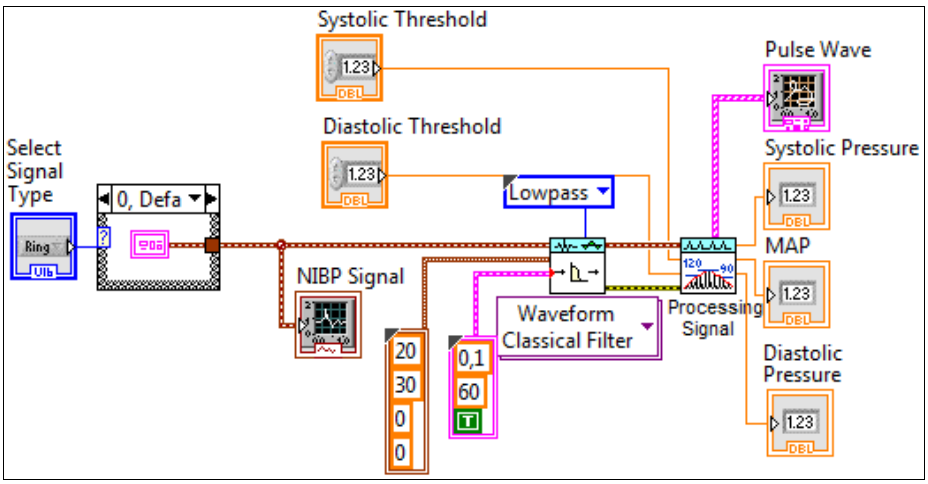


Рис. 3. ВП измерения АД, реализованный с использованием
приложения Biomedical Toolkit

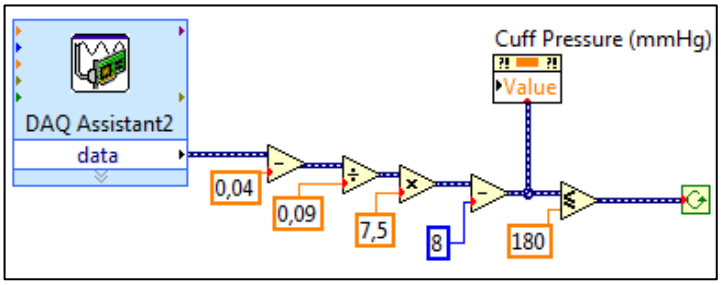


Рис. 4. Узел накачки и регулирования давления в манжете

Второй узел реализует этап обработки сигнала пульсовой волны (рис. 5).

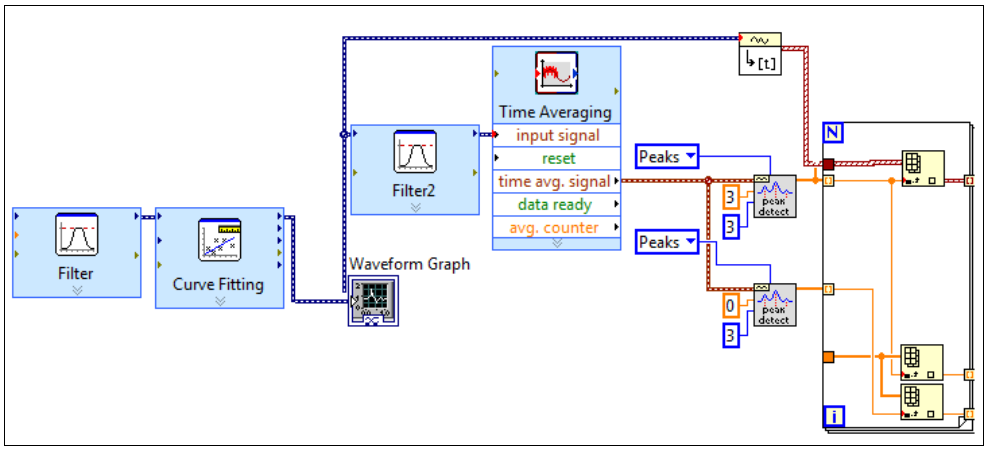


Рис. 5. Узел обработки и анализа сигнала пульсовой волны

На данном этапе считываются значения с датчика давления и сводятся в таблицу. Процесс обработки сигнала начинается с удаления шума, что достигается путем использования фильтра Баттерворта 2-го порядка. По отфильтрованному сигналу строится кривая, аппроксимированная по полиному второй степени порядка. Построенная кривая вычитается из поступающих данных при вычислении пиков сигнала. По результатам обработки измеряется значения систолического и диастолического давления по методу Котельникова и заносятся в таблицу.

Третий узел ВМДС измерения АД выполняет сброс результатов измерения. Схема узла ВМДС сброса данных приведена на рис. 6. Данный узел ВП необходим для принудительного завершения процесса измерения и аварийных ситуациях работы устройства.

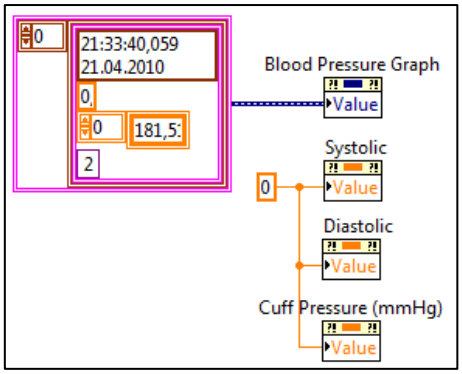


Рис. 6. Узел сброса результатов измерения

Таким образом, в статье разработан ВМДС с использованием среды виртуальной реальности Biomedical Toolkit [10, 11], который позволяет продемонстрировать процесс измерения АД, отображения результатов в виде

систолического, диастолического давления и может быть использован в качестве медицинского диагностического симулятора измерения АД.

Заключение

Таким образом, в работе впервые введено понятие «виртуальные диагностические системы/симуляторы», которые могут быть реализованы как готовые программные решения на персональных компьютерах в среде Labview или в виде программно-аппаратных медицинских систем на платформе PXI (National Instruments), включающие виртуальные приборы и узлы, которые по функциональному назначению полностью имитируют работу систем диагностики состояния здоровья человека и предназначены для освоения обучающимися в медицинских учреждениях различного профиля и симуляционных центрах основам функциональной диагностики и операций по техническому обслуживанию диагностического оборудования.

Изучено и применено для разработки ВМДС приложение Biomedical Toolkit, достоинством которого является наглядная визуализация и широкая функциональность основных узлов для анализа медицинских сигналов, и которые может быть использовано в качестве отдельного приложения или составного узла ВМДС.

Список литературы

1. Медицинские симуляторы: история развития, классификация, результаты применения, организация симуляционного образования / М. Е. Тимофеев, С. Г. Шаповальянц, В. Г. Полушкин, А. А. Валиев, Л. Н. Валеев, Р. Т. Гайнутдинов, В. А. Андряшин, Р. Х. Зайнуллин // Вестник Новгородского государственного университета. – 2015. – № 2 (85). – С. 114–122.
2. Портал Федеральных государственных образовательных стандартов. – URL: http://fgosvo.ru/fgosvpo/7/6/1 (дата обращения: 12.02.2016).
3. Концепция симуляционного обучения в системе медицинского образования в Российской Федерации. – М. : Изд-во Первого МГМУ им. И. М. Сеченова, 2013. – 38 с.
4. **Горшков, М. Д.** Классификация симуляционного оборудования / М. Д. Горшков, А. В. Федоров // Виртуальные технологии в медицине. – 2012. – № 2 (8). – С. 23–25.
5. **Антюшин, А. О.** Использование технологий виртуальной реальности для определения профессиональной пригодности и подготовки кадров опасных профессий / А. О. Антюшин // Виртуальная и дополненная реальность – 2016: состояние и перспективы : сб. науч.-метод. материалов, тезисов и статей конференции / под общ. ред. д.т.н., проф. Д. И. Попова. – М. : Изд-во ГПБОУ МГОК, 2016. – С. 36–48.
6. Портал Virtumed – виртуальные медицинские симуляторы и тренажеры. – URL: http://www.virtumed.ru (дата обращения: 24.03.2016).
7. **Тревис, Дж.** LabVIEW для всех / Дж. Тревис. – М. : ДМК пресс, 2005. – 537 с.
8. Официальный сайт Пензенского государственного университета. – URL: http://www.pnzgu.ru (дата обращения: 02.04.2014).
9. Сайт приложения LabView Biomedical Toolkit. – URL: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/211023 (дата обращения: 12.03.2016).
10. **Tychkov, A. Yu.** The development of the arterial pressure registration device with the increased efficiency of work / A. Yu. Tychkov // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 1 (33). – С. 92–98.

11. **Tyckov, A. Yu.** The software solution of the problems of the biomedical information processing / A. Yu. Tyckov // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе : сб. тр. 4 Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Вып. 1 (4). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – С. 51–54.

References

1. Timofeev M. E., Shapoval'yants S. G., Polushkin V. G., Valiev A. A., Valeev L. N., Gaynutdinov R. T., Andryashin V. A., Zaynullin R. Kh. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Novgorod State University]. 2015, no. 2 (85), pp. 114–122.
2. *Portal Federal'nykh gosudarstvennykh obrazovatel'nykh standartov* [Portal of Federal state educational standards]. Available at: http://fgosvo.ru/fgosvpo/7/6/1 (accessed 12.02.2016).
3. *Kontseptsiya simulyatsionnogo obucheniya v sisteme meditsinskogo obrazovaniya v Rossiyskoy Federatsii* [The conception of simulation training in the system of medical education in the Russian Federation]. Moscow: Izd-vo Pervogo MGMU im. I. M. Sechenova, 2013, 38 p.
4. Gorshkov M. D., Fedorov A. V. *Virtual'nye tekhnologii v meditsine* [Virtual technologies in medicine]. 2012, no. 2 (8), pp. 23–25.
5. Antyushin A. O. *Virtual'naya i dopolnennaya real'nost' – 2016: sostoyanie i perspektivy: sb. nauch.-metod. materialov, tezisov i statey konferentsii* [Virtual and augmented reality – 2016: the condition and prospects: collected methodological materials, theses and articles of the conference]. Moscow: Izd-vo GPBOU MGOK, 2016, pp. 36–48.
6. *Portal Virtumed – virtual'nye meditsinskie simulyatory i trenazhery* [Virtumed portal – virtual medical simulators and trainers]. Available at: http://www.virtumed.ru (accessed 24.03.2016).
7. Trevis Dzh. *LabVIEW dlya vsekh* [LabVIEW for everybody]. Moscow: DMK press, 2005, 537 p.
8. *Ofitsial'nyy sayt Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta* [The official site of Penza State University]. Available at: http:// www.pnzgu.ru (accessed 02.04.2014).
9. *Sayt prilozheniya LabView Biomedical Toolkit* [The site of LabView's plug-in – Biomedical Toolkit]. Available at: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/211023 (accessed 12.03.2016).
10. Tychkov A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 1 (33), pp. 92–98.
11. Tychkov A. Yu. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve: sb. tr. 4 Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov i molodykh uchenykh* [Models, systems, networks in economics, engineering, nature and society: proceedings of $th All-Russia scientific and practical conference of students and young scientists]. Issue 1 (4). Penza: Izd-vo PGU, 2013, pp. 51–54.

Тычков Александр Юрьевич
кандидат технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich
Candidate of engineering sciences, deputy director of the research institute for basic and applied studies, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.946

Тычков, А. Ю.

Применение технологии виртуального проектирования для разработки медицинских диагностических систем / А. Ю. Тычков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 53–61. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-5

УДК 004.94
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-6

Г. В. Мартяшин, К. Ю. Тархов,
А. В. Калачев, Е. А. Бальзанникова, Д. В. Пащенко

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ДЕКОМПОЗИЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗОРНОЙ МЕТОДОЛОГИИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объект исследования – сложная система, представленная в виде сети Петри. Предметом исследования является способ декомпозиции этой системы на примитивные фрагменты в сетях Петри. Цель работы – формальное описание алгоритма декомпозиции сложных систем с использованием тензорных преобразований.

Материалы и методы. Формальное описание алгоритма осуществлялось с использованием аппарата сетей Петри и тензорной методологии.

Результаты. Представленный алгоритм позволяет реализовать работу модуля системы автоматизированного проектирования структур параллельных вычислительных систем на основе тензорного исчисления сетевых моделей.

Выводы. Результаты могут быть использованы при решении проблем разработки и усовершенствования сложных систем.

Ключевые слова: сети Петри, тензорное преобразование, декомпозиция сложных систем.

G. V. Martyashin, K. Yu. Tarkhov,
A. V. Kalachev, E. A. Bal'zannikova, D. V. Pashchenko

A FORMAL DESCRIPTION OF A DECOMPOSITION ALGORITHM FOR COMPLEX SYSTEMS BASED ON PETRI NETS USING TENSOR METHODS

Abstract.

Background. The research object is a complex system in the form of a Petri net. The research subject a way of decomposition of the complex system to primitive fragments of Petri nets. The aim of the study is formally describe a decomposition algorithm for complex systems using tensor transformations.

Materials and methods. The formal description of the algorithm was carried outusing the Petri nets apparatus and tensor methodology.

Results. The algorithm presented in this article allows to implement the operation of the module of CAD structures of parallel computing systems on the basis of tensor calculation of network models.

Conclusions. The research results can be used for solving problems of development and improvement of complex systems.

Key words: Petri nets, tensor transformation, decomposition of complex systems.

Введение

В современной науке и технике при разработке сложных систем все чаще возникают задачи, требующие использовать методы математического моделирования [1]. Это обусловлено тем, что моделирование позволяет

с меньшими затратами воссоздавать процессы в системе и выявлять критерии оптимизации [2, 3]. Важным преимуществом моделирования является возможность замены физического эксперимента модельным, что позволяет в значительной степени сократить затраты ресурсов и времени. Также инструменты моделирования являются необходимыми в случае, если к объекту проектирования или исследования имеется ограниченный доступ либо он находится в недоступных условиях окружающей среды, например, при разработке системы управления атомным реактором или динамическим электрокардиостимулятором в организме человека. Для моделирования сложных дискретных систем можно воспользоваться аппаратом сетей Петри [4, 5].

Сети Петри – это удобный математический аппарат, предназначенный для моделирования динамических дискретных систем, представляющий собой двудольный ориентированный граф, состоящий из вершин, называемых позициями и переходами, соединенных между собой дугами. Вершины одного типа не могут быть непосредственно соединены друг с другом. Позиции могут содержать в себе маркеры, имеющие возможность перемещаться по сети. Классический вариант сетей Петри предполагает, что необходимым условием срабатывания перехода является наличие маркеров во всех входных позициях перехода [6, 7].

Данный математический аппарат позволяет графически и формально описывать параллельные процессы системы, а также находить тупиковые состояния, выполнять проверку достижимости состояний исследуемой системы и т.д.

Модели сложной системы, построенной на основе сетей Петри, можно декомпозировать и трансформировать с целью повышения эффективности работы существующей системы с использованием тензорной методологии [8]. Такой подход часто применяется в математике для решения проблем, связанных с трансформацией и декомпозицией сложных систем. Тензорные преобразования позволяют преобразовать исходную модель системы в эквивалентную ей, которая обладает теми же свойствами, но способна более эффективно выполнять заданные функции [9, 10].

1. Этапы моделирования сложной системы в сетях Петри и ее тензорное преобразование в эквивалентную систему

Моделирование сложной системы в виде формализованного описания сетей Петри [11, 12] и тензорное преобразование [13, 14] в эквивалентную систему можно представить в виде обобщенной схемы, представленной на рис. 1.

На рис. 1 видно, что исследуемая сложная система формализуется и представляется в виде сетей Петри, обозначена как «Исходная СП-модель» – N_i. Исходная СП-модель декомпозируется на компоненты, называемые линейными базовыми фрагментами (ЛБФ). Они представляют собой цепочки переходов и циклических последовательностей, образуя сеть Петри ЛБФ – N_L; N_i и N_L описаны в исходной системе координат. В общем случае существуют различные способы декомпозиции исходной сети Петри на ЛБФ. В ходе моделирования могут рассматриваться все варианты декомпозиции, что значительно увеличивает трудоемкость, или выбирается конкретный алгоритм декомпозиции.

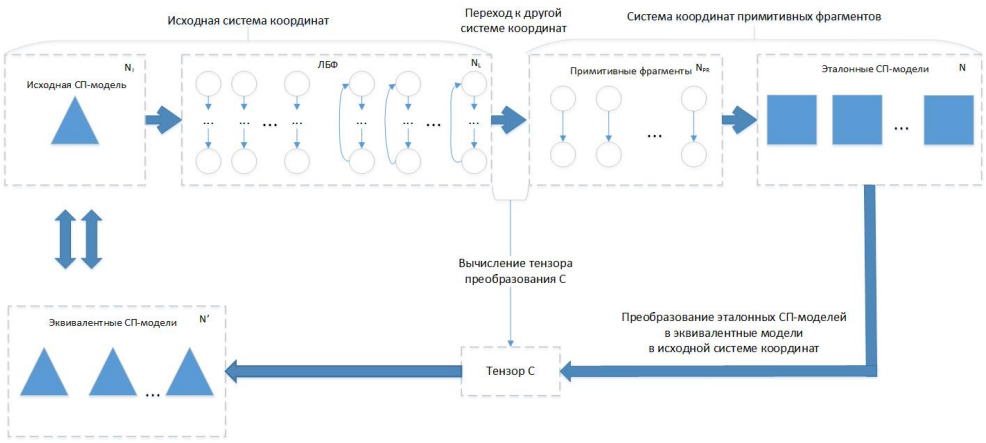


Рис. 1. Обобщенная схема моделирования сложной системы с помощью сетей Петри и тензорных преобразований

После получение ЛБФ осуществляется переход к другой системе координат, называемой системой координат примитивных фрагментов. На данном этапе происходит декомпозиция ЛБФ на примитивные фрагменты, которые совместно образуют сеть Петри примитивных фрагментов – N_{PR}. Также на этом этапе происходит вычисление тензора преобразования C.

Далее происходит отбор примитивных фрагментов по определенным правилам: из примитивных фрагментов, удовлетворяющих заданным условиям, формируются эталонные СП-модели, в свою очередь они в совокупности образуют сети Петри – N.

Как только эталонные СП-модели сформированы, происходит их преобразование в эквивалентные модели уже в исходной системе координат. На выходе формируются эквивалентные СП-модели (сети Петри), которые потенциально эквивалентны исходной сети Петри исследуемой сложной системы и по некоторым параметрам и эффективности в целом могут превосходить ее.

Целью научного исследования является разработка алгоритма декомпозиции сложной системы, представленной в виде линейных базовых фрагментов, на простейшие фрагменты.

2. Алгоритм декомпозиции и преобразования системы, построенной на основе сетей Петри с использованием тензорной методологии на примере упрощенной системы

В данной работе рассматривается часть программного комплекса, отвечающая за преобразование линейных базовых фрагментов в примитивы и построение тензоров преобразования.

В качестве входных данных алгоритм принимает сеть Петри, представленную в виде ЛБФ и заданную в матричной форме (рис. 2).

Далее выполняется преобразование ЛБФ в примитивы – фрагменты сети Петри, состоящие из одной входной позиции, одного перехода и одной выходной позиции. Оно производится путем анализа матрицы, задающей сеть Петри. Деление ЛБФ может производиться только по позиции. При этом

имена новых позиций выбираются таким образом, чтобы по ним можно было однозначно определить, из каких позиций они были получены (рис. 3).

	p1	p2	p3
t1	-1	1	0
t2	0	-1	1

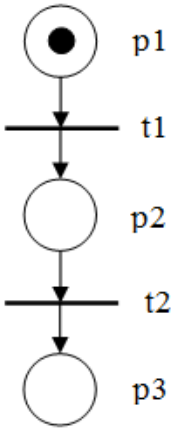


Рис. 2. Сеть Петри в виде ЛБФ и ее матричное представление

	p1	p21	p22	p3
t1	-1	1	0	0
t2	0	0	-1	1

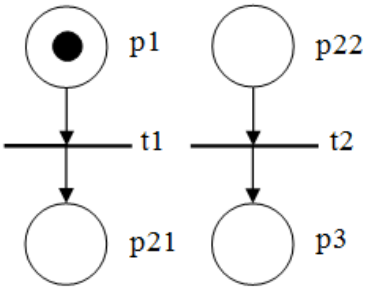


Рис. 3. Сеть Петри в виде примитивов и ее матричное представление

Полученные примитивы далее могут быть собраны различными способами, ограниченными заданными правилами для получения новой сети Петри, описывающей исходную систему. Однако требуется обеспечить связь между полученной сетью и исходной, т.е. передать некоторые свойства. Для этого будет использоваться тензорное преобразование.

Допустим, что полученная и исходная сети Петри находятся в разной системе координат. Для того чтобы перевести полученную сеть Петри в одну систему координат с исходной, необходимо определить тензор. Для этого требуется решить систему уравнений

$$\begin{cases} D = C \cdot D', \\ \mu = C \cdot \mu', \end{cases} \quad (1)$$

где D – матрица, описывающая сеть Петри, представленную в виде ЛБФ; матрица D' описывает сеть Петри, представленную в виде примитивов; C – тензор; μ – маркировка сети с ЛБФ; μ' – маркировка сети с примитивами.

Для определения тензора необходимо привести матрицы сетей Петри к одной размерности. Это может быть сделано так, как показано на рис. 4.

	p1	p21	p22	p3
t1	-1	1	1	0
t2	0	-1	-1	1

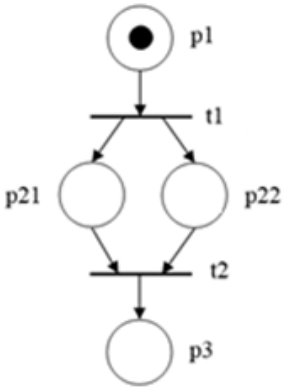


Рис. 4. Исходная сеть Петри с увеличенной размерностью

После получения матриц D и D' одинаковой размерности можно вычислить тензор C, используя (1). Решение данной системы сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} d'_{11} = c_{11} \cdot d_{11} + c_{12} \cdot d_{21} + c_{13} \cdot d_{31} + c_{14} \cdot d_{41}, \\ d'_{21} = c_{21} \cdot d_{11} + c_{22} \cdot d_{21} + c_{23} \cdot d_{31} + c_{24} \cdot d_{41}, \\ d'_{31} = c_{31} \cdot d_{11} + c_{32} \cdot d_{21} + c_{33} \cdot d_{31} + c_{34} \cdot d_{41}, \\ d'_{41} = c_{41} \cdot d_{11} + c_{42} \cdot d_{21} + c_{43} \cdot d_{31} + c_{44} \cdot d_{41}, \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} d'_{12} = c_{11} \cdot d_{12} + c_{12} \cdot d_{22} + c_{13} \cdot d_{32} + c_{14} \cdot d_{42}, \\ d'_{22} = c_{21} \cdot d_{12} + c_{22} \cdot d_{22} + c_{23} \cdot d_{32} + c_{24} \cdot d_{42}, \\ d'_{32} = c_{31} \cdot d_{12} + c_{32} \cdot d_{22} + c_{33} \cdot d_{32} + c_{34} \cdot d_{42}, \\ d'_{42} = c_{41} \cdot d_{12} + c_{42} \cdot d_{22} + c_{43} \cdot d_{32} + c_{44} \cdot d_{42}, \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} \mu'_1 = c_{11} \cdot \mu_1 + c_{12} \cdot \mu_2 + c_{13} \cdot \mu_3 + c_{14} \cdot \mu_4, \\ \mu'_2 = c_{21} \cdot \mu_1 + c_{22} \cdot \mu_2 + c_{23} \cdot \mu_3 + c_{24} \cdot \mu_4, \\ \mu'_3 = c_{31} \cdot \mu_1 + c_{32} \cdot \mu_2 + c_{33} \cdot \mu_3 + c_{34} \cdot \mu_4, \\ \mu'_4 = c_{41} \cdot \mu_1 + c_{42} \cdot \mu_2 + c_{43} \cdot \mu_3 + c_{44} \cdot \mu_4. \end{cases} \tag{4}$$

После подстановки имеющихся значений матриц D и D' была получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} -1 = -c_{11} + c_{12}, \\ 1 = -c_{21} + c_{22}, \\ 1 = -c_{31} + c_{32}, \\ 0 = -c_{41} + c_{42}, \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} 0 = -c_{13} + c_{14}, \\ -1 = -c_{23} + c_{24}, \\ -1 = -c_{33} + c_{34}, \\ 1 = -c_{43} + c_{44}, \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} 1 = c_{11}, \\ 0 = c_{21}, \\ 0 = c_{31}, \\ 0 = c_{41}. \end{cases} \quad (7)$$

Используя значения из (7) в системе (5), можно получить

$$\begin{cases} 0 = c_{12}, \\ 1 = c_{22}, \\ 1 = c_{32}, \\ 0 = c_{42}. \end{cases} \quad (8)$$

Данная система линейных уравнений имеет несколько решений. Для получения одного из решений требуется, чтобы число неизвестных в системе (6) было равно числу уравнений. Допустим, что $c_{13} = 0$, $c_{23} = 1$, $c_{33} = 1$ и $c_{43} = 0$. Тогда система (6) примет вид

$$\begin{cases} 0 = c_{14}, \\ 0 = c_{24}, \\ 0 = c_{34}, \\ 1 = c_{44}. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, тензор преобразования будет выглядеть, как показано на рис. 5.

1	0	0	0
0	1	1	0
0	1	1	0
0	0	0	1

Рис. 5. Тензор преобразования

Проверим правильность полученного результата. Выполним умножение тензора *C* на матрицу *D* (рис. 6).

Полученная матрица совпадает с матрицей D', что свидетельствует о том, что синтезированный тензор преобразования *C* является решением системы (1).

Приведенный выше способ позволяет получить все возможные значения тензора *C*, но его недостатком является сложность вычислений. В статье [4] на основе анализа ЛБФ был выведен более компактный алгоритм построения тензора преобразования:

1) сформировать матрицу *C* размерности $n \times n$;

2) $C = 0$;

3) для всех $i = \overline{1,n}$ выполнить: $c(i,i) = 1$;

4) для всех $i = \overline{1,m-1}$ выполнить: $c(2i, 2i+2) = -1$, $c(2i+1, 2i) = 1$.

-1	0
1	-1
1	-1
0	1

Рис. 6. Результат умножения тензора преобразования
на матрицу примитивных элементов

На основе данного алгоритма был построен тензор преобразования для исследуемой системы (рис. 7).

1	0	0	0
0	1	0	-1
0	1	1	0
0	0	0	1

Рис. 7. Тензор преобразования, полученный
при использовании упрощенного алгоритма

При применении полученного тензора преобразования к матрице инцидентности примитивных фрагментов была получена матрица инцидентности ЛБФ, из чего можно сделать вывод, что данный алгоритм позволяет получить одно из решений системы (1).

Операция вычисления тензора преобразования необходима для выполнения последующих этапов алгоритма синтеза потенциально эквивалентных СП-моделей. Тензор C используется при преобразовании эталонных СП-моделей в потенциально эквивалентные модели при переводе их в исходную систему координат.

Заключение

Рассмотренный алгоритм позволяет реализовать один из этапов моделирования сложной системы с помощью сетей Петри и тензорных преобразований. На данный момент разработан прототип системы автоматизированного проектирования структур параллельных вычислительных систем на основе тензорного исчисления сетевых моделей, модуль преобразования ЛБФ в примитивы и построения тензоров преобразования, которой имеет реализацию, основывающуюся на данном алгоритме.

В дальнейшем планируется рассмотреть различные аспекты программной реализации предложенного алгоритма и результаты его использования, интересные с практической точки зрения.

Список литературы

1. **Симанков, В. С.** Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри / В. С. Симанков, Д. М. Толкачев // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4. Естественно-математические и технические науки. – 2012. – № 4. – С. 84–92.

2. **Kizilov, E.** Modeling of QoS in the industrial Ethernet switches / E. Kizilov, D. Pashenko, D. Trokoz, N. Konnov // 5th International Workshop on Computer Science and Engineering Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE, 2015. – P. 185–190
3. **Domnin, A.** Modeling EMA and MA Algorithmas to Estimate the Bitrate of Data Streams in Packet Switched / A. Domnin, N. Konnov, V. Mekhanov // Communication in Computer and Information Science, 2014 – P. 81–86.
4. **Волчихин, В. И.** Моделирование подсистемы загрузки данных наземной системы контроля авиационных радиолокационных комплексов с использованием аппарата сетей Петри / В. И. Волчихин, Д. В. Пащенко, Д. А. Трокоз // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 37–48.
5. **Diaz, M.** Petri Nets: Fundamental Models, Verification and Applications / Michel Diaz. – Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Wiley-ISTE, 2013. – 656 p.
6. **Pashchenko, D. V.** Equivalnce of inhibitory and non-inhibitory safe petri nets, Innovative information technologies / D. V. Pashchenko, D. A. Trokoz // Materials of the International scientific : practical conference. – Praga, 2014. – P. 550–556.
7. **Pashenko, D.** Formal transformation inhibitory safe Petri nets into equivalent not inhibitory / D. Pashenko, D. Trokoz, N. Konnov // Procedia Computer Science. – 2015. – P. 99–103.
8. **Kulagin, V. P.** Tensor Methods of Designing Computer System Structures / V. P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. – 1989. – P. 55-61.
9. **Obsieger, B.** Metoda Rubnih Elementata I / Boris Obsieger. – USA : Createspace, 2015. – 32 p.
10. **Jeevanjee, N.** An Introduction to Tensors and Group Theory for Physicists / Nadir Jeevanjee. – Second Edition. – Berlin, Germany : Springer, 2015. – 305 p.
11. **Patil, S.** Neutralizing semantic ambiguities of function block architecture by modeling with ASM / S. Patil, V. Dubinin, C. Pang, V. Vyatkin // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – St. Petersburg, Russia, 2015. – P. 93–97
12. **Dai, W. W.** Function block implementation of service oriented architecture: Case study / W. W. Dai, J. H. Christensen, V. Vyatkin, V. Dubinin // Proceedings – 2014 : 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN, 2014. – Porto-Allegre, Brazil, 2014. – P. 64–70
13. **Hogben, L.** Handbook of Linear Algebra / Leslie Hogben. – Second Edition. – London, UK: Chapman and Hall/CRC, 2013. – 1904 p.
14. **Kron, G.** Tensor Analysis of Networks / Kron Gabriel. – London, UK : Facsimile Publisher, 2015 – 662 p.

References

1. Simankov V. S., Tolkachev D. M. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4. Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Adygea State University. Series 4. Natural, mathematical and engineering sciences]. 2012, no. 4, pp. 84–92.
2. Kizilov E., Pashenko D., Trokoz D., Konnov N. *5th International Workshop on Computer Sci-ence and Engineering Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE*. 2015, pp. 185–190
3. Domnin A., Konnov N., Mekhanov V. *Communication in Computer and Information Science*. 2014, pp. 81–86.
4. Volchikhin V. I., Pashchenko D. V., Trokoz D. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 37–48.

5. Diaz Michel *Petri Nets: Fundamental Models, Verification and Applications*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Wiley-ISTE, 2013, 656 p.
6. Pashchenko D. V., Trokoz D. A. *Materials of the International scientific: practical conference*. Praga, 2014, pp. 550–556.
7. Pashenko D., Trokoz D., Konnov N. *Procedia Computer Science*. 2015, pp. 99–103.
8. Kulagin V. P. *Automatic Control and Computer Sciences*. 1989, pp. 55–61.
9. *Boris Obsieger Metoda Rubnih Elementata I.* Createspace, 2015, 432 p.
10. Jeevanjee N. *An Introduction to Tensors and Group Theory for Physicists*. Second Edition. Birkhauser: Springer, 2015, 305 p.
11. Patil S., Dubinin V., Pang C., Vyatkin V. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. GOROD 2015, pp. 93–97
12. Dai W. W., Christensen J. H., Vyatkin V., Dubinin V. *Proceedings – 2014: 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN*. 2014, pp. 64–70
13. Leslie Hogben *Handbook of Linear Algebra*. Second Edition. Chapman and Hall/CRC, 2013, 1904 p.
14. Kron Gabriel *Tensor Analysis of Networks*. Facsimile Publisher, 2015, 662 p.

Мартяшин Георгий Викторович
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nowargore@gmail.com

Martyashin Georgiy Viktorovich
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тархов Кирилл Юрьевич
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: soulesspnz@gmail.com

Tarkhov Kirill Yur'evich
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Калачев Андрей Валентинович
студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: andrei.kalachev@gmail.com

Kalachev Andrey Valentinovich
Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бальзанникова Елена Алексеевна
магистрант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: elenabalzannikova@gmail.com

Bal'zannikova Elena Alekseevna
Master's degree student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Пащенко Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dmitry.pashchenko@gmail.com

Pashchenko Dmitriy Vladimirovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of computer engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.94

Формальное описание алгоритма декомпозиции сложных систем на основе сетей Петри с использованием тензорной методологии / Г. В. Мартяшин, К. Ю. Тархов, А. В. Калачев, Е. А. Бальзанникова, Д. В. Пащенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 62–71. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-6

УДК 004.713
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-7

Н. Н. Коннов, А. О. Семенов

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ОЧЕРЕДЕЙ В КОММУТАТОРАХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются современные телекоммуникационные устройства (коммутаторы). Предметом исследования являются системы диспетчеризации современных телекоммуникационных устройств. Цель работы – создание дисциплины диспетчеризации, удовлетворяющей требованиям адаптивности к динамически изменяющимся сетевым параметрам и отсутствия детерминированности.

Материалы и методы. Для исследования стохастической диспетчеризации очередей используются методы теории вероятностей и имитационного моделирования.

Результаты. Разработано формальное описание системы со стохастической диспетчеризацией очередей в коммутаторе Ethernet, использующей псевдослучайную адаптивную выборку очереди. Построена имитационная модель стохастического диспетчера в пакете MatLab/Simulink. Проведено сопоставление результатов моделирования стохастической диспетчеризации с циклическими алгоритмами диспетчеризации.

Выводы. Моделирование показало, что за счет исключения цикличности в обслуживании очередей коммутатора и более справедливого распределения свободных ресурсов канала в стохастическом диспетчере уменьшаются среднее значение и стандартное отклонение длин очередей, снижается разброс джиттера по отдельным очередям.

Ключевые слова: стохастическая диспетчеризация, имитационное моделирование, очередь, коммутатор, качество обслуживания.

N. N. Konnov, A. O. Semenov

A STOCHASTIC APPROACH TO SWITCH QUEUE DISPATCHING

Abstract.

Background. The research deals with modern telecommunicational devices (switches). The research subject is a set of modern telecommunicational devices' dispatching systems. The purpose of the study is to create a dispatching discipline that meets the requirements of adaptability to dynamically changing network settings and the lack of determinism.

Materials and methods. The probability theory and simulation methods were used for investigation of queue dispatching methods and simulation of stochastic systems.

Results. The authors have developed a formal description of a systm with stochastic queue dispatching in an Ethernet switch with pseudorandom adaptive queue sampling. A simulation model of a stochastic dispatching system has been built. It uses the MATLAB/Simulink simulation software. Stochastic and cyclic (robin) dispatching systems have been analyzed comparatively.

Conclusions. The simulation performed reveals that the mean value and standard deviation of queue lengths decrease as well as the jitter scattering by individual queues due to excluding cyclicity when operating a switch and more correct distribution of free channel resources.

Key words: stochastic dispatching system, formal description, simulation system, Simulink, modeling.

Современные телекоммуникационные устройства (коммутаторы и маршрутизаторы) обладают комплексом механизмов, обеспечивающих поддержку качества обслуживания (*QoS*) различных типов трафика, определяемых такими параметрами, как пропускная способность (полоса пропускания), задержка и ее вариация (джиттер), доля потерянных пакетов [1].

Среди механизмов обеспечения качества (маркировка и классификация трафика, обслуживание очередей, управление перегрузкой, управление полосой пропускания) важнейшим является алгоритм диспетчеризации очередей, т.е. правила выбора очереди для считывания из нее данных и объем считываемых данных на одно обращение, которые непосредственно определяют задержку кадров и вероятность их потери [2, 3].

В традиционных системах диспетчеризации очередей в сетевых устройствах выбор очереди имеет детерминированный характер, задаваемый правилами приоритезации (жесткими, циклическими и др.). В таких системах время ожидания обслуживания некоторого кадра зависит не только от места кадра в очереди, загруженности очередей и иных сетевых параметров, но и от правил очередности обслуживания узлов, что приводит к непредсказуемости задержки кадров [1–4].

Известны алгоритмы с жесткими приоритетами (SPQ), недостатком которых является возможность монополизации полосы высокоприоритетным трафиком, что ограничивает его применение для трафиков малой интенсивности, но с жесткими требованиями к задержке.

Классические циклические алгоритмы (WRR и DRR) обеспечивают гарантируемую полосу пропускания. Эти алгоритмы детерминированы, т.е. правила обхода очередей определены как циклические, не учитывающие такие параметры, как количественные загрузки очередей, времена задержки пакетов, что приводит к длительной задержке пакетов в отдельных очередях в случае всплеска нагрузки в нескольких очередях одновременно.

Существует также алгоритм взвешенного справедливого обслуживания очередей WFQ, который обеспечивает принцип «справедливого обслуживания», обладает рядом преимуществ [3]. В частности, алгоритм обеспечивает «изоляцию» потоков (очередей), т.е. поведение разных потоков не зависит друг от друга, а также цикличность облуживания, о недостатках которой сказано выше.

Альтернативой детерминированной выступает система стохастической диспетчеризации, использующая случайный порядок выбора очередей на обслуживание. [5] В настоящей работе предлагается применять модификацию стохастического алгоритма диспетчеризации, используемого для распределения процессорного времени между задачами в операционных системах [6, 7], для диспетчеризации очередей в коммутаторе Ethernet с поддержкой Qos. Суть алгоритма заключается в том, что номер обслуживаемой очереди выбирается случайно, с вероятностью, зависящей от длины очередей и полосы пропускания по каждому классу обслуживания, которая оперативно оценивается в процессе диспетчеризации.

Структура диспетчера на основе стохастического алгоритма представлена на рис. 1.

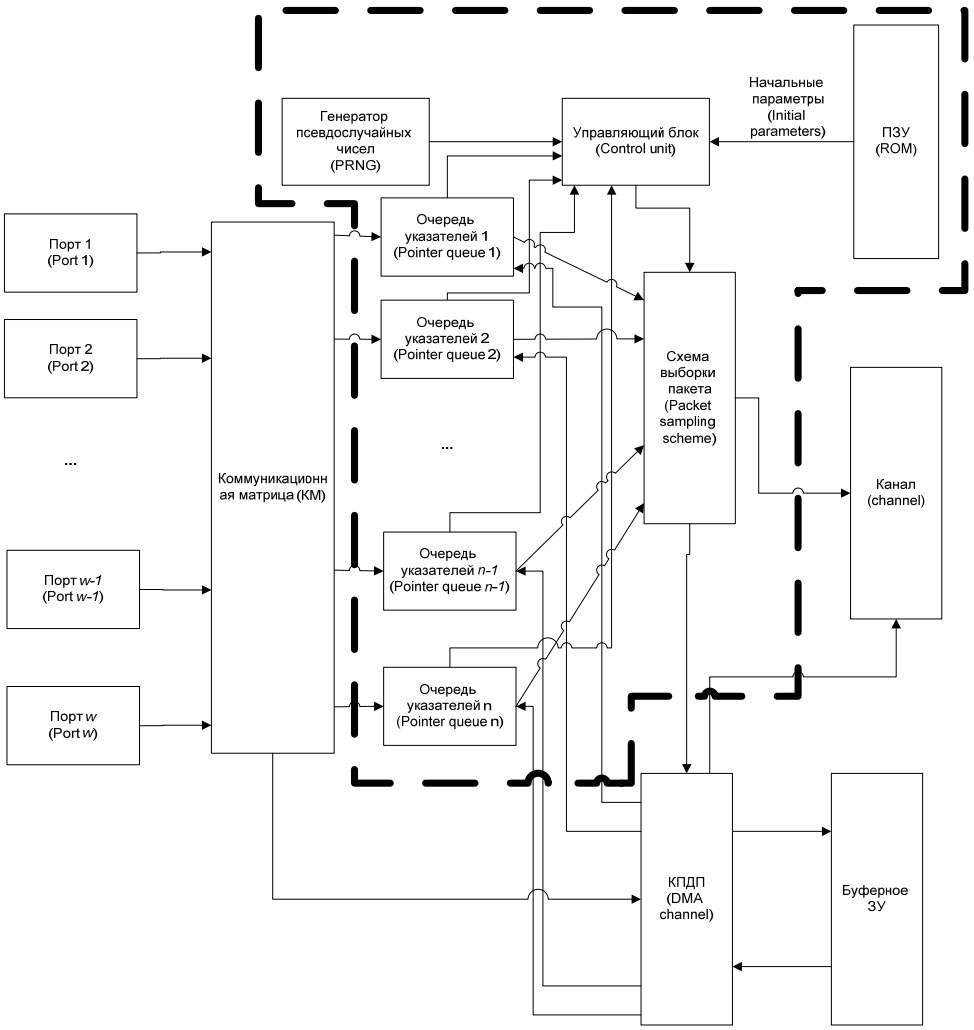


Рис. 1. Обобщенная структура стохастического диспетчера

Кадры поступают из входных портов, сортируются по классам трафика и распределяются в соответствии с их классом по n очередям [3, 8–11].

Управляющий блок принимает решения о выборе очереди на обслуживание исходя из информации о состоянии очередей, например об их длине, и состоянии генератора псевдослучайных чисел. Распределение выходных значений генератора в данной работе считается близким к равномерному (прямоугольному), однако можно использовать и иные распределения, пересчитывая коэффициенты для каждого из них.

Пусть t – время моделирования (работы) диспетчера; t_i – фактическое время обслуживания i-й очереди диспетчером за все время моделирования; n – число очередей, выделенных для обслуживания пакетов заданного класса; m – общее число очередей; l_i – длина i-й очереди (в байтах), $t_{E_i}(t+1) = \overline{E_i(t)}$ – момент времени, соответствующий намечаемой смене активной (с атрибутом E_i, равным единице или другому активному сигналу) очереди; const – множество целых неотрицательных констант; k – столбцовая матрица размером

$m \times 1$, характеризующая доли разрешенных полос пропускания, выделенных для каждой i-й очереди при $i \in [0; m-1]$, при этом k является постоянной величиной, записанной в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Однако по усмотрению системного администратора значение k можно изменять.

При достижении момента окончания обслуживания *i*-й очереди, т.е. при достижении момента окончания передачи пакета в канал, или незадолго до этого момента поступает запрос на расчет вероятностей p, определяющих вероятность выборки одного пакета из каждой из очередей на основе постоянной величины p_{pr} (*priority probably*), записанной в ПЗУ. Но по усмотрению системного администратора значение p_{pr} можно изменять.

Расчет вероятностей осуществляется исходя из решения уравнения (1) на основе имеющихся данных о загрузке очередей, текущей полосе и т.д. с неизвестным *p*, являющимся столбцовой матрицей. Причем суммарная вероятность в каждый отдельный момент времени по всем классам трафика равна единице, а предел величины *p* при постоянных p_{pr} и k сходится к константному значению p_{por_i}:

$$\forall \left(\begin{array}{l} t \in NN; NN \equiv (0,1,...,\infty); 0 \le i \le m-1; i,m,n \in N; N \equiv (1,2,...,\infty); n \le m; \\ l_i(t) \ge 0; p_{pr_i}, p_i \in [0;1]; \sum\limits_{i=0}^{m-1} p_i(t) = 1; \lim\limits_{t \to \infty} \dfrac{\sum\limits_{t} p_i(t)}{t} = \dfrac{k_i p_{pr_i}}{\sum\limits_{i} k_i p_{pr_i}} \end{array} \right) \exists$$

$$\exists \left(\begin{array}{l} \forall \left((tk_i - t_i) > 0 \right) \exists \left(\sum\limits_{i=0}^{m-1} \left(p_i \dfrac{k_i p_{pr_i}}{\sum\limits_{i} k_i p_{pr_i}} \cdot \dfrac{l_i(t)(tk_i - t_i)}{\sum\limits_{j=0}^{m-1} \left(l_j(t)\left(tk_j - t_j\right)\right)} \right) = 1 \right) \wedge \\ \wedge \left(\forall \left((tk_i - t_i) \le 0 \right) \supset \left(p_i = 0 \right) \right). \end{array} \right), \quad (1)$$

В случае пустоты *i*-й очереди расчет вероятности по *i*-му классу обслуживания не имеет смысла, ибо она станет равной нулю.

Обслуживание *i*-й очереди сопровождается активным уровнем сигнала E_i:

$$\left((E_i = 0 \wedge \ E_i \in BoolSet) \vee (l_i(t) = 0) \right) \supset (b_i(t) = 0); \quad (2)$$

$$\left(E_i = 1 \wedge \ E_i \in BoolSet \wedge (l_i(t) > 0) \right) \supset (b_i(t) \ne 0); \quad (3)$$

$$\exists (p_i(t)) \left(E_j \left(t_{E_i}(t+1) = \overline{E_i(t)} \right) = 1 \right). \quad (4)$$

Формальное описание алгоритма и логики работы операционных (блоков обслуживания очередей указателей) и управляющего блоков диспетчера приведены в формулах (1)–(4) соответственно.

При увеличении числа m требуется и большее количество вычислений в управляющем блоке. Подробности построения управляющего блока представлены далее:

1) с увеличением m увеличивается и количество умножителей в управляющем блоке (их количество $m - 1$);

2) однако существенная часть вычислений в управляющем блоке параллельна, следовательно, масштабирование системы не создаст существенных проблем, связанных с уменьшением производительности управляющего блока при увеличении m.

Было проведено сравнительное имитационное моделирование хаотической системы диспетчеризации и системы диспетчеризации с дефицитным циклическим обслуживанием (алгоритм DRR) [2, 3], выбор которого обусловлен «справедливым» распределением ресурсов и гарантируемой полосой пропускания.

Для оценки эффективности алгоритма выполнено моделирование в системе имитационного моделирования Simulink. При разработке модели использовались блоки, описанные в [12–14], где приведены примеры моделирования циклических алгоритмов диспетчеризации. Ниже описан набор модулей, необходимых для построения модели стохастического диспетчера.

Обобщенная структура модели такова (рис. 2, нумерация в тексте согласована с нумерацией на рисунке):

1. Управляющий блок, включающий в себя следующие блоки:

- блоки подсистем (*Subsystem*);
- порты входные, выходные (*In, Out*);
- умножения и деления (*Divide*);
- сложения и вычитания (*Sum*);
- логические операторы (*Logical Operator*);
- сравнения чисел на ноль (*CompareToZero*);
- инкрементации (*IncrementStoredInteger*);
- условного перехода (*MultiportSwitch*);
- констант (*DSP Constant*);
- вывода пользовательской информации (*Scope*).

2. Операционные блоки, включающие в себя:

- очереди (блок *Queue*, 1);
- генератор синхроимпульсов (блок *Pulse Generator*);
- устройства задержки сигнала на величину такта моделирующей системы (*Memory*), предназначенные для предотвращения временных конфликтов между сигналами прямой и обратной связи;
- RS-триггеры (*S-R Flip-Flop*). Этот блок предназначен для запоминания одного из двух состояний: передача пакета (т.е. фактическая работа операционного устройства – ОУ) или простой (т.е. фактическое бездействие операционного устройства – ОУ);
- входные порты подсистемы (блоки *In*). Этот блок предназначен для задания элемента входной части интерфейса той или иной подсистемы, в данном случае операционного устройства. Возможно изменение состава входов ОУ, например, в связи с выводом части устройств, входящих в ОУ, за его пределы;

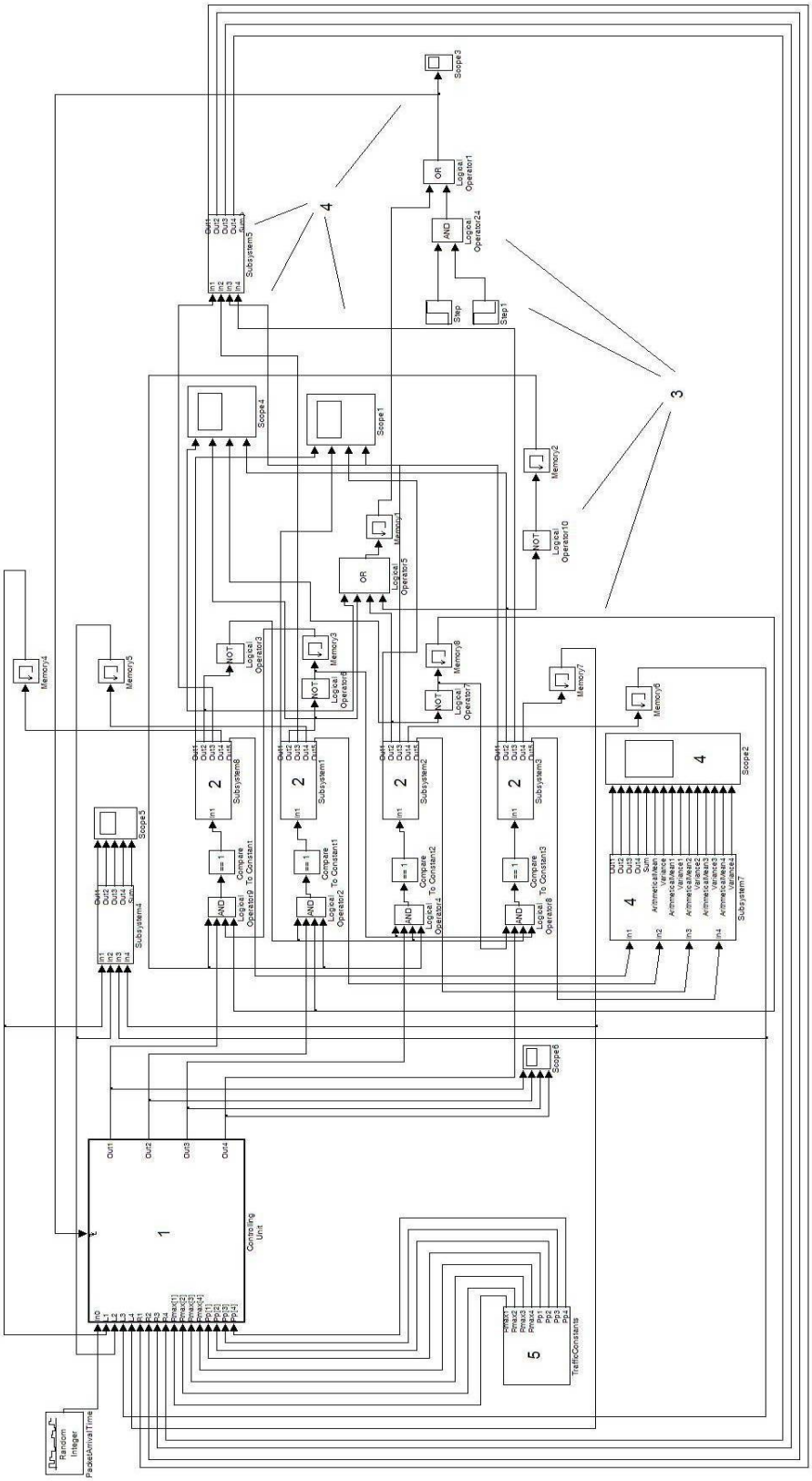


Рис. 2. Модель операционного устройства стохастического алгоритма, представленная в системе MatLab Simulink

• выходной порт подсистемы (блок *Out*). Этот блок предназначен для задания элемента входной части интерфейса той или иной подсистемы, в данном случае операционного устройства. В данной модели представлены два выхода: номер передаваемого бита пакета и индикатор фактической работы устройства;

• комбинационная логика, представленная логическими функциями «и», «или», «не», «исключающее или» (блоки *And, Or, Not, Xor*).

• инкрементирующие счетчики (блок *Count Up*). Эти блоки предназначены для: отсчитывания интервалов времени между приходами пакетов в очередь (в случае моделирования), подсчета переданных бит за одно обращение управляющего устройства (УУ) к очереди ОУ (нужно исключительно для сбора статистики) и подсчета суммарного времени фактической работы ОУ (нужно исключительно для сбора статистики):

• числовые константы (блок *Constant*). Эти блоки предназначены для хранения константных величин, соответствующих значениям минимальной длины пакета и количества тактов, необходимых для «внутренних» целей, что актуально для Ethernet-протокола;

• сумматоры (блок *Sum*);

• устройства вывода пользовательской информации (блок *Scope*).

3. Средства синхронизации, устраняющие конфликты при попытках доступа к разделяемому ресурсу (каналу, процессорному времени и т.д.), представленные блоками *And*, *Or*, *Not*, *Compare To Constant*, *Memory*, *Step* и др.

4. Устройства вывода пользовательской информации (блок *Scope* и др.).

5. Блок пользовательских настроек (ПЗУ).

Моделирование стохастического алгоритма и алгоритма *DRR*, описанное в [10], производилось с параметрами, идентичными друг другу, а именно:

1) равные между собой полосы пропускания для всех очередей;

2) количество очередей в каждой из систем диспетчеризации равно четырем;

3) приоритеты очередей 0,5/0,35/0,1/0,05 для первой, второй, третьей и четвертой очередей соответственно (актуально только для стохастического алгоритма);

4) распределение времен поступления заявок (кадров) в очереди – равномерное, с равными для каждой очереди семенами (в иноязычной литературе – *seed*) [5];

5) равные времена моделирования;

6) равные отношения интенсивностей входных заявок (потока бит) к номинальной пропускной способности по каждому из классов трафика каналов (80 %).

Результаты моделирования приведенных систем приведены в табл. 1.

На рис. 3 представлена динамика изменения длительности очередей (в байтах от времени).

В результате проведенного моделирования сделаны следующие выводы:

1. Средняя длина более чувствительных к задержкам очередей ниже средней длины очередей менее чувствительных к задержкам при использовании стохастической дисциплины в отличие от циклических дисциплин при

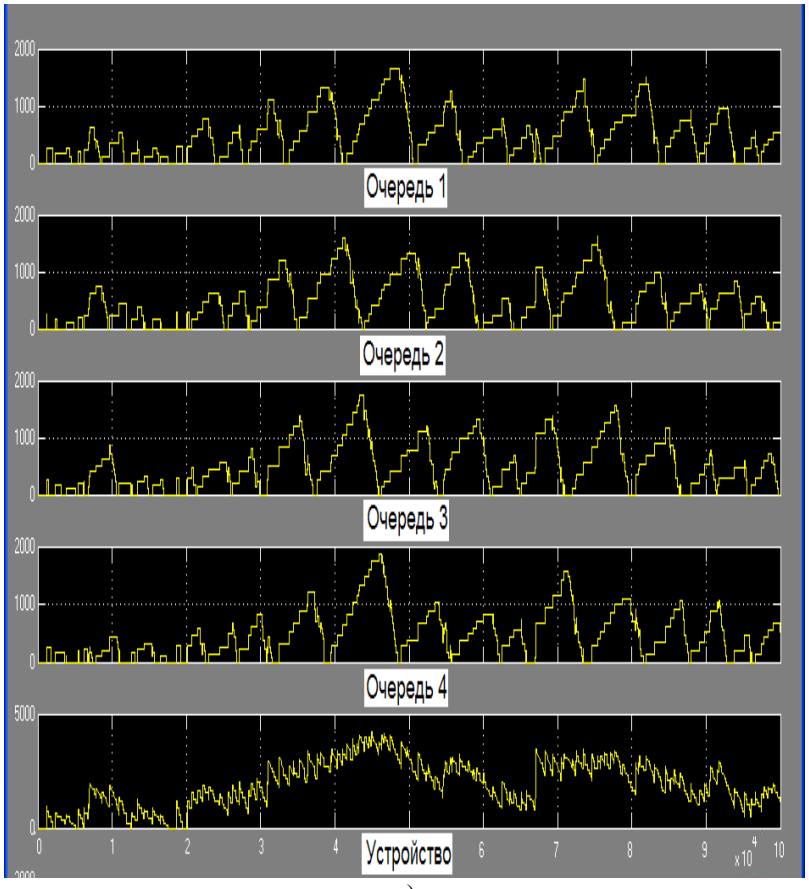
одинаковых отношениях интенсивностей входных заявок (потока бит) к номинальной пропускной способности по каждому из классов трафика.

2. Стандартное отклонение и дисперсия в абсолютном выражении ниже при использовании диспетчера DRR, чем стохастического диспетчера.

Таблица 1

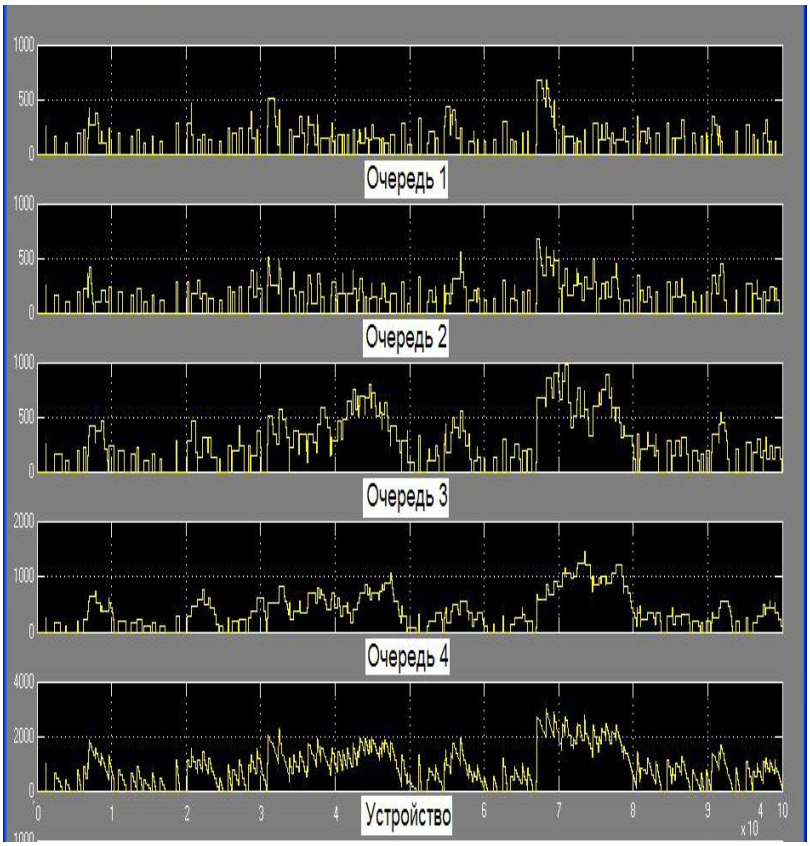
Данные о загрузке очередей

Вероятностные характеристики очередей	DRR					Стохастический				
	Очередь 1	Очередь 2	Очередь 3	Очередь 4	Устройство	Очередь 1	Очередь 2	Очередь 3	Очередь 4	Устройство
Стандартное отклонение (байт)	335	448	370	379	1007	116	128	215	253	612
Математическое ожидание (байт)	416	356	521	548	1842	69	103	228	315	715



а)

Рис. 3. Динамика изменения очередей стохастического диспетчера и алгоритма DRR: ***а*** – DRR; ***б*** – стохастический



б)

Рис. 3. Окончание

Выводы:

1. Распределение свободных ресурсов при использовании стохастического диспетчера является, как правило, более справедливым, чем при использовании циклических диспетчеров, за счет исключения цикличности в обслуживании очередей.

2. Средняя длина очередей при использовании стохастического диспетчера ниже на 61 %, чем при использовании циклических диспетчеров, а также стандартное отклонение длины очередей.

3. Средняя длина более чувствительных к задержкам очередей ниже средней длины очередей менее чувствительных к задержкам при использовании стохастической дисциплины в отличие от циклических дисциплин при одинаковых отношениях интенсивностей входных заявок (потока бит) к номинальной пропускной способности по каждому из классов трафика.

4. Произведен анализ общих принципов построения и архитектуры имитационных моделей диспетчеров коммутаторов Ethernet, разработаны модели нескольких циклических диспетчеров и разработана имитационная модель стохастического алгоритма в целях дальнейшего их сравнительного анализа.

Список литературы

1. **Олифер, В. Г.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб : Питер, 2010. – С. 943.

2. **Вегешна, Ш.** Качество обслуживания в сетях IP / Ш. Вегешна. – М. : Вильямс, 2003. – С. 368.
3. **Кучерявый, Е. А.** Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет / Е. А. Кучерявый. – СПб. : Наука и Техника, 2004. – С. 336.
4. **Фишман, Е. Б.** Разработка модели и инструментальных средств проектирования и исследования информационных систем / Е. Б. Фишман. – М. : Московский государственный институт электроники и математики, 2007. – С. 111.
5. **Феллер, В.** Введение в теорию вероятностей и ее приложения. / В. Феллер. – М. : Финансы и статистика, 1984. – Т. I. – С. 511.
6. Patent 5,247,677 U.S. STOCHASTIC PRIORITY-BASED TASK SCHEDULER / Welland et al. (1993). – URL: http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&I=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/5247677.
7. **Коршикова, Л. А.** Операционная система как система управления вычислительными ресурсами / Л. А. Коршикова. – Новосибирск : НГТУ. – URL: http://ermak.cs.nstu.ru/~mos/index.html.
8. **Семенов, А. О.** Стохастический подход к диспетчеризации очередей / А. О. Семенов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. ст. XII Междунар науч.-техн. конф. (г. Курск, 12–16 мая 2015 г.). – Курск : ЮЗГУ, 2015. – С. 331–333.
9. **Семенов, А. О.** Формальное представление стохастического алгоритма диспетчеризации очередей в телекоммуникационном оборудовании / А. О. Семенов, Н. Н. Коннов // Новые информационные технологии и системы (НИТИС-2014) : сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Пенза, 25–27 ноября 2014 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 301–306.
10. **Семенов, А. О.** Компьютерное моделирование стохастического алгоритма диспетчеризации очередей в телекоммуникационном оборудовании / А. О. Семенов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 306–310.
11. **Коннов, Н. Н.** Исследование проблемы эффективного использования ресурсов вычислительной сети и сравнительный анализ алгоритмов диспетчеризации очередей обслуживания / Н. Н. Коннов, А. О. Семенов // Современный взгляд на будущее науки : сб. ст. междунар науч.-практ. конф. – Уфа : Аэтерна, 2014. – С. 200–202.
12. **Гулиус, В. А.** Интеллектуальная модель системы массового обслуживания с очередью типа D/D/1 в среде SimEvents (MATLab/SimuLink) / В. А. Гулиус. – URL: http://model.exponenta.ru/cl_gva_02.html.
13. **Гулиус, В. А.** Имитационная модель коммутатора / В. А. Гулиус. – URL: http://model.exponenta.ru/cl_gva_03.html.
14. **Дьяконов, В.** Simulink 4. Специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.

References

1. Olifer V. G., Olifer N. A. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. 4th ed. Saint-Petersburg: Piter, 2010, p. 943.
2. Vegeshna Sh. *Kachestvo obsluzhivaniya v setyakh IP* [IP network operating quality]. Moscow: Vil'yams, 2003, pp. 368.
3. Kucheryavyy E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivaniya v seti Internet* [traffic management and operating quality in the Internet]. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika, 2004, p. 336.
4. Fishman E. B. *Razrabotka modeli i instrumental'nykh sredstv proektirovaniya i issledovaniya informatsionnykh sistem* [Development of models and tools for information sys-

tems design and research]. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki, 2007, p. 111.
5. Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostey i ee prilozheniya* [Introduction into the probability theory and its applications]. Moscow: Finansy i statistika, 1984, vol. I, p. 511.
6. *Patent 5,247,677 U.S. STOCHASTIC PRIORITY-BASED TASK SCHEDULER*. Welland et al. (1993). Available at: http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect2=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/search-bool.html&r=1&f=G&I=50&d=PALL&RefSrch=yes&Query=PN/5247677.
7. Korshikova L. A. *Operatsionnaya sistema kak sistema upravleniya vychisli-tel'nymi resursami* [Operating system as a system of computing resources management]. Novosibirsk: NGTU. Available at: http://ermak.cs.nstu.ru/~mos/index.html.
8. Semenov A. O. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologiii innovatsii: sb. st. XII Mezhdunar nauch.-tekhn. konf. (g. Kursk, 12–16 maya 2015 g.)* [Modern development systems, information technologies and innovations: proceedings of XII International scientific and practical conference (Kursk, 12th–16th May 2015)]. Kursk: YuZGU, 2015, pp. 331–333.
9. Semenov A. O., Konnov N. N. *Novye informatsionye tekhnologii i sistemy (NITIS-2014): sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Penza, 25–27 noyabrya 2014 g.)* [New information technologies and systems (NITIS-2014): proceedings of XI International scientific and practical conference (Penza, 25th-27th November 2014)]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 301–306.
10. Semenov A. O. *Komp'yuternoe modelirovanie stokhasticheskogo algoritma dispetcherizatsii ocheredey v telekommunikatsionnom oborudovanii* [On computer simulation of a stochastic dispatching algorithm in telecommunication equipment]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 306–310.
11. Konnov N. N., Semenov A. O. *Sovremennyy vzglyad na bu-dushchee nauki: sb. st. mezhdunar nauch.-prakt. konf.* [A modern view of the future of science: proceedings of the International scientific and practical conference]. Ufa: Aeterna, 2014, pp. 200–202.
12. Gulius V. A. *Intellektual'naya model' sistemy massovogo obsluzhivaniya s ochered'yu tipa D/D/1 v srede SimEvents (MATLab/SimuLink)*. [An intelligent model of a mass operating system with the D/D/1 queue type in the SimEvents environment (MATLab/SimuLink)]. Available at: http://model.exponenta.ru/cl_gva_02.html.
13. Gulius V. A. *Imitatsionnaya model' kommutatora* [Switch imitation model]. Available at: http://model.exponenta.ru/cl_gva_03.html.
14. D'yakonov V. *Simulink 4. Spetsial'nyy spravochnik* [Simulink 4. Special reference book]. Saint-Petersburg: Piter, 2002, 528 p.

Коннов Николай Николаевич
кандидат технических наук, профессор, кафедра вычислительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: knn@pnzgu.ru

Konnov Nikolay Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, professor, sub-department of computer engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Семенов Андрей Олегович
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: andre20071@yandex.ru

Semenov Andrey Olegovich
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.713
Коннов, Н. Н.

Стохастический подход к диспетчеризации очередей в коммутаторах / Н. Н. Коннов, А. О. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 72–83. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-7

УДК 004.94
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-8

Ю. И. Евсеева, А. С. Бождай

МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТОВ ВИРТУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Современная виртуальная образовательная среда является сложной системой, включающей как методические и дидактические, так и информационные и программные компоненты. Поскольку к числу программных компонентов могут относиться различные интерактивные тренажеры и тестирующие программы, обладающие адаптивными свойствами, актуальным является вопрос разработки методов синтеза подобных компонентов. Целью работы является разработка метода структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи был применен математический аппарат теории графов и гиперграфов, методы морфологического анализа и синтеза сложных систем, методы моделирования изменчивости программных систем.

Результаты. Разработан метод структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды, основанный на совместном применении технологии моделирования изменчивости и теории графов.

Выводы. Разработанный метод позволяет значительно сократить ресурсозатраты на разработку адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды, а также увеличить их жизненный цикл.

Ключевые слова: адаптивное обучающее программное обеспечение, ориентированный гиперграф, автоматизированное проектирование, моделирование изменчивости, виртуальная образовательная среда.

Yu. I. Evseeva, A. C. Bozhday

THE METHOD OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF ADAPTIVE SOFTWARE COMPONENTS OF THE VIRTUAL LEARNING ENVIRONMENT

Abstract.

Background. The modern virtual learning environment is a complex system that includes didactic and methodical components, as well as information and software components. As program components may include various interactive simulators and testing programs with adaptive properties, an important question is the development of methods of synthesis of these components. The aim of the work is to develop a method of structural and parametric synthesis of adaptive software components of the virtual learning environment.

Materials and methods. To solve this problem the authors used the mathematical apparatus of the graphs and hypergraphs theory, methods of morphological analysis

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-01553.

and synthesis of complex systems and methods of variability modeling of software systems.

Results. The researchers have developed a method of structural and parametric synthesis of adaptive software components of the virtual learning environment, based on the application of variability modeling techniques and the graph theory.

Conclusions. The developed method allows to significantly reduce resource consumption on the development of adaptive software components of the virtual learning environment, and to increase their life cycle.

Key words: adaptive educational software, oriented hypergraph, computer-aided design, variability modeling, virtual learning environment.

Введение

Современная виртуальная образовательная среда представляет собой информационно-образовательное пространство, построенное с помощью интеграции традиционных информационных носителей и компьютерных технологий [1]. К последним относятся распределенные базы данных, виртуальные библиотеки, оптимизированный учебно-методический комплекс (УМК), расширенный аппарат дидактики и т.д. В наши дни достаточно серьезное развитие получают интерактивные компоненты виртуальной образовательной среды, способные адаптироваться к индивидуальным особенностям учащегося. К числу компонентов подобного рода относятся различные обучающие программы, среди которых могут быть достаточно сложные в разработке виртуальные тренажеры. В связи с этим актуальность обретает вопрос разработки метода синтеза обозначенных интерактивных и адаптивных компонентов виртуальной образовательной среды.

1. Математическая модель адаптивного программного компонента виртуальной образовательной среды

В основе предлагаемого метода лежит математическая модель изменчивости, базирующаяся на гиперграфовом представлении диаграммы характеристик или структуры программного компонента [2, 3]. Диаграмма характеристик представляет собой модифицированное И/ИЛИ-дерево, которое, помимо стандартных взаимоотношений между структурными элементами системы по типам И и ИЛИ, включает в себя также:

1) отношение множественного ИЛИ;

2) отношение обязательного включения дочернего компонента;

3) отношение опционального включения дочернего компонента;

4) отношения, связывающие между собой компоненты, не являющиеся по отношению друг к другу родительскими или дочерними.

Предлагаемая математическая модель должна обеспечить формализацию следующих процессов и задач:

1) ручной и автоматический синтез отдельных состояний работы программного компонента;

2) верификация структурных решений, полученных в результате ручного или автоматического синтеза состояний работы программного компонента;

3) переключение между состояниями программного компонента в процессе его выполнения с учетом ряда показателей (таких, например, как аппа-

ратная конфигурация устройства, состояние среды выполнения, поведение пользователя и др.);

4) автоматическая генерация состояний не только в процессе проектирования программы, но и в процессе выполнения с учетом показателей, указанных в предыдущем пункте;

5) учет обширного списка разнородных объектов, составляющих программную систему: моделей, программных функций, переменных и т.д. (все перечисленные объекты подлежат реорганизации в процессе реализации адаптивного поведения);

6) обеспечение свойства инвариантности программного компонента к предметной области;

7) обеспечение прозрачности алгоритмов самоадаптации для конечного пользователя.

С учетом перечисленных требований математическая модель адаптивного программного компонента виртуальной образовательной среды имеет вид

$$M = (F, S, X),$$

где F – гиперграфовое представление общей структуры программы, изначально определенной с помощью диаграммы характеристик; $S = \{S_1, S_2, ..., S_k\}$ – конечное множество конфигураций (подмножеств элементов) диаграммы характеристик, каждая из которых является описанием определенного состояния адаптивного программного компонента (подграфом исходного гиперграфа); X – матрица переходов между состояниями программного компонента.

Общая структура программы представляет собой набор основных компонентов программы и взаимосвязей между ними, определенный в качестве морфологического множества, для описания которого используется диаграмма характеристик. Пример такой общей структуры представлен на рис. 1.

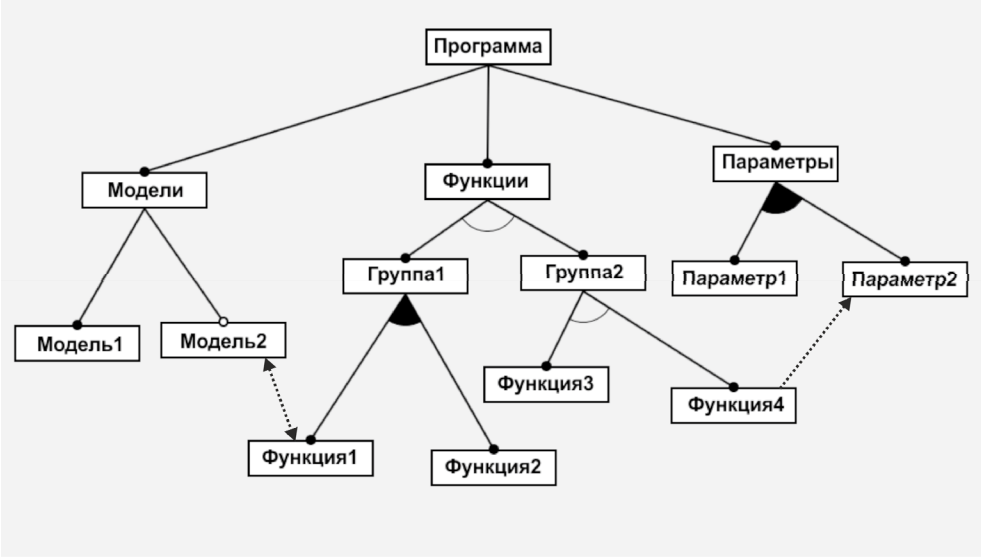


Рис. 1. Общая структура некоторой адаптивной обучающей программы

При преобразовании диаграммы характеристик в гиперграфовую форму необходимо руководствоваться следующими правилами [4]:

1) множество характеристик модели будет отображено на множество вершин соответствующего гиперграфа $Features \to V$;

2) множество взаимоотношений модели будет отображено на множество гиперребер, соединяющих вершины гиперграфа (характеристики модели) $\mathrm{Re}lations \to E$.

Гиперграфовое определение диаграммы характеристик будет иметь следующую форму:

$$F = (N, E, \Delta, \Psi),$$

где $N = \{N_1, N_2, ..., N_n\}$ – конечное множество вершин графа (характеристик исходной модели); $E = \{E_1, E_2, ..., E_m\}$ – конечное множество ребер графа (взаимоотношений исходной модели); $\Delta \in N$ – корневая вершина графа (корневая характеристика модели); $\Psi : E \to M, M \subset N \times N$ – функция маркировки, присваивающая значение мощности $mv(E_i) = (\min, \max) \in M$, где M – множество значений мощности диаграммы, N – множество вершин гиперграфа, каждому ребру E_i, так что $\min, \max \in \mathrm{Z} \wedge \min \geq 0, \quad \max > 0,$ $\min \leq \max \wedge \max \leq q_i$, где Z – множество целых чисел.

Под значением мощности понимается минимальное и максимальное количество вершин из головного множества гиперребра (т.е. множества вершин, в которые «входит» ребро), которые могут быть включены в конфигурацию описываемой гиперграфом модели характеристик (подграф исходного гиперграфа).

Матрица переходов содержит элементы x_{ij}, каждый из которых представляет собой интервал $[a; b)$ либо пустое множество $\varnothing$, причем $\bigcap x_{ij} = \varnothing$ и $\bigcup x_{ij} = [0; \infty)$, $j = 1...k, i$, фиксированы. Из состояния p осуществляется переход в состояние q, если показатель работы пользователя с программным компонентом $C \in x_{pq}$. Если $x_{pq} = \varnothing$, то переход из состояния p в состояние q невозможен.

Как видно, предложенная математическая модель изменчивости является достаточно наглядным и удобным инструментом синтеза структуры адаптивной программной системы. Элементы данной модели служат для описания пространства возможных состояний программы.

2. Метод структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов

Структурно-параметрический синтез – это процесс, целью которого является определение структуры объекта и нахождение значений параметров составляющих ее элементов таким образом, чтобы были удовлетворены условия задания на синтез (в большинстве случаев – технического задания). Методы структурно-параметрического синтеза активно используются в автоматизированном проектировании, CASE-средствах и CALS-технологиях. В свою очередь подходы к структурно-параметрическому синтезу использу-

ют технологии программирования, инженерии знаний, теории проектирования, искусственного интеллекта и т.д. В основе процесса структурно-параметрического синтеза систем любого назначения и сложности лежат принципы системного подхода [5, 6].

В предлагаемом методе структурно-параметрического синтеза можно выделить 5 этапов: этап морфологического анализа системы, этап теоретико-множественного преобразования структуры системы, этап генерации состояний, этап верификации системных конфигурации, этап определения взаимосвязей между состояниями. Рассмотрим каждый этап подробнее.

1. Этап морфологического анализа адаптивного программного компонента. В ходе выполнения этапа разрабатывается общая структура программы в форме диаграммы характеристик. Для построения диаграммы нужно выделить основные компоненты разрабатываемой программной системы. Далее необходимо определить возможные варианты реализации компонентов, а также оценить их совместимость друг с другом. В последнюю очередь выполняется определение пространства параметров элементов диаграммы. Расчет множества возможных параметров элемента является задачей, специфической для каждой конкретной программы и не рассматривается в обобщенном описании метода. Данный этап является частью процесса структурно-параметрического синтеза, его результатом является множество возможных структур адаптивного программного компонента, определенное в форме диаграммы характеристик, и множество возможных параметров элементов.

2. Этап теоретико-множественного преобразования общей структуры программного компонента. Результатом выполнения данного этапа является гиперграфовое представление полученной на предыдущем этапе общей структуры программы. Таким образом, заданное графически множество возможных структур приобретает формализованное представление, на основе которого обеспечивается проведение последующих этапов структурно-параметрического синтеза адаптивной программной системы.

3. Этап генерации состояний программного компонента (этап формирования системных конфигураций). Результатом выполнения этапа является множество возможных конфигураций исходной диаграммы характеристик, описывающей общую структуру программы. В формализованном виде конфигурации представлены как подграфы исходного гиперграфа, являющегося отображением базовой диаграммы характеристик. В отличие от предыдущих этапов, этап осуществляется не только в процессе разработки программной системы, но и в процессе ее выполнения. В ходе разработки программной системы пользователем вручную определяются необходимые структурные конфигурации, являющиеся базовыми для синтезируемой структуры программы. Во время выполнения на основе имеющихся базовых конфигураций формируются производные промежуточные конфигурации. Рассмотренный процесс является частью более широкого процесса адаптации в ходе выполнения программной системы.

Рассмотрим более подробно процедуру генерации промежуточных состояний адаптивного программного компонента. Пусть X, Y – два состояния программы, которым соответствуют одноименные непустые множества вершин гиперграфа, представляющего общую структуру программной системы.

Введем понятие расстояния между состояниями системы:

$$D(X,Y) = 1 - \frac{|X \cap Y|}{max(|X|,|Y|)}.$$

Оно обладает следующими свойствами:

1) $D(X,Y) = D(Y,X)$;
2) $D(X,X) = 0$;
3) $D(X,Y) = 1$, только если $X \cap Y = \varnothing$;
4) $D(X,Y) \in [0;1]$.

Понятие расстояния можно интерпретировать следующим образом: чем больше у состояний X и Y общих вершин, тем ближе состояния друг к другу; если состояния содержат одни и те же вершины, то расстояние между ними равно нулю; если состояния не содержат ни одной общей вершины, то расстояние между ними равно единице.

Пусть требуется сгенерировать состояние Z, промежуточное по отношению к X и Y. Тогда для состояния должно выполняться следующее условие:

$$D(Z,Y) = D(Z,X) = \frac{D(X,Y)}{2}.$$

Таким образом, состояние Z будет находиться «между» состояниями X и Y на одинаковом расстоянии от них, равном половине расстояния между X и Y. Такое состояние можно получить, если взять, например, половину вершин из состояния X, а другую половину – из состояния Y.

Если требуется сгенерировать $N \geq 1$ последовательных промежуточных состояний Z_i, $i = 1,2,...,N$, то для состояний должны выполняться условия

$$D(Z_i,X) = \frac{i}{(N+1)} \cdot D(X,Y), \quad D(Z_i,Y) = \frac{(N+1-i)}{(\mathrm{N}+1)} \cdot D(X,Y).$$

Таким образом, промежуточные состояния будут расположены равномерно между состояниями X и Y.

4. Этап верификации системных конфигураций. Основное назначение этапа – поиск и исправление ошибок в системных конфигурациях, описывающих отдельные состояния адаптивного программного компонента [6]. Ошибки могут возникать в результате нарушения правил диаграммы как в результате автоматической генерации состояния системы, так и в случае его формирования пользователем вручную. С этой целью используются специализированные алгоритмы на гиперграфах.

5. Этап определения взаимосвязей между состояниями программного компонента. Результатом выполнения этапа является синтезируемая структура программы. Для определения синтезируемой структуры необходимо задание матрицы переходов. Как именно задавать матрицу переходов – непосредственно пользователем или посредством промежуточных расчетов – вопрос, имеющий второстепенный характер.

Итоговую структуру адаптивной программной системы, полученной в результате синтеза, можно представить в виде ориентированного графа следующим образом:

$$D = (V, E, H),$$

где $V = S = \{S_1, S_2, .., S_k\}$ полностью соответствует переменной S в определении математической модели и представляет собой множество возможных состояний программного компонента, каждое из которых является гиперграфом; $E = \{E_1, E_2, .., E_m\}$ – множество ориентированных ребер, связывающих между собой состояния; $H = \{H_1, H_2, .., H_n\}$ – множество характеристик ориентированных ребер.

На рис. 2 представлено графическое изображение некоторой синтезированной структуры программного компонента в форме графа.

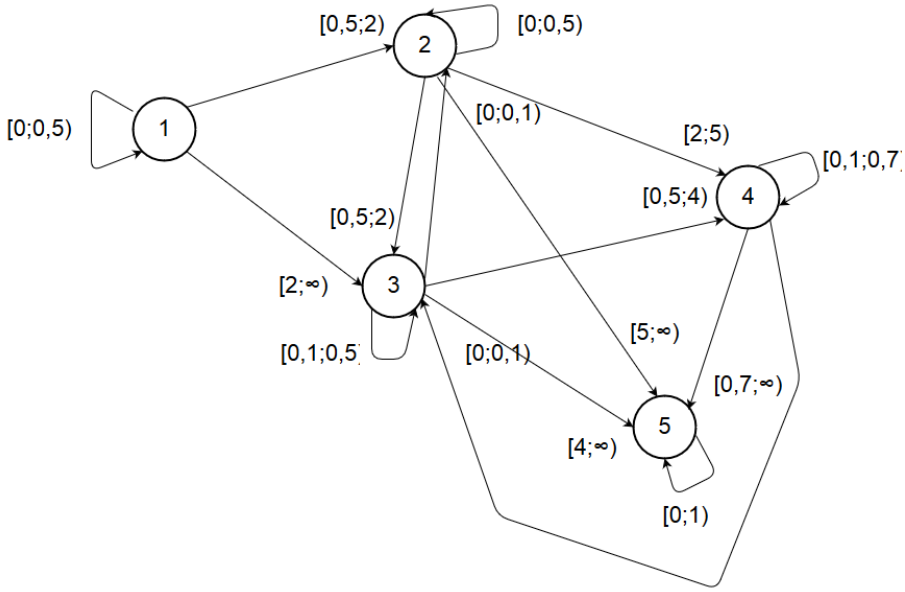


Рис. 2. Графовое представление синтезируемой структуры программного компонента

Представление синтезируемой структуры программы в форме ориентированного графа позволит применять методы дискретной математики для решения ряда задач, таких как поиск кратчайшего пути или циклов. Данные задачи могут быть актуальны при построении программного компонента определенного типа.

Заключение

Предложенный метод структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды позволяет формализовать сложную математическую процедуру задания изменчивости наглядным, простым и интуитивно понятным образом с использованием средств визуального проектирования. Использование метода на практике позволит увеличить жизненный цикл обучающих систем и снизить ресурсо-

затраты на их создание, поддержать мобильность электронного образования, улучшить адаптивные свойства обучающего программного обеспечения.

Список литературы

1. **Пелюшенко, А. В.** Обучающие среды и интеллектуальные обучающие системы: возможности использования в образовательном процессе / А. В. Пелюшенко // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2006. – № 8. – С. 48–50.
2. **Younis, O.** Systems variability modeling: a textual model mixing class and feature concepts / O. Younis, S. Ghoul, M. H. Alomari // International Journal of Computer Science & Information Technology. – 2013. – № 5. – P. 127–139.
3. **Baresi, L.** Dynamically evolving the structural variability of dynamic software product lines / L. Baresi, C. Quinton // Proceedings of the 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. – New York : ACM, 2015. – P. 57–63.
4. **Schobbens, P. E.** Feature diagrams: a survey and formal semantics / P. E. Schobbens, P. Heymans, J. C. Trigaux // 14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06). – Washington : IEEE Computer Society, 2011. – P. 139–148.
5. **Кумунжиев, К. В.** Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / К. В. Кумунжиев. – Ульяновск : УлГУ, 2003. – 240 с.
6. **Финогеев, А. А.** Оценка информационных рисков в распределенных системах обработки данных на основе беспроводных сенсорных сетей / А. А. Финогеев, А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 49–60.

References

1. Pelyushenko A. V. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2006, no. 8, pp. 48–50.
2. Younis O., Ghoul S., Alomari M. H. *International Journal of Computer Science & Information Technology*. 2013, no. 5, pp. 127–139.
3. Baresi L., Quinton C. *Proceedings of the 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*. New York: ACM, 2015, pp. 57–63.
4. Schobbens P. E., Heymans P., Trigaux J. C. *14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06)*. Washington: IEEE Computer Society, 2011, pp. 139–148.
5. Kumunzhiev K. V. *Teoriya sistem i sistemnyy analiz: ucheb. posobie* [The theory of suystems and system analysis: tutorial]. Ulyanovsk: UlGU, 2003, 240 p.
6. Finogeev A. A., Finogeev A. G., Nefedova I. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2016, no. 2 (38), pp. 49–60.

Евсеева Юлия Игоревна
ассистент, кафедра систем автоматизированного проектирования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: shymoda@mail.ru

Evseeva Yuliya Igorevna
Assistant, sub-department of CAD systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бождай Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор, кафедра систем автоматизированного проектирования, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: bozhday@yandex.ru

Bozhday Aleksandr Sergeevich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of CAD systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.94
Евсеева, Ю. И.
Метод структурно-параметрического синтеза адаптивных программных компонентов виртуальной образовательной среды / Ю. И. Евсеева, А. С. Бождай // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 84–92. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-8

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 623.681.9
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-9

С. Е. Ашанин, В. Н. Федотов, А. В. Федотов

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ОБЪЕКТА В СИСТЕМЕ СЛЕЖЕНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. С целью обеспечения высокой эффективности применения современных оптико-электронных приборов важное значение придают автоматизации на основе средств микроэлектроники и вычислительной техники, а также широкого использования лазеров и применения перспективной элементной базы. В настоящее время проблема комплексирования тепловизионного информационного и лазерного измерительного каналов носит достаточно разрозненный характер. Поэтому предложенный общий алгоритм выполнения операций при обработке изображений является актуальным.

Материалы и методы. Для определения величины оптического потока использован метод дифференциального анализа, позволяющий связывать временные и пространственные рассогласования между различными кадрами. Также использован метод поиска наилучшего согласования блоков, который в сочетании с прогнозированием траектории движения позволяет существенно повысить скорость обработки путем исключения из анализа блоков, в которых появление объекта маловероятно. Данные методы обеспечивают оптимизацию размеров блоков при проведении оценки габаритов и скорости движения объекта.

Результаты. В настоящее время разработаны алгоритмы и программы для всех этапов обработки тепловизионного изображения. Тестирование алгоритмов производилось на специально сформированных изображениях, моделирующих различные ситуации, а также на реальных объектах военной техники.

Выводы. В работе представлен алгоритм обработки тепловизионного изображения, позволяющий рассчитывать скорость движения объекта при различных ракурсах его движения. Оценены погрешности определения скорости для различных ракурсов движения. За счет усреднения яркости тепловизионного изображения до максимальной увеличена эффективность фильтрации. Смоделированы и предложены алгоритмы спектральной селекции. Приведены результаты обработки тепловизионных изображений на объектах штатной военной техники.

Ключевые слова: алгоритм, оптико-электронный прибор, объект, система координат, тепловизионный модуль, селекция, фильтрация.

S. E. Ashanin, V. N. Fedotov, A. V. Fedotov

ALGORITHMIZATION OF MOBILE OBJECT'S THERMAL IMAGE PROCESSING IN A TRACKING SYSTEM

Abstract.

Background. In order to ensure high efficiency of modern optical-electronic devicesit it is necessary to attach great attention to automation on the basis of microelectronic and computer engineering means, as well as to broad laser usage and application of prospective integrated circuits. At the present time the problem of interconnecting thermal image informational and laser measuring channels is quite scattered. Therefore, the suggested general algorithm of operations during image processing is a topical one.

Materials and methods. To determine the optical flow value the authors used the method of differential analysis allowing to connect time and dimensional mismatches between various frames. The researchers also used the method of best matching of frame sections, which, together with movement trajectory forecasting, significantly increases the rate of processing by means of excluding the sections where an object is unlikely to appear from the analysis. The given methods ensure optimization of section sizes when estimating object's dimensions and movement velocity.

Results. Currently there have been developed algorithms and programs for all stages of thermal image processing. Testing of the algorithms was conducted on specially designed images simulating various situations, as well as on real military hardware.

Conclusions. The article presents the algorithm of thermal image processing, allowing to calculate object's movement velocity at various angles of its movement. The work evaluates velocity determination errors for various movement angles. The efficiency of filtering is improved due to averaging of thermal image brightness to the maximum. The article describes the designed and suggested algorithms of spectral selection, and displays the results of thermal image processing of standard military hardware.

Key words: algorithm, optical-electronic instrument, object, coordinate system, thermal imaging module, selection, filtering.

Оптико-электронные приборы специального назначения применяются в современных технических системах для обеспечения эффективности их функционирования. Создание и совершенствование оптико-электронных приборов идет по пути автоматизации на основе средств микроэлектроники и вычислительной техники, широкого использования лазеров, применения перспективной элементной базы [1].

Широкое применение оптико-электронные приборы (ОЭП) находят в системах управления комплексов ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ). Решение задач ОЭП комплексов РАВ при ведении тактических действий осуществляется в сложных условиях. Как правило, ОЭП выполняют задачи в приземном слое атмосферы, который подвержен значительным динамическим, флуктуационным изменениям. Тактическая обстановка характеризуется тем, что функционируют ОЭП в условиях огневого и оптико-электронного противодействия днем и ночью, в априорно неопределенной фоно-целевой обстановке мутных сред приземного слоя атмосферы.

Поэтому для обеспечения всесуточности, всепогодности решения задач по управлению комплексов РАВ в ОЭП производят комплексирование различных оптических каналов. Имеющиеся в настоящее время публикации по проблеме комплексирования тепловизионного информационного и лазерного измерительного канала носят достаточно разрозненный характер, особенно в части обеспечения помехоустойчивости и точности позицирования мобильного объекта [2].

При комплексировании необходимо учитывать следующие факторы:

– поиск, обнаружение объекта осуществляется на сложном радиационно неоднородном фоне;

– перемещение объекта осуществляется при разных ракурсах, что усложняет расчет скорости и направления его продольной оси;

– первичная обработка и преобразование инфракрасного излучения (ИК) производится тепловыми приемниками, которые характеризуются значительными шумами;

– оптическая система, формирующая тепловизионное изображение, характеризуется увеличением пространственной разрешающей способности;

– используются разные спектральные диапазоны функционирования тепловизионного и лазерного измерительного каналов, так как в оптических квантовых генераторах лазерного канала применяется активное вещество, обеспечивающее высокую надежность получения излучения на длинах волн 1,06 и 1,54 мкм.

Состав тепловизионного канала системы слежения комплекса РАВ показан на структурной схеме (рис. 1).

Оптическая система тепловизионного канала системы слежения выполняется из ИК-прозрачного материала (германий, кремний). ИК-объектив обеспечивает формирование пространства изображений удаленных объектов фоно-целевой обстановки в задней фокальной плоскости. Для преобразования изображения в электрический сигнал без предварительного охлаждения в фокальной плоскости объектива устанавливается болометрическая матрица.

Предварительно усиленный сигнал с выхода матрицы преобразуется в цифровой сигнал с помощью аналогового цифрового преобразователя (АЦП) и после первичной обработки поступает в центральный процессор. Результаты обработки отображаются на экране видеоконтрольного устройства или поступают в исполнительную систему. Вид поля зрения тепловизионного канала в пространстве объектов показан на рис. 2.

Процесс функционирования тепловизионного канала можно разделить на три этапа: получение изображения, первичная обработка и вторичная обработка сигналов.

Для формализации получения изображения выберем систему координат (СК). Пусть изображение объекта в тепловизионном канале формируется в связанной СК *OXZY* (рис. 3). Ось *OY* совпадает с оптической осью тепловизионного канала и направлена в сторону положительного распространения оптического излучения. С фокальной плоскостью объектива свяжем плоскую систему координат болометрической матрицы *О*м*XZ*, расположенную на расстоянии f от *OXZY* [3].

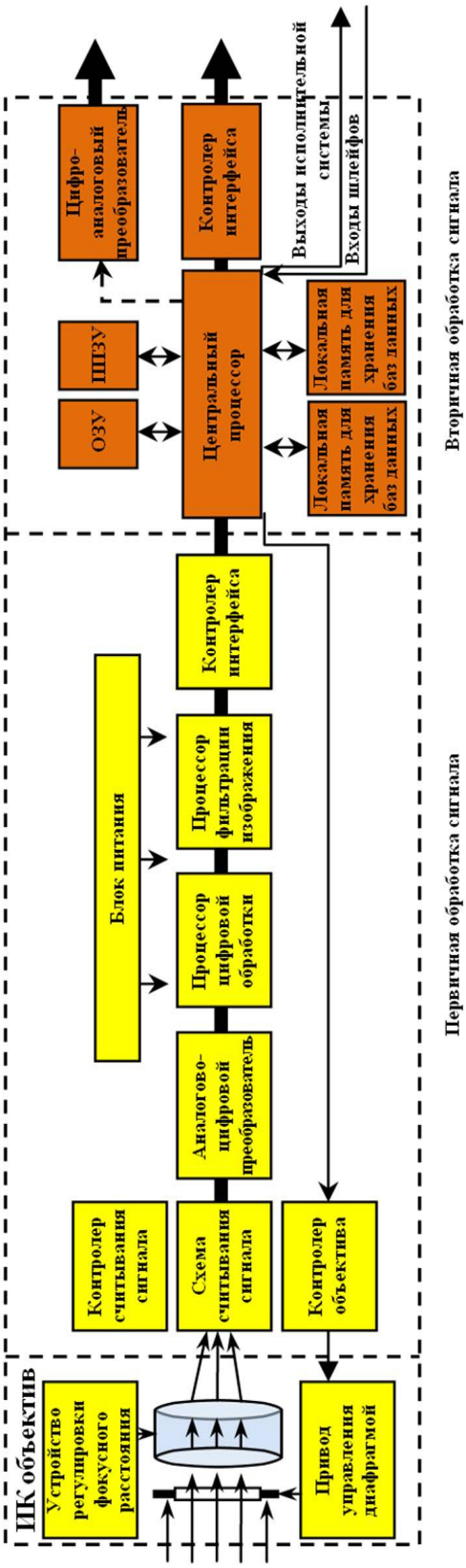


Рис. 1. Схема тепловизионного канала системы слежения

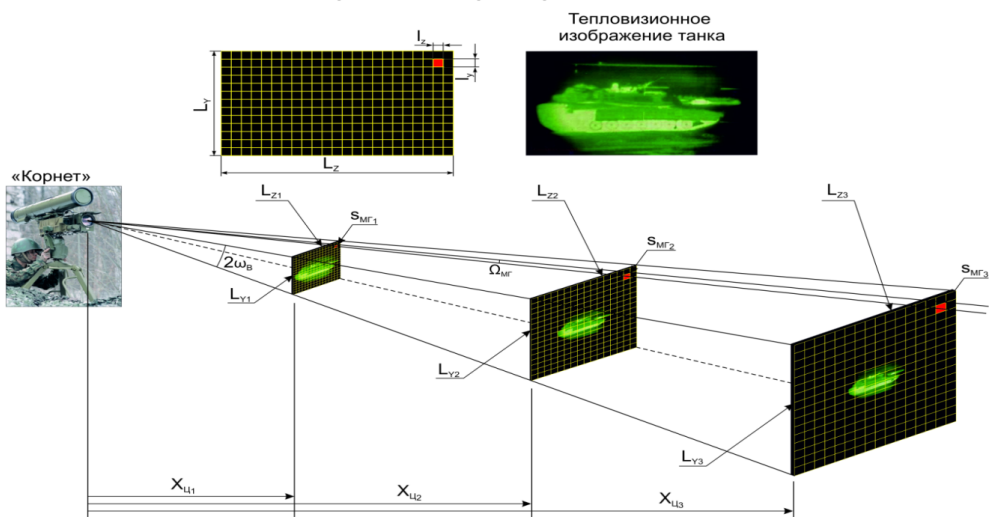


Рис. 2. Вид поля зрения тепловизионного канала в пространстве объектов

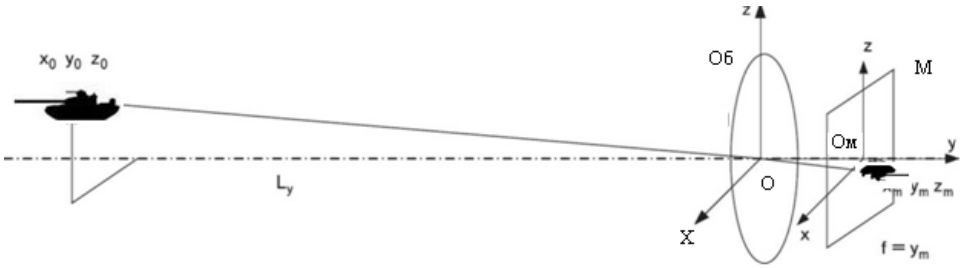


Рис. 3. Система координат тепловизионного канала

Пространство объектов представляется множеством точек x_0, y_0, z_0 объекта наблюдения, расположенного на удаленном расстоянии $L_y >> f$. Допустим, оптическая система свободна от аберраций, т.е. в фокальной плоскости получаем плоское изображение объекта наблюдения с сопряженными точек x_m, z_m при $y_m = f$.

Путем преобразований получим выражения, определяющие связь между координатами в пространствах объектов и изображений:

$$x_0 = \frac{x_m (y_0 - f)}{f};\ \ y_0 = \frac{y_m f}{y_m - f};\ \ z_0 = \frac{z_m (y_0 - f)}{f}, \tag{1}$$

тогда удаленное расстояние вычислится по формуле

$$L_y = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}\ . \tag{2}$$

Для измерения расстояния в комплексированном приборе можно использовать два способа:

– импульсный, с применением лазерного измерительного канала;

– базовый, с применением измерительного треугольника.

Первичная обработка изображения может проводиться по следующему алгоритму.

1. *Техническая и электронная коррекция изображения.*

Техническая коррекция осуществляется устройствами регулировки фокусного расстояния и управления диаграммой, электронная коррекция осуществляется по яркости и путем замещения нерабочих пикселей. В качестве критерия оптимальности выбирается значение диапазона средней яркости объекта, который выделяется оператором.

2. *Подавление фона и помех путем спектральной и электронной фильтрации изображения.*

Для подавления фона тепловизионного изображения применялись фильтры: абсолютного и нормированного уровней яркости, шума тепловизионного изображения.

Формализация фильтра абсолютного уровня яркости осуществлялась по условию, что абсолютное значение уровня яркости отличается меньше чем на Δe единиц в модели RGB, тогда пиксель на тепловизионном изображении показывался черным (рис. 4).

Рис. 4. Подавление фона по критерию абсолютного уровня яркости

$$\text{Если } \begin{cases} r_o(x,y) - r_f(x,y) < \Delta_e \\ b_o(x,y) - b_f(x,y) < \Delta_e \\ g_o(x,y) - g_f(x,y) < \Delta_e \end{cases} \text{, тогда } cc(x,y) = 1 \text{, иначе } cc(x,y) = 0,$$

где $r_o(x,y)$, $g_o(x,y)$, $b_o(x,y)$ – уровень яркости пикселя объекта в модели RGB; $r_f(x,y)$, $g_f(x,y)$, $b_f(x,y)$ – уровень яркость пикселя фона в модели RGB.

Листинг программы:.

```
procedurediferent{найти различия};
var
i,j:integer;
begin
ch:=25;
for i:=0 to wi do
for j:=0 to he do begin
if
(abs(r[i,j]-r2[i,j])<ch)and
(abs(b[i,j]-b2[i,j])<ch)and
(abs(g[i,j]-g2[i,j])<ch) then cc[i,j]:=255 else cc[i,j]:=0;
end;
end;
```

3. *Обнаружение мобильных объектов.*

Заметное движение характеризуется полем векторов смещений или полем оптического потока:

$$\nu = \left(\nu_x, \nu_y\right)^T = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right)^T. \quad (3)$$

Для определения оптического потока можно использовать метод разности кадра. При этом допускается одинаковое смещение сопряженных пикселей кадров.

4. *Обнаружение объекта наблюдения.*

С применением скользящего окна проводится гистограммный анализ тепловизионного изображения выделенных объектов с целью их классификации.

5. *Позицирование объекта наблюдения*.

Проводится с целью определения его места нахождения. Для этого:

– определяются координаты центра тяжести объекта в матричной СК.

– определяется дальность до объекта по формуле

$$y_0 = \frac{f\left(A + a_m\right)}{a_m} \approx \frac{fA}{a_m}, \quad (4)$$

где A – объект калибровки; a_m – размер изображения на болометрической матрице.

6. *Определение скорости объекта в связанной СК*.

При фронтальном перемещении объекта скорость определяется по координатам центра изображения объекта в связанной СК; при фронтальном – по масштабу размеров изображения. При перемещении под углом применяется комбинированный способ.

Линейные скорости рассчитываются по формулам:

$$V_x = \frac{h\left(y_0 - f\right)}{f}\left[\frac{\Delta x_p}{\Delta t}\right]; \quad V_{y_1} = -\frac{\left(y_0 - f\right)}{a_p}\left[\frac{\Delta a_p}{\Delta t}\right]; \quad (5)$$

$$V_{y_2} = -\frac{\left(y_0 - f\right)}{b_p}\left[\frac{\Delta b_p}{\Delta t}\right]; \quad V_z = \frac{h\left(y_0 - f\right)}{f}\left[\frac{\Delta z_p}{\Delta t}\right], \quad (6)$$

где Δx_p, Δz_p – приращение координат центра изображения объекта на болометрической матрице, пикс; h – шаг болометрической матрицы; f – удаление фокуса ИК-объектива; Δa_p, Δb_p – приращение к размерам изображения объекта на болометрической матрице, пкс.

Скорость при этом можно определить по формуле

$$V = \sqrt{\left[\frac{h(y_0 - f)}{f}\left[\frac{\Delta x_p}{\Delta t}\right]\right]^2 + \left[\frac{h(y_0 - f)}{f}\left[\frac{\Delta z_p}{\Delta t}\right]\right]^2 + \frac{(y_0 - f)^2}{a_p b_p}\left[\frac{\Delta a_p}{\Delta t}\right]\left[\frac{\Delta b_p}{\Delta t}\right]}. \quad (7)$$

Пример спектральной фильтрации объектов военной техники по яркости. Нормирование уровня яркости проводилось по разным формализованным описаниям фильтра (рис. 5).

Рис 5. Вычитание фона с учетом нормированного уровня яркости

Было проведено 520 испытаний, в результате получено оптимальное формализованное описание фильтра в следующем виде:

$$\text{если } \begin{cases} \dfrac{r_o(x,y)}{r_f(x,y)} - \dfrac{c_o(x,y)}{c_f(x,y)} < \Delta_c \\ \dfrac{b_o(x,y)}{b_f(x,y)} - \dfrac{c_o(x,y)}{c_f(x,y)} < \Delta_c \\ \dfrac{g_o(x,y)}{g_f(x,y)} - \dfrac{c_o(x,y)}{c_f(x,y)} < \Delta_c \end{cases}, \text{ тогда } cc(x,y) = 1, \text{ иначе } cc(x,y) = 0,$$

где $c_o(x,y)$, $c_f(x,y)$ – средняя яркость объекта и фона соответственно.

Пиксели не фильтруем при условии $\begin{cases} r_o(x,y) < \alpha, \\ b_o(x,y) < \alpha, \\ g_o(x,y) < \alpha. \end{cases}$

Листинг программы:

```
procedurecolorr{второй фильтр};
var
i,j:integer;
begin
ch:=0.038;ch2:=35;
for i:=0 to wi do
for j:=0 to he do begin
if (cc[i,j]=0) then begin
if ((r[i,j]<ch2) or (r2[i,j]<ch2)) and (b[i,j]>ch2) and
(b2[i,j]>ch2) and (g[i,j]>ch2) and (g2[i,j]>ch2) then
if ((abs(g[i,j]/g2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) and
((abs(b[i,j]/b2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) then cc[i,j]:=255
else cc[i,j]:=0;
if ((g[i,j]<ch2) or (g2[i,j]<ch2)) and (b[i,j]>ch2) and
(b2[i,j]>ch2) and (r[i,j]>ch2) and (r2[i,j]>ch2) then
if ((abs(r[i,j]/r2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) and
((abs(b[i,j]/b2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) then cc[i,j]:=255
else cc[i,j]:=0;
if ((b[i,j]<ch2) or (b2[i,j]<ch2)) and (r[i,j]>ch2) and
(r2[i,j]>ch2) and (g[i,j]>ch2) and (g2[i,j]>ch2) then
if ((abs(g[i,j]/g2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) and
((abs(r[i,j]/r2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) then cc[i,j]:=255
else cc[i,j]:=0;
if (r[i,j]>ch2) and (r2[i,j]>ch2) and (b[i,j]>ch2) and
(b2[i,j]>ch2) and (g[i,j]>ch2) and (g2[i,j]>ch2) then
if ((abs(g[i,j]/g2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) and
((abs(b[i,j]/b2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) and
((abs(r[i,j]/r2[i,j])-abs(c[i,j]/c2[i,j]))<ch) then cc[i,j]:=255
else cc[i,j]:=0;
end;end;
```

Шум в плоскости изображения отфильтровывался по пороговому значению однородности Δs при условии, что $S_{cc} < \Delta s$, где S_{cc} – площадь светлых (серых) пятен в пикселях.

Листинг программы:

```
procedure rep(i,j:integer);
begin
if (k<320) then  begin   inc(k);
if j<>he then if cc[i,j+1]=0 then begin
rec[k,0]:=i;rec[k,1]:=j+1;cc[i,j+1]:=255; rep(i,j+1); end;
if (i<>wi) and (k<320) then if cc[i+1,j]=0 then begin
rec[k,0]:=i+1;rec[k,1]:=j;cc[i+1,j]:=255; rep(i+1,j); end;
if (j<>0) and (k<320) then if cc[i,j-1]=0 then begin
rec[k,0]:=i;rec[k,1]:=j-1;cc[i,j-1]:=255; rep(i,j-1); end;
if (i<>0) and (k<320) then if cc[i-1,j]=0 then begin
rec[k,0]:=i-1;rec[k,1]:=j;cc[i-1,j]:=255; rep(i-1,j); end;
```

```
     end;
     end;

     procedure rep2(i,j:integer);
     begin
     if (k<320) then  begin   inc(k);
     if j<>he then if cc[i,j+1]=255 then begin
     rec[k,0]:=i;rec[k,1]:=j+1;cc[i,j+1]:=0; rep2(i,j+1); end;
     if (i<>wi) and (k<320) then if cc[i+1,j]=255 then begin
     rec[k,0]:=i+1;rec[k,1]:=j;cc[i+1,j]:=0; rep2(i+1,j); end;
     if (j<>0) and (k<320) then if cc[i,j-1]=255 then begin
     rec[k,0]:=i;rec[k,1]:=j-1;cc[i,j-1]:=0; rep2(i,j-1); end;
     if (i<>0) and (k<320) then if cc[i-1,j]=255 then begin
     rec[k,0]:=i-1;rec[k,1]:=j;cc[i-1,j]:=0; rep2(i-1,j); end;
     end;end;

     procedure recurs{фильтр шума};
     var
     i,j,h:integer;
     begin
     for i:=0 to wi do
     for j:=0 to he do
     ccc[i,j]:=0;
     for i:=0 to wi do
     for j:=0 to he do begin
     if (cc[i,j]=0) and (ccc[i,j]<>2) then begin
     k:=0;
     cc[i,j]:=255;
     rec[0,0]:=i;
     rec[0,1]:=j;
     rep(i,j);
     if    k=320    then    for    h:=0    to    320    do    begin
cc[rec[h,0],rec[h,1]]:=0; ccc[rec[h,0],rec[h,1]]:=2; end;  end;
     if (cc[i,j]=255) and (ccc[i,j]<>1) then begin
     k:=0;
     cc[i,j]:=0;
     rec[0,0]:=i;
     rec[0,1]:=j;
     rep2(i,j);
     if  k=320  then  for  h:=0  to  320  do  begin  cc[rec[h,0],
rec[h,1]]:=255; ccc[rec[h,0],rec[h,1]]:=1; end;end;end;
     end;
```

Изображение объекта без фона и гистограммы яркости модели RGB объекта показаны на рис. 6.

Примеры спектральной селекции изображений объектов различной яркости с помощью предложенных алгоритмов приведены на рис. 7.

Разработаны алгоритмы формирования и первичной обработки тепловизионного изображения. Верификация алгоритмов проводилась с применением тепловизионных изображений макетов военной техники. Предложенные алгоритмы предназначены для расчета скорости перемещения объекта с учетом ракурса движения в тепловизинных системах слежения.

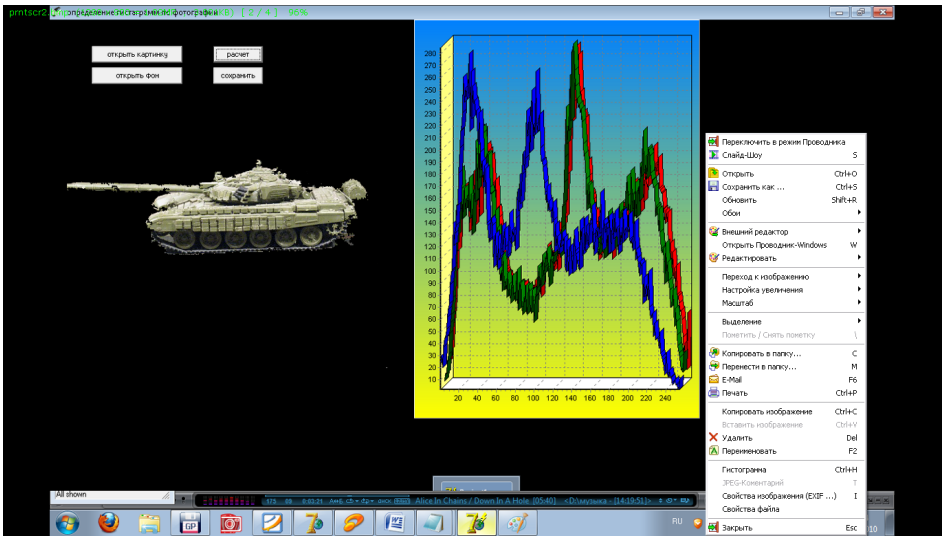
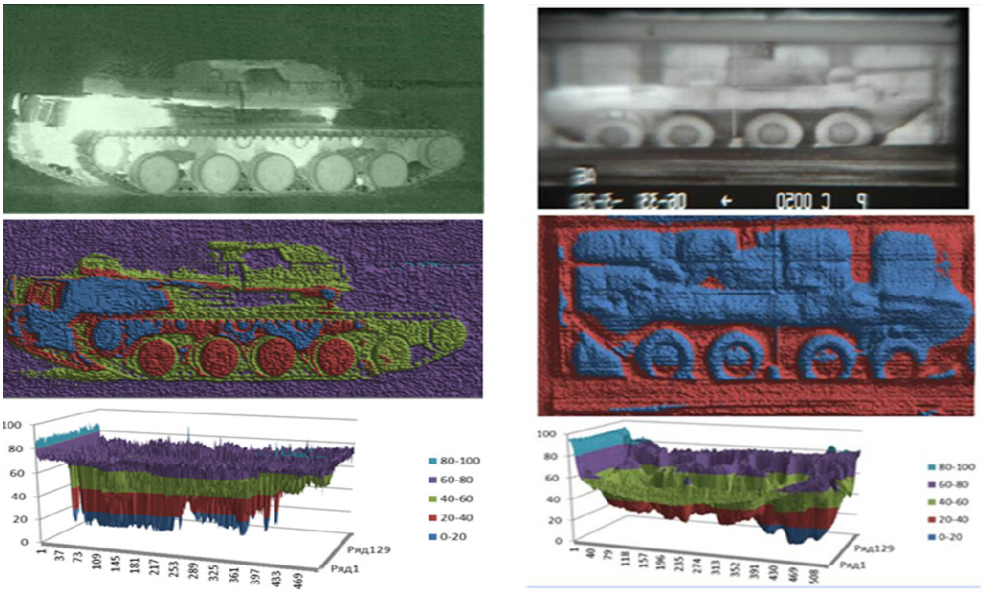


Рис. 6. Гистограммы яркости модели RGB объекта



а) ***б***)

Рис. 7. Примеры цифровой обработки тепловизионных изображений:
а – изображение на однородном фоне;
б – изображение на неоднородном яркостном фоне

Список литературы

1. **Тарасов, В. В.** Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 2007. – 192 с.
2. **Ашанин, С. Е.** Основы гистограммного метода для автоматизации классификаций типовых объектов / С. Е. Ашанин // Пути повышения эффективности применения ракетно-артиллерийских комплексов, методов их эксплуатации и ремонта : материалы XXXVI межвуз. науч.-техн. конф. / Пенз. филиал ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ». – Пенза, 2011. – С. 97–99.

3. **Ашанин, С. Е.** Энергетический расчет тепловизионной системы слежения противотанковых ракетных комплексов / С. Е. Ашанин // Наука и технологии : сб. материалов участников XXXI Рос. шк. по проблемам науки и технологии / Рос. акад. наук. Межрегион. совет по науке и технологиям. – Миасс, 2011. – С. 155.

References

1. Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. *Dvukh- i mnogodiapazonnye optiko-elektronnye sistemy s matrichnymi priemnikami izlucheniya* [Two- and multirange optical-electronic systems with matrix radiation receivers]. Moscow: Logos, 2007, 192 p.
2. Ashanin S. E. *Puti povysheniya effektivnosti primeneniya raketno-artilleriyskikh kompleksov, metodov ikh ekspluatatsii i remonta: materialy XXXVI mezhvuz. nauch.-tekhn. konf.* [Ways of efficiency improvement of rocket-artillery systems application, operation and maintenance: proceedings of XXXVI Interuniversity scientific and technical conference]. Penz. filial VUNTs SV «OVA VS RF». Penza, 2011, pp. 97–99.
3. Ashanin S. E. *Nauka i tekhnologii: sb. materialov uchastnikov XXXI Ros. shk. po problemam nauki i tekhnologii* [Science and technology: proceedings of XXXI Russian school on scientific and technological problems]. Ros. akad. nauk. Mezhregion. sovet po nauke i tekhnologiyam. Miass, 2011, p. 155.

Ашанин Сергей Евгеньевич
соискатель, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 37)

E-mail: staylex24@rambler.ru

Ashanin Sergey Evgen'evich
Applicant, Penza branch of Military Academy of Material Support (37 Lermontova street, Penza, Russia)

Федотов Владимир Николаевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра артиллерийских приборов, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 37)

E-mail: wlad_3008@mail.ru

Fedotov Vladimir Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of artillery devices, Penza branch of Military Academy of Material Support (37 Lermontova street, Penza, Russia)

Федотов Алексей Владимирович
кандидат технических наук, кафедра артиллерийских приборов, Пензенский филиал Военной академии материально-технического обеспечения (Россия, г. Пенза, ул. Лермонтова, 37)

E-mail: alek-fedotov@yandex.ru

Fedotov Aleksey Vladimirovich
Candidate of engineering sciences, sub-department of artillery devices, Penza branch of Military Academy of Material Support (37 Lermontova street, Penza, Russia)

УДК 623.681.9

Ашанин, С. Е.

Алгоритмизация обработки тепловизионного изображения мобильного объекта в системе слежения / С. Е. Ашанин, В. Н. Федотов, А. В. Федотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 93–104. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-9

УДК 681.586.773: 53.088.3
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-10

В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков

КОРРЕКЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОУДАРА

Аннотация.

Актуальность и цели. Расширение рабочего температурного диапазона пьезоэлектрических датчиков и улучшение их метрологических характеристик, особенно при работе в жестких условиях эксплуатации и воздействии нестационарных температур, является одной из актуальных задач при разработке датчико-преобразующей аппаратуры. Измерение динамических давлений таких жидких сред, как кислород и водород, характеризуется мощным и быстро изменяющимся температурным воздействием в диапазоне от минус 253 до плюс 200 °С, что вызывает температурные переходные процессы в конструкции пьезоэлектрических датчиков и, как следствие, возрастание во время переходных процессов погрешностей измерений входных неэлектрических величин.

Материалы и методы. Исследованы возможности уменьшения температурной погрешности измерения динамического давления пьезоэлектрическими датчиками.

Результаты. Приведена предлагаемая функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента и описан принцип ее работы. Показаны экспериментально определенные временные зависимости выходных сигналов пьезоэлектрического датчика при термоударном воздействии рабочей среды.

Выводы. Полученные результаты показывают возможность коррекции температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков динамического давления как от воздействия статических температур, так и от воздействия термоудара, путем использования электрической емкости схемы замещения пьезоэлемента в качестве информативного параметра по температуре.

Ключевые слова: пьезоэлемент, термоудар, эквивалентная схема замещения, коэффициент преобразования, коррекция температурной погрешности.

V. V. Kikot, V. P. Malanin, M. A. Shcherbakov

CORRECTION OF A TEMPERATURE ERROR OF A PIEZOELECTRIC DYNAMIC PRESSURE SENSOR UNDER THERMAL SHOCK

Abstract.

Background. The expansion of the working temperature range of piezoelectric sensors and the improvement of their metrological characteristics, especially when operating in harsh environments under the impact of non-stationary temperature, are among the urgent tasks of the development of sensor-transforming equipment. Measurement of the dynamic pressure of such liquids as oxygen and hydrogen, characterized by a powerful and rapidly changing temperature effect in the range from minus 253 to 200 °C, which causes temperature transients in the construction of piezoelectric sensors and, consequently, an increase nonelectric values input errors in transient processes.

Materials and methods. The authors researched a possibility of reducing the temperature error of the dynamic pressure measurement by piezoelectric sensors

Results. The article adduces a functional block diagram of a piezoelectric dynamic pressure sensor with a temperature error correction circuit of a piezoelectric element, and the functioning principle thereof. The work also shows experimentally determined time dependencies of output signals of a piezoelectric sensor under thermal shock exposure to the working environment.

Conclusions. The results show the possibility of correcting errors of the temperature of the piezoelectric dynamic pressure sensors, caused by exposure to static temperatures and thermal shocks, by using the electric capacitance of a piezoelement's equivalent circuit as a temperature-indicating parameter.

Key words: piezoelement, thermal shock, equivalent circuit, conversion coefficient, temperature error correction.

Введение

Расширение рабочего температурного диапазона пьезоэлектрических датчиков и улучшение их метрологических характеристик, особенно при работе в жестких условиях эксплуатации и воздействия нестационарных температур, является одной из актуальных задач при разработке датчико-преобразующей аппаратуры [1–3]. Измерение динамических давлений таких жидких сред, как кислород и водород, характеризуется мощным и быстроизменяющимся температурным воздействием в диапазоне от минус 253 до плюс 200 °С, что вызывает температурные переходные процессы в конструкции пьезоэлектрических датчиков и, как следствие, возрастание во время переходных процессов погрешностей измерений входных неэлектрических величин.

Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков динамического давления возможна в виде вводимой в сигнал измерения поправки по значениям сигнала дополнительного датчика температуры пьезоэлемента или воздействующей на него рабочей среды. Общеизвестны устройства, в которых при измерении давления такие влияющие дестабилизирующие факторы, как температура рабочей и окружающей среды, температура корпуса датчика, вибрации, измеряются введенными в измерительную систему дополнительными датчиками, сигналы с которых используются для коррекции выходных сигналов датчика давления [3–5]. Для этого дополнительно рядом с датчиком давления устанавливается, например, датчик температуры или датчик вибраций и на основании его сигналов в канал измерения давления вводится сигнал коррекции температурной или вибрационной погрешности измерения давления.

При воздействии нестационарных температур пространственное разделение чувствительных элементов по давлению и температуре приводит к возникновению между ними градиента температур и снижению эффективности коррекции температурной погрешности измерения давления, что особенно проявляется в условиях термоудара. Устранение градиента температур между чувствительными элементами по динамическому давлению и температуре возможно при условии измерения динамического давления и влияющей на результат его измерения температуры в одной точке пространства и в одно время, что возможно при использовании только одного пьезоэлемента как в качестве чувствительного элемента по давлению (вибрации), так и чувствительного элемента по температуре.

Основная часть

Электрофизические параметры материалов пьезоэлементов (диэлектрическая проницаемость, удельное объемное сопротивление и др.) зависят от температуры, пьезоэлемента, что в общем случае приводит к изменению значений параметров модели пьезоэлемента в виде его эквивалентной схемы замещения [6, 7]. Эквивалентная схема замещения пьезоэлемента наряду с управляемым входной измеряемой величиной источником тока (заряда) с внутренним сопротивлением $R_i \to \infty$ содержит включенные параллельно с источником тока сопротивление утечек пьезоэлемента и емкость пьезоэлемента, обусловленную диэлектрической проницаемостью материала пьезоэлемента. Эти пассивные электрические параметры схемы замещения, однозначно зависящие от температуры, можно использовать в качестве информативных параметров по температуре, преобразовав их отдельной измерительной цепью в сигнал коррекции по температуре [4]. Компенсация температурной погрешности пьезоэлемента при измерении давления возможна на последующих этапах преобразования сигналов с пьезоэлемента путем их обработки микроконтроллером и введения в коды соответствующих поправок по значениям сигналов преобразования информативного параметра схемы замещения пьезоэлемента по температуре.

При воздействии термоудара к температурной погрешности пьезоэлектрического датчика давления от стационарной температуры добавляется составляющая погрешности от термоудара [2]. Возникновение этой составляющей связано с пироэффектом пьезокерамики, а также с разделением во времени воздействия скачка температуры на мембрану, пьезоэлемент, корпус датчика, элементы крепления пьезоэлемента вследствие их различного пространственного положения относительно вектора воздействия градиента температуры, что приводит к изменению параметров, влияющих на функцию преобразования пьезоэлектрического датчика. Для компенсации температурной погрешности пьезоэлемента от воздействия термоудара необходимо измерить градиент температуры как разность температур между температурой пьезоэлемента и температурой какого-либо элемента конструкции датчика, расположенного относительно пьезоэлемента в направлении вектора градиента на некотором расстоянии. В качестве такого элемента можно выбрать применяемый в пьезоэлектрических датчиках динамического давления дополнительный пьезоэлемент для компенсации погрешности от вибраций корпуса датчика давления.

На рис. 1 представлена функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента, как от воздействия стационарной температуры, так и от воздействия термоудара. Первичный измерительный преобразователь (ПИП) датчика динамического давления выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, предназначенного для работы в диапазоне криогенных температур, который соединен кабельной перемычкой КП с блоком вторичного измерительного преобразователя (ВИП). Конструктивно ПИП датчика выполнен квазидифференциальным и состоит из двух идентичных пьезоэлементов: рабочего пьезоэлемента ПЭ1 и виброкомпенсирующего пьезоэлемента ПЭ2, расположенных внутри цилиндрического корпуса и разделенных друг от друга прокладкой. Пьезоэлемент ПЭ1 предназначен для измере-

ния динамического давления P, расположен в торце цилиндрического корпуса и защищен от воздействия рабочей среды мембраной. Пьезоэлемент ПЭ2 расположен далее по оси цилиндрического корпуса, защищен прокладкой от воздействия на него измеряемого динамического давления, предназначен для измерения вибраций V. Это позволяет при измерении динамического давления благодаря соответствующему включению пьезоэлементов в измерительную цепь компенсировать погрешности возникающие от вибраций корпуса датчика.

Пьезоэлементы ПЭ1 и ПЭ2 на рис. 1 показаны в виде эквивалентных схем замещения, состоящих из источников зарядов $q1$ и $q2$ с внутренними сопротивлениями $R_i \to \infty$, к которым параллельно подключены сопротивления утечек пьезоэлементов $R1$, $R2$ и электрических емкостей $C1$ и $C2$ пьезоэлементов.

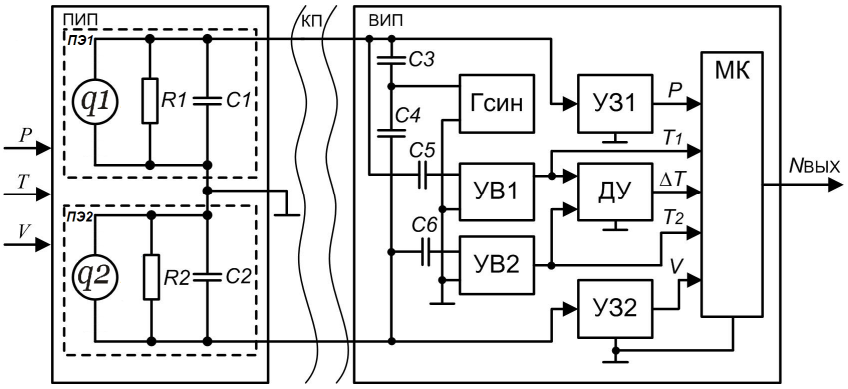


Рис. 1. Функциональная схема пьезоэлектрического датчика динамического давления со схемой коррекции температурной погрешности пьезоэлемента

В качестве информативного по температуре T параметра эквивалентной схемы замещения пьезоэлементов выбрано температурное изменение электрических емкостей $C1$ и $C2$. На основании закона Ома падение напряжения на выводах пьезоэлементов от протекания синусоидального тока генератора тест-сигнала $\Gamma_{\text{син}}$ при $R_i \to \infty$ определяется выражением

$$\dot{U}_{\text{ПЭ1(2)}} = \dot{I}_{\text{ГТС}} Z_{\text{ПЭ1(2)}} = \dot{I}_{\text{ГТС}} \frac{R1(2)\dfrac{1}{j\omega C1(2)}}{R1(2) + \dfrac{1}{j\omega C1(2)}}, \qquad (1)$$

где $\omega = 2\pi f_{\text{ГТС}}$; $I_{\text{ГТС}}$ и $f_{\text{ГТС}}$ – амплитуда и частота синусоидального тока генератора $\Gamma_{\text{син}}$ соответственно; $R1(2)$ и $C1(2)$ – сопротивления утечек $R1$, $R2$ и электрические емкости $C1$ и $C2$ пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 соответственно; $Z_{\text{ПЭ1(2)}}$ – комплексное сопротивление пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 соответственно.

Выбором значения частоты $f_{\text{ГТС}}$ тест-сигнала генератора $\Gamma_{\text{син}}$ достигается выполнение соотношения $R1(2) >> \dfrac{1}{\omega C1(2)}$, при этом модуль выражения (1) имеет вид

$$U_{\text{ПЭ1(2)}} \approx I_{\text{ГТС}} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C1(2)}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что модуль падения напряжения на выводах пьезоэлементов от протекания тока генератора $\Gamma_{\text{син}}$ обратно пропорционален значениям электрических емкостей $C1$ и $C2$, зависящих от температур пьезоэлементов. Пьезоэлементы ПЭ1 и ПЭ2 соединены через прецизионные конденсаторы $C3$ и $C4$ соответственно с выходом генератора стабильного по частоте и амплитуде синусоидального напряжения $\Gamma_{\text{син}}$ блока ВИП. Для частотного разделения сигналов, снимаемых с выводов каждого пьезоэлемента, по давлению и по температуре значение частоты генератора $\Gamma_{\text{син}}$ должно превышать верхнюю границу частотного диапазона измерения динамического давления. При значениях электрических емкостей $C1$ и $C2$ значительно больших, чем $C3$, $C4$ и $C5$, $C6$, создается условие измерения реактивных сопротивлений электрических емкостей $C1$ и $C2$ в режиме заданного тока с минимальным влиянием на результат измерения динамического давления. Электрические сигналы, пропорциональные давлению и вибрации, снимаются соответственно с выводов пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2, усиливаются усилителями зарядов УЗ1 и УЗ2 и поступают в виде напряжений P и V на аналоговые входы микроконтроллера МК для последующей обработки и коррекции погрешностей от температуры и вибраций.

На рис. 2 представлена экспериментальная временная зависимость выходного сигнала ПИП пьезодатчика при пульсациях давления 50 кПа с частотой 50 Гц при термоударном воздействии рабочей среды минус 196 °С с градиентом 200 °С в секунду.

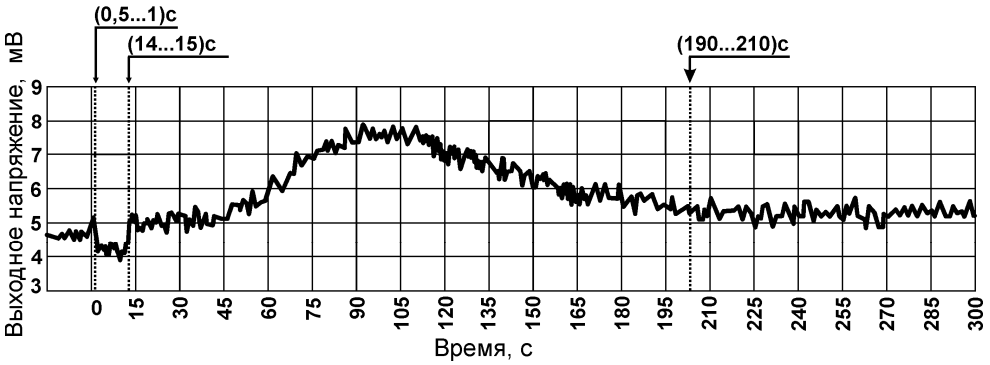


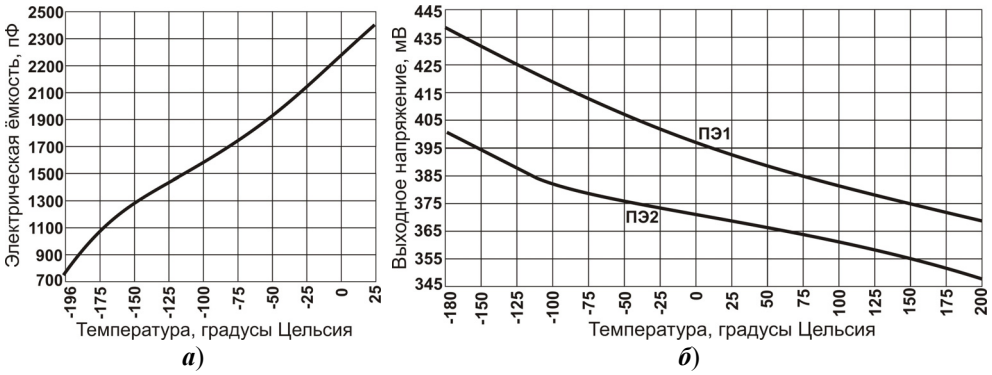
Рис. 2. Выходной сигнал ПИП датчика с пьезоэлементами из модифицированного материала ЦТС 83Г

Из рис. 2 видно, что в первые 0,5–1 с после начала термоудара из-за мгновенной деформации мембраны наблюдается скачок выходного напряжения с 4,7 до 5,2 мВ. Затем в связи с пироэффектом в ПЭ1 из-за высокоградиентного изменения его температуры и пьезоэффекта в ПЭ1 от его деформации из-за различий коэффициентов теплового линейного расширения элементов ПИП датчика уровень сигнала понижается до 4,2 мВ. Далее на протяжении времени с 15 по (190–210) с видно, что из-за различий температур ПЭ1 и ПЭ2 выходной сигнал датчика возрастает, а потом, по мере выравнивания

температур ПЭ1 и ПЭ2, снижается. Начиная с (190–210) с переходные процессы в ПИП, связанные с термоударом, завершаются, выходной сигнал ПИП становится стабильным.

На рис. 3,***а*** представлена экспериментально снятая зависимость электрической емкости пьезоэлемента из модифицированного материала ЦТС-83Г при воздействии температуры в диапазоне от минус 196 до плюс 25 °С. Из рис. 3,***а*** видно, что значение емкости пьезоэлемента при изменении температуры в указанном диапазоне меняется на 70 % относительно значения при 25 °С, что вполне достаточно для получения информативного сигнала для коррекции погрешности по температуре.

На рис. 3,***б*** представлены экспериментально снятые для схемы на рис. 1 зависимости среднеквадратичных значений падений напряжений на выводах рабочего и компенсирующего пьезоэлементов из модифицированного материала ЦТС-83Г датчика динамических давлений при воздействии температуры в диапазоне от минус 180 до плюс 200 °С при частоте 1 МГц синусоидального напряжения генератора $\Gamma_{син}$ и значениях электрических емкостей конденсаторов *С*3, *С*4, равных по 50 пФ каждый.



а) ***б***)

Рис. 3. Зависимость электрической емкости пьезоэлемента от температуры (***а***); зависимость выходных напряжений пьезоэлементов ПЭ1 и ПЭ2 от температуры (***б***)

На рис. 4 представлены экспериментально снятые временные зависимости падений напряжений при протекании тока генератора $\Gamma_{син}$ с частотой 1 МГц на электродах рабочего и компенсирующего пьезоэлементов при термоударном воздействии рабочей среды минус 196 °С с градиентом 200 °С в секунду. На рис. 5 приведена временная зависимость разности падений напряжений на пьезоэлементах, которая поступает на вход дифференциального операционного усилителя ДУ схемы, показанной на рис. 1.

Заключение

Полученные результаты показывают возможность коррекции температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков динамического давления как от воздействия статических температур, так и от воздействия термоудара путем использования электрической емкости схемы замещения пьезоэлемента в качестве информативного параметра по температуре. Соответствующий выбор частоты тест-сигнала для измерения электрической емкости схемы за-

мещения пьезоэлемента позволяет, используя частотные фильтры, разделить сигналы для измерения динамического давления и температуры. Использование полученных информативных сигналов при обработке микроконтроллером позволяет:

– скомпенсировать температурные погрешности от воздействия статической температуры рабочей среды, а также все составляющие погрешности от термоудара, не ограничивая частотный диапазон измерения динамического давления за счет соответствующего выбора частоты тест-сигнала генератора $Г_{син}$ и значений электрических емкостей конденсаторов $C3$–$C6$;

– определить коэффициенты функции коррекции температурной погрешности пьезоэлемента для рабочей программы микроконтроллера возможно по результатам предварительных испытаний и градуировки датчика.

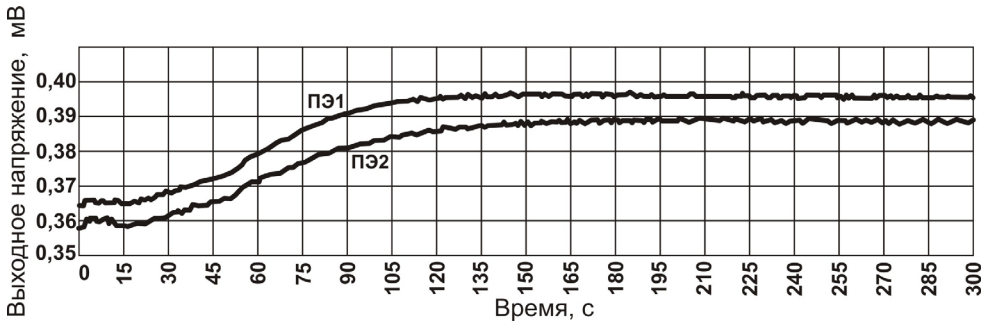


Рис. 4. Выходные сигналы с рабочего ПЭ1
и виброкомпенсирующего ПЭ2 пьзоэлементов

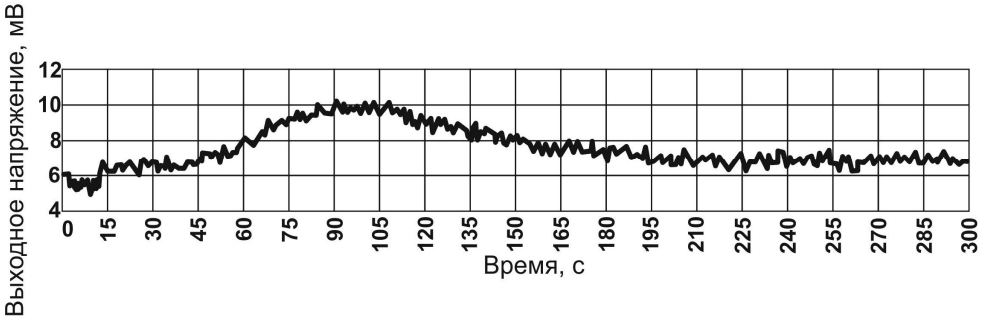


Рис. 5. Разность высокочастотных сигналов с ПЭ1 и ПЭ2

Микроконтроллером на основании полученных при предварительной настройке датчика зависимостей пьезоэлектрического напряжения пьезоэлементов от давления рабочей среды и температуры, а также зависимостей падений напряжений на пьезоэлементах от тест-сигнала и их разности от температуры рабочей среды вычисляются сигналы коррекции ошибки измерения динамического давления от влияния статической температуры и термоудара. В результате цифровой обработки микроконтроллером полученных с ПИП аналоговых сигналов в виде напряжений, поступающих на вход аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера, формируется скорректированный по температуре сигнал о значении динамического давления рабочей среды в виде двоичного кода $N_{вых}$.

Список литературы

1. **Богуш, М. В.** Влияние температуры на коэффициент преобразования пьезоэлектрических датчиков / М. В. Богуш // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – № 2. – С. 26–39.
2. **Мартини, К. Р.** Новый уровень высокотемпературных кварцевых датчиков давления / К. Р. Мартини // Трансдьюсер'77 : сб. ст. конф. – Лондон, 1977. – 29 с.
3. **Богуш, М. В.** Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богуш ; под ред. А. Е. Панича. – М. : Техносфера, 2014. – 312 с.
4. **Доля, В. К.** Проектирование интеллектуального датчика акустического давления : учеб.-метод. пособие / В. К. Доля. – Ростов н/Д : ЮФУ, 2009. – 21 с.
5. A. c. SU 1765732 A2 СССР, МПК G 01 L 9/08. Датчик давления / Ю. А. Пивкин, С. Д. Забродина (СССР). – 4890282/10 ; заявл. 10.12.1990 ; опубл. 30.09.1992, Бюл. № 36. – 4 с.
6. **Кнеллер, В. Ю.** Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – С. 144.
7. **Осадчий, Е. П.** Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 482 с.

References

1. Bogush M. V. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics]. 2008, no. 2, pp. 26–39.
2. Martini K. R. *Transd'yuser'77: sb. st. konf*. [Transducer'77: conference proceedings]. London, 1977, 29 p.
3. Bogush M. V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrotermouprugikh modeley* [Designing piezoelectric sensors on the basis of thre-dimensional electrothermoelastic models]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p.
4. Dolya V. K. *Proektirovanie intellektual'nogo datchika akusticheskogo davleniya: ucheb.-metod. posobie* [Intelligent acoustic pressure sensor design: tutorial]. Rostov-on-Don: YuFU, 2009, 21 p.
5. A. s. SU 1765732 A2 SSSR, MPK G 01 L 9/08. *Datchik davleniya* [A pressure sensor]. Yu. A. Pivkin, S. D. Zabrodina (SSSR). 4890282/10; appl. 10.12.1990; publ. 30.09.1992, Bull. № 36, 4 p.
6. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determining prarameters of multiple-unit dipoles]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, p. 144.
7. Osadchiy E. P. *Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin* [Designing sensors for mechanical values measurement]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 482 p.

Кикот Виктор Викторович
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Маланин Владимир Павлович
кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматики и телемеханики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Malanin Vladimir Pavlovich
Candidate of engineering science, associate professor, sub-department of automation and remote control, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Щербаков Михаил Александрович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: avitel@pnzgu.ru

Shcherbakov Mikhail Aleksandrovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of automation and remote control, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.586.773: 53.088.3

Кикот, В. В.

Коррекция температурной погрешности пьезоэлектрического датчика динамического давления в условиях термоудара / В. В. Кикот, В. П. Маланин, М. А. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 105–113. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-10

УДК 681.2.08:57.087,
DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-11

М. С. Геращенко, Н. А. Волкова, С. М. Геращенко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОМАНЖЕТНОГО ТОНОМЕТРА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является изучение преимуществ использования гидроманжетной технологии при оценке гемодинамических параметров у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, а также людей, имеющих риск их развития. Предметом исследования являются устройства диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, определяющие показатели артериального давления и гемодинамики. Цель исследования – разработка блок-схемы устройства, реализующего использование гидроманжетной технологии для определения гемодинамических параметров и алгоритма его работы, позволяющего обеспечить массовость обследования и точность измерения показателей гемодинамики.

Материалы и методы. При разработке блок-схемы гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров и алгоритма его работы применялись методы цифровой обработки сигналов, основы схемотехнического проектирования измерительных устройств, методы нечеткой логики.

Результаты. Проведен анализ известных решений в области определения гемодинамических параметров для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Показана перспективность применения гидроманжетной технологии в устройствах неинвазивного контроля гемодинамических параметров. Разработаны структурная схема устройства и алгоритм расчета и оценки гемодинамических параметров с применением гидроманжетной технологии, позволяющего повысить точность расчета гемодинамических показателей за счет применения гидроманжетной технологии при измерении объемной скорости распространения пульсовой волны

Выводы. Использование гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров позволяет обеспечить массовый скрининг населения с целью выявления групп риска сердечно-сосудистых заболеваний, выполнять контроль за течением заболевания, а также осуществлять оценку эффективности лечения на основе получения суррогатных точек.

Ключевые слова: осциллометрия, гидроманжетная технология, тонометр, параметры артериального давления, гемодинамические показатели.

M. S. Gerashchenko, N. A. Volkova, S. M. Gerashchenko

USING A HYDRO-CUFF TONOMETER FOR EVALUATION OF HEMODYNAMIC PARAMETERS WITH ENHANCED PRECISION

Abstract.

Background. The research object is a study of benefits of using hydro-cuff technologies for evaluation of hemodynamic parameters in patients with cardiovascular diseases, as well as people under the risk of development thereof. The research subject embraces devices of cardiovascular diseases diagnostics that determine arterial

tension and hemodynamic indices. The aim of the research is to develop a block diagram of a device that applies hydro-cuff technologies for hemodynamic parameters determination and a functioning algorithm thereof, allowing to provide large-scale examination and precision of hemodynamic indices determination.

Materials and methods. In order to develop the block diagram of a hydro-cuff tonometer for evaluation of hemodynamic parameters and the functioning algorithm thereof the authors used methods of digital signal processing, foundations of circuit design of measuring devices, methods of fuzzy logic.

Results. The researchers analyzed the known solution in the field of hemodynamic parameters determination for diagnostics of cardiovascular diseases, as well as showed the prospects of using hydro-cuff technologies in the devices of noninvasive monitoring of hemodynamic parameters. The authors developed the block diagram of the device and the algorithm of calculation and evaluation of hemodynamic parameters using hydro-cuff technologies allowing to increase the accuracy of calculation of hemodynamic indices due to application of hydro-cuff technologies when measuring the volume velocity of pulse wave propagation.

Conclusions. The use of the hydro-cuff tonometer for evaluation of hemodynamic parameters allows to ensure large-scale screening of population in order to detect cardiovascular diseases risk groups, to monitor clinical courses of diseases, as well as to estimate the efficiency of treatment on the basis of the obtained surrogate points.

Key words: oscillometry, hydro-cuff technology, tonometer, arterial tension parameters, hemodynamic indices.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) лидируют среди основных факторов смертности населения. Проведение массового скрининга населения с целью выявления групп риска на ранней доклинической стадии заболевания является важной проблемой в кардиологии [1].

Использование гемодинамических параметров при диагностике ССЗ, а также в качестве суррогатной точки в процессе лечения ССЗ и профилактики осложнений [2] является перспективным направлением. На сегодня известно достаточно большое количество неинвазивных устройств для измерения параметров кровотока, заключающегося в расчете гемодинамических показателей и их дальнейшей оценке.

1. Анализ предметной области

Можно выделить три группы приборов в зависимости от метода, положенного в основу их работы. Это приборы ультразвуковой (УЗИ) диагностики, плетизмографы и осциллометрические приборы. Каждая из групп устройств имеет как достоинства, так и недостатки. Устройства, выполняющие расчет гемодинамических показателей на основе результатов УЗИ сердечно-сосудистой системы (ССС), позволяют достаточно точно и в короткие сроки получить широкий спектр гемодинамических параметров, но такие устройства очень дорогостоящие, использование их возможно только высококвалифицированным медицинским персоналом, в связи с чем массовое обследование населения с целью выявления групп риска ССЗ устройствами, работающими по методу УЗИ, невозможно. Среди устройств, использующих для получения гемодинамических параметров метод плетизмографии,

в настоящее время наибольшее распространение получают плетизмографы, использующие метод фотоплетизмографии, регистрирующие изменения светопроницаемости части тела, в зависимости от степени ее кровенаполнения. Считается, что форма кривой, зарегистрированной фотоплетизмографом, внешне сходна с формой пульсовой волны. Однако применение фотоплетизмографии сопряжено с высокой степенью погрешности измерений и их интерпретации из-за того, что результаты практически невозможно выразить в единицах объема, а также невозможно сравнивать зарегистрированные показатели светопроницаемости различных участков тела между собой.

Приборами контроля гемодинамических параметров, позволяющими проводить массовый скрининг населения ввиду их простоты использования и невысокой стоимости, а также достаточной информативности, могут выступать осциллометрические устройства. Такие устройства позволяют получать параметры кровяного давления – систолическое давление (P_s), диастолическое давление (P_d), а также пульсовое давление (P), частоту сердечных сокращений (F), параметры гемодинамики – *скорость распространения пульсовой волны, сердечный выброс, ударный объем, сердечный индекс и ударный индекс.*

Среди осциллометрических устройств измерения параметров кровотока можно выделить приборы с использованием одной компрессионной манжеты [3] и приборы с использованием двух компрессионных манжет [4]. Недостатком приборов с использованием одной компрессионной манжеты является косвенный способ определения скорости распространения пульсовой волны исходя из времени запаздывания между прямой и отраженной пульсовой волнами от бифуркации брюшной артерии. При этом длина артерии также определяется косвенно, путем измерения расстояния между грудным углублением и лобковой костью, что приводит к погрешности. Недостатками существующих устройств с применением двух компрессионных манжет является низкая помехозащищенность и точность измерения, обусловленная искаженным характером регистрации колебаний поверхности манжеты и показаний датчика давления, обусловленного сжимаемостью воздуха и искажением передачи значения давления на датчик.

Поэтому необходимо разработать устройство, совмещающее простоту применения осциллометрических приборов, низкую стоимость исследования, а также обеспечивающее точность, достаточную для диагностики. Применением гидроманжетного тонометра, в котором применение в качестве рабочего тела манжеты несжимаемой среды – жидкости, позволит повысить точность измерения давления и значения скорости распространения пульсовой волны [5], а также обеспечит массовое применение.

2. Разработка структуры гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров

Устройство оценки гемодинамических показателей с применением гидроманжетной технологии (рис. 1) включает в себя две компрессионные манжеты *1* и *2*, первый *3* и второй *4* датчики давления, два источника давления *5* и *6*, первый и второй блоки *7*, *8* управления источниками давления, блок анализа и расчета *9* и блок индикации *10*. Датчики *3*, *4* давления входами связа-

ны с первой *1* и второй *2* компрессионными манжетами соответственно. Выход датчика давления *4* второй манжеты *2* связан с блоком управления *8* источника давления *6*. Выход датчика *3* давления первой манжеты *1* связан с блоком управления *7* источника давления *5* и с блоком управления *8* источника давления *6*. Датчики давления *3*, *4* связаны выходами с блоком анализа и расчета *9* соответственно, выход блока анализа и расчета *9* соединен с блоком *10* индикации. Источники давления *5*, *6* содержат резервуары с заданным объемом жидкости и насосы для подачи давления.

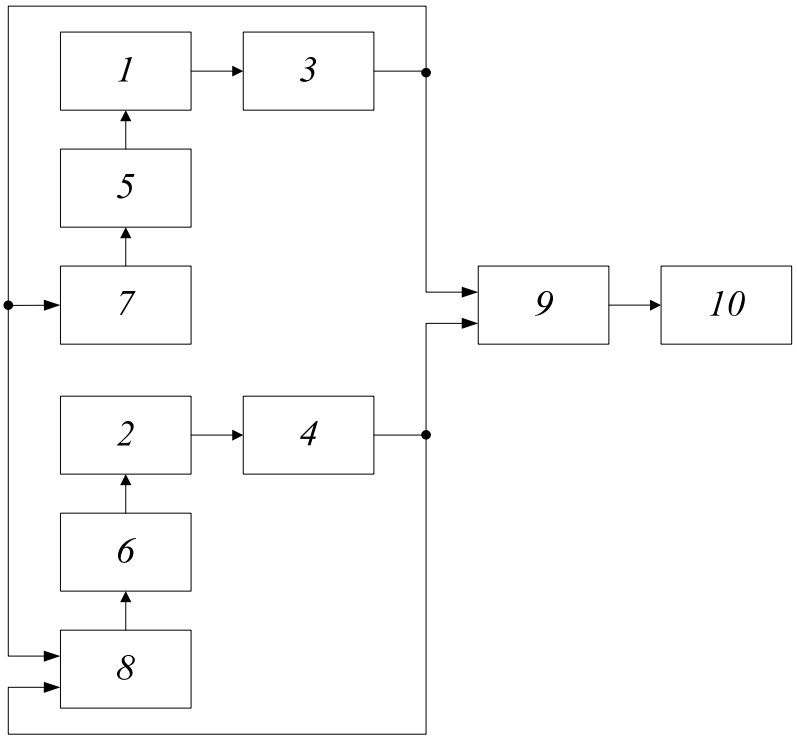


Рис. 1. Структурная схема гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров

Выбор в качестве рабочего тела несжимаемой среды повышает точность измерения давления [5], значительно увеличивает амплитуду регистрируемого сигнала, что снижает влияние шумов, а применение двух блоков управления обеспечивает синхронную компрессию и декомпрессию давления обеих манжетах, что значительно увеличивает точность измерения скорости распространения пульсовой волны (СРПВ).

3. Разработка алгоритма работы гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров

Для расчета и оценки гемодинамических показателей с применением гидроманжетной технологии предлагается следующий алгоритм обследования:

1. На первом этапе вводятся данные о пациенте: рост, вес, пол, возраст.
2. На основе данных первого этапа автоматически рассчитывается площадь поперечного сечения аорты и площади поверхности тела.

3. Накладываются манжеты и измеряется расстояние между датчиками, полученное значение также вводится в программу и используется для дальнейших расчетов.

4. Производится регистрация кривых давления.

5. Измеряются уровни систолического давления, диастолического давления, рассчитывается пульсовое давление.

6. Производится анализ кривой давления, зарегистрированной в манжете, наложенной на плечо; расчет длительности систолы, диастолы и сердечного цикла в секундах.

7. Вычисляются значения задержки между кривыми давления, зарегистрированными в первой и второй манжетах, рассчитывается скорость распространения пульсовой волны.

8. Рассчитываются гемодинамические показатели.

9. Производится оценка полученных значений на основе нечеткой логики.

Рассмотрим пример вычисления и оценки гемодинамических показателей для женщины 30 лет, рост 160 см, вес 55 кг.

Для расчета показателя площади поперечного сечения аорты разработана программная реализация номограммы по Савицкому. На рис. 2 представлена номограмма для определения площади поперечного сечения аорты по росту и массе тела (составлена Н. Н. Савицким). На оси ординат – рост (в см), косые линии – масса тела (в кг) ; на оси абсцисс – площадь сечения аорты (в $см^2$). На рис. 2 выделена точка, соответствующая значению площади поперечного сечения аорты для человека с ростом 160 см и массой тела 55 кг.

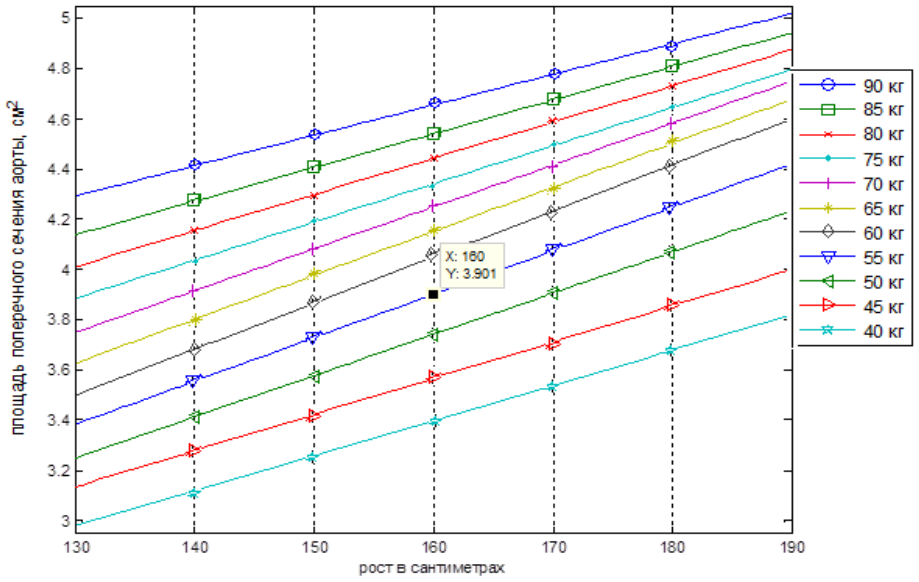


Рис. 2. Номограмма для определения площади поперечного сечения аорты по росту и массе тела

Далее в соответствии с шагом 3 алгоритма производят наложение гидроманжет с фиксацией расстояния между датчиками и регистрируют кривые

давления при прохождении пульсовой волны. На рис. 3 представлена общая схема наложения манжет при прохождении пульсовой волны.

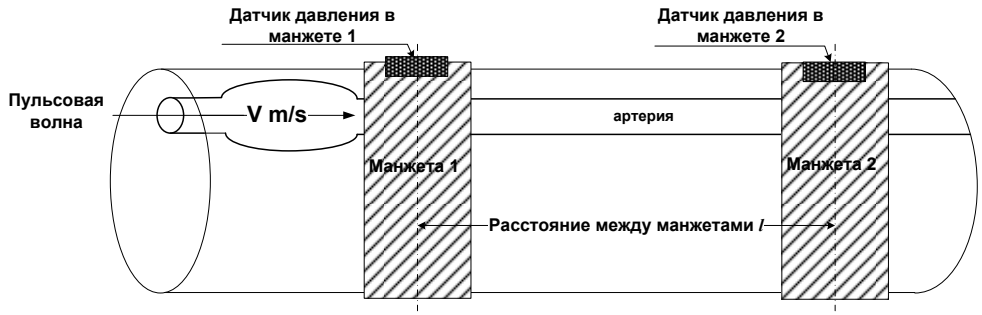


Рис. 3. Схема наложения компрессионных манжет при прохождении пульсовой волны

На рис. 4 представлены две кривые, характеризующие изменение давления в камерах гидроманжет, находящихся на расстоянии 20 см, при прохождении пульсовой волны на уровне 120 мм рт.ст. давления в манжетах. Первая манжета (черная кривая) расположена на плече, вторая манжета (серая кривая) расположена на запястье.

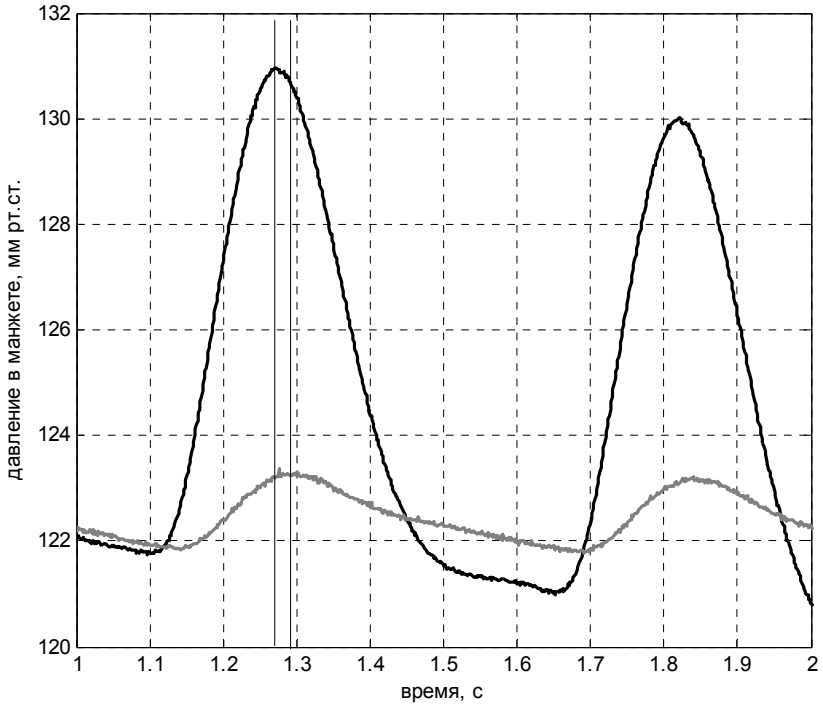


Рис. 4. Кривые изменения давления в двух гидроманжетах при прохождении пульсовой волны

Как видно из рис. 4, кривая, зарегистрированная во второй манжете, запаздывает относительно кривой, зарегистрированной в первой манжете. При

известных времени запаздывая и расстоянии между датчиками рассчитывается значение скорости распространения пульсовой волны [6].

Для дальнейшей обработки следует выделить один сердечный цикл. Выбранный участок дифференцируется и полученный сигнал сглаживается. Результат дифференцирования участка, соответствующего единичному сердечному циклу, представлен на рис. 5 (серым, черным выделен результат сглаживания сигнала).

Далее следует найти точки пересечения кривой с осью абсцисс, которые будут соответствовать началу цикла, достижения сигналом максимального значения и изменения знака, т.е. завершения фазы систолы и перехода сердца в фазу диастолы, и завершения полного сердечного цикла. Из полученных точек рассчитывается длительность систолы, диастолы и сердечного цикла.

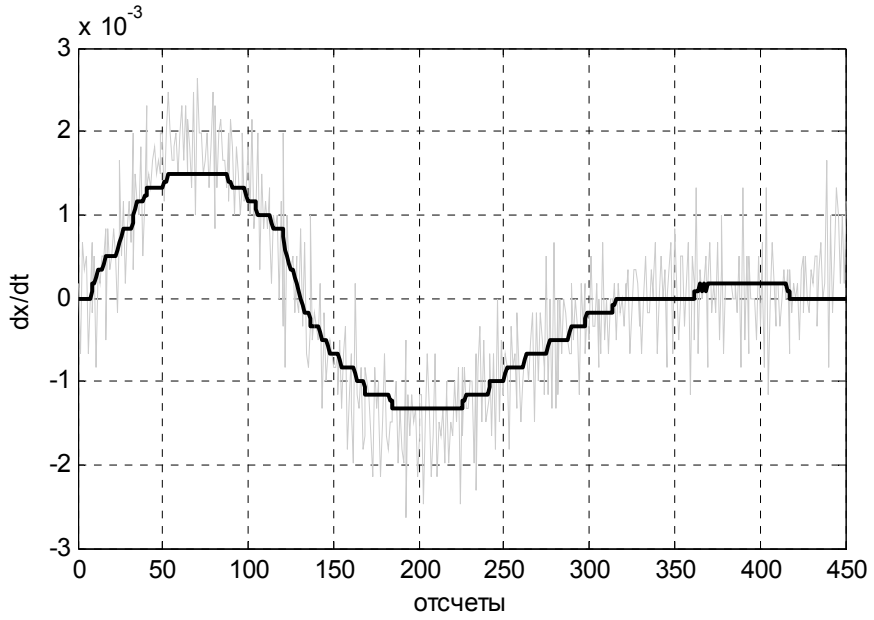


Рис. 5. Результат дифференцирования и сглаживания участка сигнала

Для рассматриваемого примера получены значения длительностей систолы, диастолы и сердечного цикла: $S = 0{,}26$ с, $D = 0{,}56$ с, $T = 0{,}82$ с. Величина систолического давления 120 мм рт.ст., величина диастолического давления 80 мм рт.ст. Значение пульсового давления рассчитывается как разность между систолическим и диастолическим давлением, для рассматриваемого примера $P = 40$ мм рт.ст.

Расчет гемодинамических показателей на шаге 8 выполняется в соответствии с формулами (1)–(4).

Сердечный выброс (E) – количество крови, которое перекачивает сердце в 1 мин, в норме составляет 5–7 л/мин [1, 6] и определяется по формуле

$$E = \frac{1333ZQPST}{\nu D}, \qquad (1)$$

где Q – площадь поперечного сечения аорты (см^2), определяемая по таблицам или номограммам; 1333 – множитель для перевода давления в дины; P – пульсовое давление; Z – фактор поправки (для человека принимается равным 0,6); S, D, T – соответственно длительность систолы, диастолы и сердечного цикла (с); ν – скорость распространения пульсовой волны по аорте (см/с).

Ударный объем (V) – объем крови, выбрасываемый желудочком в течение одной систолы рассчитывается по формуле

$$V = \frac{E}{F}, \tag{2}$$

где F – частота сердечных сокращений (ЧСС).

Более информативным показателем является отношение сердечного выброса к площади поверхности тела (A), данный показатель называют сердечным индексом (I_1), его значения в норме колеблются в пределах 2,5–3,5 л/(мин · м^2) и определяются по формуле

$$I_1 = \frac{E}{A}. \tag{3}$$

Значение площади поверхности тела рассчитывается из значений массы тела и роста [6].

Отношение ударного объема к площади поверхности тела называется ударным индексом (I_2), рассчитывается по формуле (мл/м^2):

$$I_2 = \frac{V}{A}. \tag{4}$$

Для рассматриваемого примера расчета гемодинамических показателей получены следующие значения сердечного выброса – 7,44 л/мин, ударного объема – 180 мл, сердечного индекса – 4,7 л/(мин · м^2), ударного индекса – 117 мл/м^2.

Сравнение полученных значений с эталонными значениями на шаге 9 выполняется на основе теории нечетких множеств. При диагностике важно соблюдать логику врача, которая, как любая информация человеческого мозга, обладает нечеткостью. По мнению психологов, практически вся числовая информация в человеческом мозге вербально перекодируется и хранится в виде лингвистических термов. Понятие лингвистической переменной играет важную роль в нечетком логическом выводе и в принятии решений на основе приближенных рассуждений [7]. В результате работы алгоритма производится вывод значений параметров гемодинамики с их оценкой по шкале «в норме», «ниже нормы», «выше нормы» [8]. При отклонении значений от нормы необходима более тщательная интерпретация результатов врачом.

При использовании гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров с целью контроля за состоянием пациента при медикаментозной терапии необходимо изучение тренда изменения гемодинамических параметров конкретного человека.

Все полученные данные (результаты непосредственно измерения артериального давления [8] и гемодинамические показатели, полученные в результате работы алгоритма) должны сохраняться на внешнем носителе и вноситься в общую базу данных лечащего врача.

Заключение

Использование гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров позволяет повысить точность расчета гемодинамических показателей за счет более точного измерения СРПВ, обеспечить массовый скрининг населения с целью выявления групп риска ССЗ, использовать гемодинамические показатели и параметры артериального давления при диагностике ССЗ, а также в качестве суррогатной точки в процессе лечения ССЗ и профилактики осложнений.

Список литературы

1. Рекомендации по диагностике и лечению артериальной гипертензии // Артериальная гипертензия. – 2004. – Т. 10, № 2.
2. Национальные рекомендации по кардиоваскулярной профилактике // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2011. – Т. 10, № 6. – Приложение 2.
3. Патент 2338458 Российская Федерация. Устройство и способ для измерения гемодинамических параметров / ИЙЕШ Миклош, БЕРЕШ Йожеф. – Опубл. 20.11.2008.
4. Патент 2343826 Российская Федерация. Устройство для определения параметров сердечно-сосудистой системы (варианты) / Гурфинкель Ю. И., Дергачев А. А., Острожинский В. А. – Опубл. 20.01.2009.
5. Патент на полезную модель № 104437 Российская Федерация. Тонометр Геращенко / Геращенко М. С. 2011. – URL: http://bankpatentov.ru/node/78436 (дата обращения: 05.05.2016).
6. Интенсивная терапия / В. Д. Малышев, И. В. Веденина, Х. Т. Омаров и др. ; под ред. проф. В. Д. Малышева. – М. : Медицина, 2002. – 584 с.
7. **Штовба, С. Д.** Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С. Д. Штовба. – URL: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php (дата обращения: 09.10.2014).
8. **Волкова, Н. А.** Алгоритм диагностики состояния сердечно-сосудистой системы по результатам многократных измерений артериального давления и пульса / Н. А. Волкова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 1 (33). – С. 43–49.

References

1. *Arterial'naya gipertenziya* [Arterial hypertension]. 2004, vol. 10, no. 2.
2. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika* [Cardiovascular therapy and prophylaxis]. 2011, vol. 10, no. 6, appendix 2.
3. *Patent 2338458 Rossiyskaya Federatsiya. Ustroystvo i sposob dlya izmereniya gemodinamicheskikh parametrov* [Patent 2338458 of the Russian Federation. A device and a method of hemodynamic parameters measurement]. IYESh Miklosh, BERESh Yozhef. Publ. 20.11.2008.
4. *Patent 2343826 Rossiyskaya Federatsiya. Ustroystvo dlya opredeleniya parametrov serdechno-sosudistoy sistemy (varianty)* [Patent 2343826 of the Russian Federation. A device for cardiovascular system parameters determination (variants)]. Gurfinkel' Yu. I., Dergachev A. A., Ostrozhinskiy V. A. Publ. 20.01.2009.
5. *Patent na poleznuyu model' № 104437 Rossiyskaya Federatsiya. Tonometr Gerashchenko* [Useful model patent № 104437 of the Russian Federation. The Gerashchenko tonometer]. Gerashchenko M. S. 2011. Available at: http://bankpatentov.ru/node/78436 (accessed 05.05.2016).
6. Malyshev V. D., Vedenina I. V., Omarov X. T. et al. *Intensivnaya terapiya* [Intensive therapy]. Moscow: Meditsina, 2002, 584 s.

7. Shtovba S. D. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku* [Introduction into the set theory and fuzzy logic]. Available at: http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php (accessed 09.10.2014).
8. Volkova N. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2015, no. 1 (33), pp. 43–49.

Геращенко Михаил Сергеевич
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mifon1@yandex.ru

Gerashchenko Mikhail Sergeevich
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Волкова Наталья Александровна
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: witchys@inbox.ru

Volkova Natal'ya Aleksandrovna
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геращенко Сергей Михайлович
доктор технических наук, профессор, кафедра медицинской кибернетики и информатики, Медицинский институт, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: gsm@pnzgu.ru

Gerashchenko Sergey Mikhaylovich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of medical cybernetics and informatics, Medical Institute, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.2.08:57.087,
Геращенко, М. С.

Использование гидроманжетного тонометра для оценки гемодинамических параметров с повышенной точностью / М. С. Геращенко, Н. А. Волкова, С. М. Геращенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 3 (39). – С. 114–123. DOI 10.21685/2072-3059-2016-3-11

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 (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) 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. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

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 подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. 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 ([1], [2], …). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **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, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Обращаем внимание авторов на то, что перевод имен собственных на английский язык в списке литературы осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru). Для обеспечения единообразия указания данных об авторах статей во всех реферируемых базах при формировании авторской справки при подаче статьи необходимо предоставить перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык, или он будет осуществлен автоматически в программе транслитерации в кодировке BGN.

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.