

Министерство образования и науки Российской Федерации
Institute of Hydrodynamics Academy of Sciences of the Czech Republic
Ангарская государственная техническая академия
Астраханский государственный технический университет
Белгородский государственный технологический университет
Белорусский государственный аграрный технический университет
Белорусский государственный университет
Белорусский государственный технологический университет
Белорусский национальный технический университет
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Донской государственный технический университет
Ивановский государственный химико-технологический университет
Институт вычислительной математики РАН
Институт проблем управления РАН
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Московский политехнический университет
Пензенская государственная технологическая академия
Российский химико-технологический университет
Рязанский государственный радиотехнический университет
Самарский государственный технический университет
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Тамбовский государственный технический университет
Тверской государственный технический университет
Ярославский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

СБОРНИК ТРУДОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 9

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2018

УДК 004+51.7+519.6

ББК 22.1:32.81

М34

Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 9 / под общ. ред. А. А. Большакова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 104 с.

В сборнике публикуются труды участников XXXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», которая состоится в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете), Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН (г. Санкт-Петербург, 10–14 сентября 2018 г., посвящена 190-летию СПбГТИ(ТУ)); в СГТУ имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, 20-21.09.2018г.); в БГАТУ, БГТУ, БНТУ, БГУ, БГУИР (г. Минск, Беларусь, 8-12 октября 2018г.). Представленные материалы отражают современные направления математического и компьютерного обеспечения для решения фундаментальных проблем, связанных с синтезом и применением математических моделей технологических, технических и организационно-технических систем.

Сборник предназначен для специалистов, занимающихся использованием математических методов в технике и технологиях.

Доклады рецензированы и отрецензированы редакционной коллегией конференции ММТТ-31.

Редакционная коллегия:

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. *А. А. Большаков*

Заместители главного редактора: д-р техн. наук, проф., проф. *В. С. Балакирев*; д-р техн. наук, проф., проф. ТГТУ *С. И. Дворецкий*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. КНИТУ *Н. Н. Зиятдинов*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СПбГТУ (ТИ) *Т. Б. Чистякова*.

Члены редакционной коллегии: д-р техн. наук, проф., ВГУ *Г. В. Абрамов*; д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой КГАСУ *Ф. Г. Ахмадиев*; д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Института проблем химической физики РАН *В. Н. Бабак*; д-р техн. наук, проф., МГТУ имени Н.Э. Баумана *Т. И. Булдакова*; д-р наук, проф., вед. научн. сотр., председатель Совета Института гидродинамики Чешской Академии наук *П. Власак*; д-р техн. наук, проф. ЮФУ *А. Р. Гайдук*; д-р техн. наук, проф., зам. директора филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске *М. И. Дли*; д.ф.-м.н., проф. ТверГТУ *А. Л. Калабин*; д-р техн. наук, проф., директор института АстрГТУ *И. Ю. Квятковская*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *В. А. Коломейцев*; д-р техн. наук, проф. ВолГТУ *А. Г. Кравец*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИГХТУ *А. Н. Лабутин*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СамГТУ *М. Ю. Лившиц*; академик РАН, д-р техн. наук, проф., директор института РХТУ имени Д. И. Менделеева *В. П. Мешалкин*; д-р техн. наук, проф. ДГТУ *Р. А. Нейдорф*; д-р техн. наук, проф. НИУ «МЭИ» *О. М. Проталинский*; чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. лаб. Института проблем точной механики и управления РАН *А. Ф. Резчиков*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *М. Ф. Степанов*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолГТУ *И. В. Степанченко*; академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института вычислительной математики РАН *Е. Е. Тыртышников*; д-р техн. наук, проф. АГТУ *А. А. Ханова*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолГТУ *М. В. Щербаков*.

Ответственный редактор: канд. техн. наук, доц., доцент Московского Политеха *Д. В. Зубов*.

Технический редактор: *С. А. Большакова*

Сборник издан при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-20081 Г).

© Большаков А. А., научное редактирование, 2018
© Издатель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018
© Издатель. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2018

**ОБ ИНТЕГРАЛЬНОМ УРАВНЕНИИ С ДВУМЯ КОМПОЗИЦИОННЫМИ
СВЕРТКАМИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОНТОРОВИЧА-ЛЕБЕДЕВА**

Л.Д. Яроцкая*, **О.Н. Пыжкова****, **С.В. Пономарёва*****

* *Белорусский государственный технологический университет,
Беларусь, Минск, yarotskaya@belstu.by*

** *Белорусский государственный технологический университет,
Беларусь, Минск, olga.pyzhkova@gmail.com*

*** *Белорусский государственный университет,
Беларусь, Минск, demyanko@bsu.by*

Аннотация. Предложена схема решения одного класса интегральных уравнений второго рода с двумя ядрами типа обобщенной свертки Конторовича-Лебедева с достаточными условиями разрешимости. Решение основывается на интегральных преобразованиях по индексу специальной функции ядра и приведению к краевой задаче Римана для полуплоскости в классе функций, исчезающих на бесконечности.

Ключевые слова: интегральное уравнение, преобразования по индексу, преобразование Конторовича-Лебедева, композиционная свертка.

**ON THE INTEGRAL EQUATION WITH TWO COMPOSITION CONVOLUTIONS
FOR THE KONTOROVICH-LEBEDEV TRANSFORM**

L.D. Yarotskaya*, **O.N. Pyzhkova****, **S. V. Ponomareva*****

* *Belarusian State Technological University,
Belarus, Minsk, yarotskaya@belstu.by*

** *Belarusian State Technological University,
Belarus, Minsk, olga.pyzhkova@gmail.com*

*** *Belarusian State University,
Belarus, Minsk, demyanko@bsu.by*

Abstract. A scheme for solving one class of integral equations of the second kind with two kernels of generalized convolution for the Kontorovich-Lebedev transform is proposed. The sufficient solvability conditions are obtained. The method is based on integral transforms by indices of special functions of the kernel and reduction to the Riemann boundary value problem for the half-plane in the class of functions vanishing at infinity.

Keywords: integral equation, the index transform, the Kontorovich-Lebedev transform, convolutions.

В монографии [1] разработан метод построения композиционных сверток для интегральных преобразований по индексу специальной функции ядра. В частности, дано понятие обобщенной свертки $(f * g)$ двух функций f и g как операции умножения в некоторой алгебре. С помощью действия, соответствующего интегрального оператора K на свертку приходят к обычному умножению образов, определенному факторизационным равенством вида $[K(f * g)](x) = [K_1 f](x)[K_2 g](x)$. Если при некоторых условиях имеет смысл обратный оператор от произведения функций, то в некотором пространстве функций свертку определяют равенством Парсеваля $(f * g)(x) = K^{-1}([K_1 f][K_2 g])(x)$, где K_1, K_2 – некоторые интегральные операторы. Это позволяет полученные конструкции применить для исследования интегральных уравнений с композиционной сверткой.

Кроме этого, установлено [1], что в силу универсальной структуры ядер, относящихся к функциям гипергеометрического типа, все известные в литературе преобразования по индексу композиционно связаны с преобразованием Конторовича-Лебедева, порожденного разложением произвольной функции в виде аналога

интеграла Фурье $xf(x) = 2/\pi \int_0^\infty t \operatorname{sh}(\pi t) K_{it}(x) dt \int_0^\infty K_{it}(y) f(y) dy$, где $K_{it}(x)$ – функции Макдональда – одно из линейно независимых решений $u(x)$ дифференциального уравнения Бесселя $u'' + u'/x - (1 - t^2/x^2)u = 0$.

Рассмотрим уравнение

$$f(t) + (f * m_1)(t) + (f \hat{*} m_2)(t) = g(t), \quad t \geq 0, \quad (1)$$

в классе функций $L_2(\mathbf{R}_+) \cap L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+) \cap L_{\mu,2}(\mathbf{R}_+)$, $1/2 < \nu < 1$, $1 \leq \mu < 1 + \varepsilon_0$, $\varepsilon_0 > 0$, где

$$(f * m_1)(t) = 2/(\pi^2 t) \int_0^\infty \tau \operatorname{sh}(\pi \tau) K_{it}(x) K_{it}[f] K_{it}[m_1] d\tau, \quad (2)$$

$$(f \hat{*} m_2)(t) = 2/(\pi^2 t) \int_0^\infty \tau \operatorname{sh}(\pi \tau) K_{it}(x) \hat{F}(\tau) K_{it}[m_2] d\tau. \quad (3)$$

Функция $\hat{F}(\tau)$ определяется следующим образом:

$$\hat{F}(\tau) = \int_0^\infty M_{it}(u) f(u) du, \quad (4)$$

где

$$M_{it}(u) = \int_0^\infty e^{-u \operatorname{ch} t} \sin(\tau t) dt, \quad (5)$$

а $K_{it}[f]$ – преобразование Конторовича-Лебедева функции $f(x) \in L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+)$ определим по формуле

$$K_{it}[f] = \begin{cases} \int_0^\infty K_{it}(x) f(x) dx, & 0 < \nu < 1, \\ \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_0^\infty K_{it}(x) f(x) x^\varepsilon dx, & 1 \leq \nu < 1 + \varepsilon_0, \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0. \end{cases} \quad (6)$$

Через $L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+)$ обозначено пространство суммируемых с квадратом функций с весом $x^{2\nu-1}$, норма которого определяется формулой $\|f\|_{\nu,2} = \left(\int_0^\infty x^{2\nu-1} |f(x)|^2 dx \right)^{1/2}$. В случае $\nu = 1/2$ пространство $L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+)$ совпадает с пространством $L_2(\mathbf{R}_+)$.

Отметим, что интеграл в формуле (5) напоминает интегральное представление для функции Макдональда $K_{it}(x) = \int_0^\infty e^{-x \operatorname{ch} u} \cos(\tau u) du$.

Показано [1], что свертка (2) функций $f(x), g(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$ существует и принадлежит пространству $L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+)$, где $\nu > 1/2$. Если $1/2 < \nu < 1$, то справедливо факторизационное равенство

$$[K_{it}(f * g)] = [K_{it}f][K_{it}g]. \quad (7)$$

Кроме того, справедливо представление свертки (2) в виде двойного интеграла

$$(f * g)(t) = 1/(2t) \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\frac{ty}{2u} - \frac{yu}{2t} - \frac{ut}{2y}} f(u) g(y) du dy. \quad (8)$$

При этом свертка (8) определяет класс интегральных уравнений первого и второго рода, разрешимых с помощью преобразования Конторовича – Лебедева. Ядро уравнения получается вычислением внутреннего интеграла в (8) для каждой конкретной функции g . В качестве примеров выступают известные интегральные уравнения Лебедева с неподвижной особенностью [2].

В работе [3] получены следующие свойства свертки (3) и преобразования (4). В частности, если $f(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$, то интеграл в (4) существует и $\hat{F}(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$.

Лемма 1. Пусть $f(x), g(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$, $G(x) \in L_1(xe^{(\pi-\delta)x}; \mathbf{R}_+)$, где $G(x)$ – преобразование (6) функции $g(y)$ и $0 \leq \delta < \pi/2$. Тогда свертка (3) функций $f(x)$ и $g(x)$ существует и принадлежит пространству $L_{\nu,2}(\mathbf{R}_+)$, где $\nu > 1$.

Лемма 2. Пусть $f(x), g(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$. Тогда преобразование (6) свертки (3) существует и справедливо факторизационное равенство

$$K_{it}[(f \hat{*} g)] = \hat{F}(\tau) K_{it}[g]. \quad (9)$$

Решение уравнения (1). Используя свойства сверток (2), (3), лемму 1, формулы (7), (9), применим преобразование Конторовича-Лебедева (6) к уравнению (1) и сведем его к виду

$$F(x) + M_1(x)F(x) + M_2(x)\hat{F}(x) = G(x), \quad -\infty < x < \infty, \quad (10)$$

в классе функций $KL(L_2(\mathbf{R}_+) \cap L_{v,2}(\mathbf{R}_+) \cap L_{\mu,2}(\mathbf{R}_+))$, $1/2 < v < 1$, $1 \leq \mu < 1 + \varepsilon_0$, $\varepsilon_0 > 0$ (обозначим KL).

В монографии [1] описывается область значения преобразования Конторовича-Лебедева $KL(L_{v,p}) = \{g : g(\tau) = K_{it}[f], f \in L_{v,p}(\mathbf{R}_+)\}$, $v < 1$, $p \geq 1$. Показано, для того чтобы $g(\tau) \in KL(L_{v,p})$ $0 < v < 1$, $p \geq 1$, необходимо и достаточно, чтобы $g(\tau) \in L_r(\mathbf{R}_+)$, $r \geq 1$, $\text{l.i.m.}_{\varepsilon \rightarrow 0+}(I_\varepsilon g) \in L_{v,p}(\mathbf{R}_+)$. Кроме того, формула обращения преобразования Конторовича – Лебедева при $x > 0$ установлена следующим образом:

$$f(x) = \text{l.i.m.}_{\varepsilon \rightarrow 0+}(I_\varepsilon g)(x), \quad (I_\varepsilon g)(x) = \frac{2}{\pi^2 x^{1-\varepsilon}} \int_0^\infty \tau \text{sh}((\pi - \varepsilon)\tau) K_{it}(x) g(\tau) d\tau, \quad \varepsilon \in (0, \pi), \quad (11)$$

и предел понимается по норме пространства $L_{v,p}(\mathbf{R}_+)$.

Уравнения (1) и (10) равносильны, так как оператор Конторовича-Лебедева, действующий из пространства функций $L_2(\mathbf{R}_+) \cap L_{v,2}(\mathbf{R}_+) \cap L_{\mu,2}(\mathbf{R}_+)$, $1/2 < v < 1$, $1 \leq \mu < 1 + \varepsilon_0$, $\varepsilon_0 > 0$, в пространство KL , можно рассмотреть как сужение прежнего оператора $K_{it}[f] : L_{v,2}(\mathbf{R}_+) \rightarrow KL(L_{v,2}(\mathbf{R}_+))$, $0 < v < 1$, и обратный оператор может быть определен по формуле (11) со сходимостью по норме пространства $L_2(\mathbf{R}_+)$.

Воспользовавшись представлением $K_{it}(t) = 1/2 \int_{-\infty}^\infty e^{-t\text{ch}u + itu} du$, $t > 0$, установим связь интеграла Конторовича – Лебедева с интегралом типа Коши [4]. Пусть $f(x) \in L_2(\mathbf{R}_+)$. Тогда

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^\infty \frac{F(\tau)}{\tau - z} d\tau = \frac{1}{2} \int_0^\infty f(t) dt \int_{-\infty}^0 e^{-t\text{ch}u} du \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{it\tau}}{\tau - z} d\tau + \frac{1}{2} \int_0^\infty f(t) dt \int_0^\infty e^{-t\text{ch}u} du \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{it\tau}}{\tau - z} d\tau.$$

Поскольку интеграл типа Коши представляет аналитическую функцию в плоскости с разрезом по действительной оси, то функции, определенные по формулам

$$F^+(z) = 1/2 \int_0^\infty f(t) \int_0^\infty e^{-t\text{ch}u + iuz} du dt, \quad F^-(z) = -1/2 \int_0^\infty f(t) \int_{-\infty}^0 e^{-t\text{ch}u + iuz} du dt, \quad (12)$$

будут аналитическими соответственно в верхней и нижней полуплоскостях. Кроме того, справедливы формулы Сохоцкого:

$$F^+(x) - F^-(x) = F(x), \quad F^+(x) + F^-(x) = i\hat{F}(x). \quad (13)$$

Введем следующие классы функций (12): $(KL)^+ = \{F^+(x)\}$ и $(KL)^- = \{F^-(x)\}$, где $f(t) \in L_2(\mathbf{R}_+) \cap L_{v,2}(\mathbf{R}_+) \cap L_{\mu,2}(\mathbf{R}_+)$, $1/2 < v < 1$, $1 \leq \mu < 1 + \varepsilon_0$, $\varepsilon_0 > 0$. Непосредственно из формул Сохоцкого (13) следует: для того, чтобы заданная на действительной оси функция $F(x)$ из (KL) принадлежала классу $(KL)^+$ ($(KL)^-$), необходимо и достаточно,

чтобы выполнялось условие $\int_0^\infty f(t) \int_{-\infty(0)}^{0(\infty)} e^{-t\text{ch}u + iux} du dt = 0$, $\forall x \in \mathbf{R}$.

Введем кусочно-аналитическую функцию, заданную интегралом типа Коши,

плотностью которого служит решение уравнения (10):

$$F(z) = 1/(2\pi i) \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau)/(\tau - z) d\tau. \quad (14)$$

Согласно формулам (12), предельные значения функции $F(z)$ принадлежат классам $(KL)^+$ и $(KL)^-$. Внося значения $F(x)$ и $\widehat{F}(x)$ из (13) в уравнение (10) и решая его относительно $F^+(x)$, получим, что кусочно-аналитическая функция $F(z)$ должна являться решением краевой задачи Римана:

$$F^+(x) = D(x)F^-(x) + H(x), \quad -\infty < x < \infty, \quad (15)$$

где $D(x) = \frac{1+M_1(x)+iM_2(x)}{1+M_1(x)-iM_2(x)}$, $H(x) = \frac{G(x)}{1+M_1(x)-iM_2(x)}$, $M_k(x) = K_{it}[m_k]$. Кроме того,

предположим, что $M_2(x) \in L_1(xe^{(\pi-\delta)x}; \mathbf{R}_+)$, $0 \leq \delta < \pi/2$, и $1+M_1(x) \pm iM_2(x) \neq 0$.

Уравнение (10) и задача (15) равносильны в следующем смысле: если $F(z)$, представимая в виде (12), существует общее решение краевой задачи (15), то функция $F(x)$ из (13) есть решение уравнения (10); обратно, если $F(x)$ – общее решение уравнения (10), то интеграл типа Коши (14) есть решение задачи Римана (15), представимое в виде (12).

Отметим, что функция, представимая интегралом Конторовича-Лебедева, исчезает на бесконечности и является бесконечно дифференцируемой функцией и, следовательно, удовлетворяет условию Гёльдера с любым показателем $\lambda \leq 1$. Используя результаты решения задачи Римана для полуплоскости в классе исчезающих на бесконечности функций [4], сформулируем следующий результат исследования.

Теорема. Если индекс задачи $\kappa = \text{Ind}(1+M_1(x)+iM_2(x))/(1+M_1(x)-iM_2(x))$ положителен, то однородное уравнение (1) ($g=0$) имеет ровно κ линейно независимых решений, а неоднородное уравнение безусловно разрешимо и его решение зависит от κ произвольных комплексных постоянных. В случае $\kappa \leq 0$ однородное уравнение не имеет отличных от нуля решений. Неоднородное уравнение при $\kappa=0$ безусловно разрешимо, причем решение единственно. Во всех случаях, когда решение уравнения (1) существует, его можно найти по формуле (11), если $g(\tau) = F^+(\tau) - F^-(\tau)$, где $F^+(x)$, $F^-(x)$ – предельные значения решения задачи Римана (15).

Библиографический список

1. Yakubovich S.B. Index transforms. Singapore: World Scientific Publ. 1996. 252 p.
2. Лебедев Н.Н. Сингулярные интегральные уравнения, связанные с интегральными представлениями математической физики // Доклады АН СССР. 1949. Т. 65. № 1. С. 621–624.
3. Яроцкая Л.Д. Об одной интегральной свертке, связанной с преобразованием Конторовича-Лебедева // Труды БГТУ. Физ.-мат. науки и информатика. 2012. № 6. С. 31–33.
4. Гахов Ф.Д. Краевые задачи. М.: Наука. 1977. 640 с.

ПОЛНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕГО ТИПА ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СОСТОЯНИЮ

А.В. Метельский

Белорусский национальный технический университет,
Белоруссия, Минск, ametelski@bntu.by

Аннотация. Для спектрально управляемой дифференциальной системы запаздывающего типа строится обратная связь по состоянию, обеспечивающая полное успокоение исходной системы и асимптотическую устойчивость (полную стабилизацию) замкнутой системы. Доказательство разрешимости этой задачи имеет конструктивный характер и позволяет построить этот регулятор, используя стандартные операции над полиномами и полиномиальными матрицами.

Ключевые слова: дифференциальная система, запаздывание, спектральная управляемость, полная стабилизация, регулятор по типу обратной связи.

COMPLETE STABILIZATION OF THE DIFFERENTIAL SYSTEM OF DELAYED TYPE BY STATE FEEDBACK

A.V. Metel'skii

Belarus National Technical University,
Belarus, Minsk, ametelski@bntu.by

Abstract. For the spectrally controllable differential system of delayed type a state feedback that it ensures complete damping of the original system and asymptotic stability (complete stabilization) of the closed-loop system is designed. The proof of solvability of this problem is constructive and permits one to obtain the named controller using standard operations on polynomials and polynomial matrices.

Keywords: differential system, delay, spectral controllability, complete stabilization, feedback controller.

Рассмотрим линейную автономную дифференциальную систему с соизмеримыми запаздываниями

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^m A_i x(t - ih) + bu(t), t > 0, x(t) = \eta(t), t \in [-mh, 0]. \quad (1)$$

Здесь x – n -вектор-столбец решения системы (1) ($n \geq 2$); $0 < h$ – постоянное запаздывание; A_i – постоянные $n \times n$ -матрицы ($i = \overline{0, m}$); $b = e_n = [0; \dots; 0; 1]^T$ – n -вектор; η – начальная кусочно-непрерывная функция, u – скалярное управление. Векторные величины записываем в столбец, штрих обозначает операцию транспонирования. Обозначим: $A(\lambda) = A_0 + A_1\lambda + \dots + A_m\lambda^m$ ($\lambda \in \mathbf{C}$ – множеству комплексных чисел), $w(p, e^{-ph}) = |pE_n - A(e^{-ph})|$ – характеристический квазиполином ($p \in \mathbf{C}$) системы (1). Множество корней $\sigma = \{p \in \mathbf{C} / w(p, e^{-ph}) = 0\}$ характеристического уравнения называют спектром системы (1).

Задача стабилизации системы (1) состоит в обеспечении замкнутой системе асимптотически устойчивого спектра. Обобщением этой задачи служит задача FSA (finite spectrum assignment) – назначения замкнутой системе произвольного конечного спектра [1]. Критерий разрешимости задачи FSA [1, 2] – спектральная управляемость системы (1):

$$\text{rank}[pE_n - A(e^{-ph}), b] = n \quad \forall p \in \mathbf{C}. \quad (2)$$

Задача полного успокоения системы (1) заключается [3] в обеспечении за счет выбора управления $u(t)$, $t > 0$, тождеств $x(t) \equiv 0, u(t) \equiv 0, t \geq t_1$, где $t_1 > 0$ – некоторый фиксированный момент времени, не зависящий от начального состояния η . Условие спектральной управляемости (2) необходимо и достаточно для полного успокоения системы (1). Поэтому возникает вопрос: возможно одним регулятором (независимо от

начального состояния η) реализовать асимптотическую устойчивость замкнутой системы и полное успокоение исходной (1)?

Обеспечение асимптотической стабилизации замкнутой системы и полного успокоения исходной системы (1) одновременно будем называть полной стабилизацией. Ниже для спектрально управляемой системы (1) предлагается схема построения обратной связи, дающей замкнутой системе полную стабилизацию. Существенным моментом при решении задачи является использование вспомогательной функции $K(p, \lambda)$ (см. (5)), которая позволяет алгоритмизировать процесс построения требуемого регулятора. Излагаемый подход к решению задачи полной стабилизации является алгебраическим и сводится к стандартным операциям над полиномами и полиномиальными матрицами.

Считаем систему (1) спектрально управляемой. Пусть $M(p, \lambda) = [M_1(p, \lambda), \dots, M_n(p, \lambda)]'$ – алгебраические дополнения к элементам (начиная с первого) последней строки матрицы $pE_n - A(\lambda)$. Ввиду (2) базис Гребнера для системы полиномов $M(p, \lambda)$ содержит полином $d_1(p)$, зависящий только от p (в частности, возможно $d_1(p) = 1$). Обозначим $P^* = \{p_i \in \mathbf{C}, i = \overline{1, L}\}$ – множество корней полинома $d_1(p)$ и $\Lambda^* = \{\lambda_k \in \mathbf{C}, k = \overline{1, L_1}\}$ – конечное множество чисел таких, что при некотором $p_i \in P^*$ имеем $M(p_i, \lambda_k) = 0$. Набор P^* содержит инвариантные [2, 4] спектральные значения, которые невозможно исключить из конечного спектра замкнутой системы посредством дифференциально-разностного регулятора.

Регулятор полной стабилизации будем конструировать в виде динамического интегро-разностного регулятора

$$u(t) = -e'_n A(\lambda)x(t) + f'(p, \lambda)x(t) + a_1(\lambda)x_{n+1}(t), \quad \dot{x}_{n+1}(t) = q'(\lambda)x(t) + a_2(\lambda)x_{n+1}(t), \quad t > 0, \quad (3)$$

где λ – оператор сдвига, p – оператор дифференцирования: $\lambda^i p^j x_k(t) = x_k^{(ij)}(t - ih)$; $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]'$, $x_{n+1}(t)$ – вспомогательная переменная; $a_1(\lambda), a_2(\lambda), q'(\lambda) = [q_1(\lambda), \dots, q_n(\lambda)]$ – полиномы; $f'(p, \lambda) = [f_1(p, \lambda), \dots, f_n(p, \lambda)]$ – дробно-рациональные функции, имеющие D -структуру [5]. В замкнутой системе членам $f'(p, \lambda)x(t)$ соответствуют переменные состояния с сосредоточенными и распределенными запаздываниями (см. ниже пример).

Выбором управления

$$u(t) = -e'_n A(\lambda)x(t) + \bar{q}'(\lambda)x(t) + \bar{f}'(p, \lambda)x(t), \quad t > 0,$$

где $\bar{q}'(\lambda) = [\bar{q}_1(\lambda), \dots, \bar{q}_n(\lambda)]$ – полиномы; $\bar{f}'(p, \lambda) = [\bar{f}_1(p, \lambda), \dots, \bar{f}_n(p, \lambda)]$ – дробно-рациональные функции, имеющие D -структуру, систему (1) можно привести к системе того же порядка с асимптотически устойчивым характеристическим полиномом $\tilde{d}(p)$ согласно алгоритму в работе [5]. Разлагая характеристический определитель замкнутой системы по последней строке, получаем

$$\tilde{d}(p) = \psi'(p, \lambda)M(p, \lambda),$$

где

$$\psi'(p, \lambda) = [-g_1(p, \lambda), \dots, -g_{n-1}(p, \lambda), p - g_n(p, \lambda)], \quad g_i(p, \lambda) = \bar{q}_i(\lambda) + \bar{f}_i(p, \lambda), \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Регулятор (3) будем строить так, чтобы замкнутая система (1), (3) имела конечный спектр с характеристическим полиномом $d(p) = (p - p_{n+1})\tilde{d}(p)$, $p_{n+1} < 0$ – любое число.

Чтобы алгоритмизировать построение регулятора (3) введем вспомогательную функцию

$$K(p, \lambda) = k(p, \lambda) + pM_n(p, \lambda), \quad k(p, \lambda) = (a_1(\lambda)q'(\lambda)M(p, \lambda) + d(p)) / (a_2(\lambda) - p). \quad (5)$$

Лемма. Для того чтобы регулятор (3) обеспечивал полное успокоение системы (1) достаточно его коэффициенты взять такими, чтобы:

1) замкнутая система имела конечный спектр с характеристическим полиномом $d(p)$, $\deg d(p) = n+1$;

2) $a_1(e^{-ph})/d(p)$, $(p - a_2(e^{-ph}))/d(p)$ – целые функции ($p \in \mathbf{C}$);

3) $k(p, \lambda)$ – полином; 4) $f'(p, \lambda)M(p, \lambda) = K(p, \lambda)$.

Доказательство. Обозначим $\tilde{W}(p, e^{ph}) = pE_{n+1} - \tilde{A}(p, e^{ph})$ характеристическую матрицу замкнутой системы (1), (3). Легко проверить, что $|\tilde{W}(p, e^{ph})| = d(p)$.

Пусть $P = \{p_i, i = \overline{1, s_1}\}$ – множество корней полинома $d(p)$ с алгебраическими кратностями k_i , $\Lambda = \{\lambda_i = e^{-ph} \mid p_i \in P, i = \overline{1, s_1}\}$. Чтобы обеспечить условие 2) леммы, полагаем

$$a_1(\lambda) = \prod_{i=1}^{s_1} (\lambda - \lambda_i)^{k_i}, \quad (6)$$

и для всех $\lambda_i \in \Lambda$:

$$a_2(\lambda_i) = p_i, a_2^{(k)}(\lambda_i) = \frac{(-1)^k (k-1)!}{h \lambda_i^k}, k = \overline{1, k_i - 1}, \text{ если } k_i > 1, i = \overline{1, s_1}. \quad (7)$$

Замечание. Если набор корней полинома $d(p)$ содержит комплексно сопряженные пары $p_{k_1, 2} = \alpha \pm i\beta$, то различным значениям $p_i \in P$ должны соответствовать различные $\lambda_i = e^{-ph}$ (в противном случае первое равенство в (7) выполнить нельзя ввиду того, что $a_2(\lambda_{k_1}) = a_2(\lambda_{k_2})$, а $p_{k_1} \neq p_{k_2}$). Это замечание учитываем при выборе корней полинома $\tilde{d}(p)$.

Для обеспечения условия 3) потребуем, чтобы $M(a_2(\lambda), \lambda) \neq 0, \lambda \in \Lambda^* \setminus \Lambda$. Если эти неравенства не выполняются в силу (7), то к условиям (7) добавим

$$a_2(\lambda_i) = p_0 \quad (p_0 \in \mathbf{R} \mid p_0 \notin P^*, \lambda_i \in \Lambda^* \setminus \Lambda). \quad (8)$$

В качестве полинома $a_2(\lambda)$ возьмем интерполяционный полином Эрмита согласно интерполяционным условиям (7), (8). Выбор полиномов $a_1(\lambda), a_2(\lambda)$ влечет [4] точечную вырожденность системы (1), (3) в направлениях, отвечающих фазовым переменным $x_1(t), \dots, x_n(t)$, т.е. полное успокоение системы (1).

Векторный полином $q'(\lambda)$, обеспечивающий условие 3) леммы, берем следующего вида

$$q'(\lambda) = -\tilde{q}'(\lambda)d(a_2(\lambda))/a_1(\lambda), \quad (9)$$

где

$$\tilde{q}'(\lambda)M(a_2(\lambda), \lambda) = 1, \lambda \in \mathbf{C}. \quad (10)$$

В силу выбора полиномов $a_1(\lambda), a_2(\lambda)$ полиномы $M_1(a_2(\lambda), \lambda), \dots, M_n(a_2(\lambda), \lambda)$, $\lambda \in \mathbf{C}$, взаимно просты [4], поэтому векторный полином $\tilde{q}'(\lambda)$ существует и может быть найден посредством алгоритма Евклида. Функция $d(a_2(\lambda))/a_1(\lambda)$ – полином, т. к. по построению полиномов $a_1(\lambda), a_2(\lambda)$ (см. (6), (7)) корни знаменателя являются корнями числителя не меньшей кратности.

Согласно (5), (9) имеем

$$k(p, \lambda) = (-d(a_2(\lambda))\tilde{q}'(\lambda)M(p, \lambda) + d(p))/(a_2(\lambda) - p).$$

По теореме Безу и ввиду (10) функция $k(p, \lambda)$ – полином. Заменяя здесь

$$d(p) = (p - p_{n+1})\tilde{d}(p) = (p - p_{n+1})\psi'(p, \lambda)M(p, \lambda),$$

функцию $k(p, \lambda)$ приводим к виду

$$k(p, \lambda) = ((p - p_{n+1})(1 - \tilde{q}'(\lambda)M(p, \lambda))\psi'(p, \lambda) + (d(p) - d(a_2(\lambda)))\tilde{q}'(\lambda))M(p, \lambda)/(a_2(\lambda) - p).$$

Поскольку $K(p, \lambda) = k(p, \lambda) + pM_n(p, \lambda)$, то

$$f'(p, \lambda) = ((p - p_{n+1})(1 - \tilde{q}'(\lambda)M(p, \lambda))\psi'(p, \lambda) + (d(p) - d(a_2(\lambda)))\tilde{q}'(\lambda))/(a_2(\lambda) - p) + e'_n p. \quad (11)$$

Лемма доказана.

Используя (1), замкнутую систему (1), (3) можно [5] записать в нормальной форме.

Опираясь на лемму, получаем следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть выполнено условие спектральной управляемости (2). Для того, чтобы регулятор (3) был регулятором полной стабилизации достаточно:

- 1) выбрать асимптотически устойчивый характеристический полином $d(p) = (p - p_{n+1})\tilde{d}(p)$ степени $n+1$ с учетом высказанного выше замечания;
- 2) согласно [5] найти целую (при $\lambda = e^{-ph}$) дробно-рациональную функцию $\psi'(p, \lambda)$ вида (4) такую, что $\psi'(p, \lambda)M(p, \lambda) = \tilde{d}(p)$;
- 3) построить полиномы $a_1(\lambda), a_2(\lambda)$ согласно (6)-(8);
- 4) выбрать $q'(\lambda) = -\tilde{q}'(\lambda)d(a_2(\lambda))/a_1(\lambda)$ согласно (10);
- 5) векторную функцию $f'(p, \lambda)$ взять вида (11).

Элементы векторной функции $f'(p, \lambda)$ – целые (при $\lambda = e^{-ph}$) дробно-рациональные функции, которым в замкнутой системе соответствуют переменные состояния с сосредоточенными и распределенными запаздываниями. Замкнутая система имеет порядок $n+1$.

Теорема 2. Условие спектральной управляемости (2) необходимо и достаточно для полной стабилизации системы (1) динамическим интегро-разностным регулятором (3).

Пример. Пусть объект управления описывается системой (1) второго порядка с матрицами

$$A(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda & \lambda - 1 \\ a_{21}(\lambda) & a_{22}(\lambda) \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, h = \ln 2. \quad (12)$$

Характеристический квазиполином системы (12) имеет вид ($\lambda = e^{-ph}$): $w(p, \lambda) = p(p - \lambda)$, т. е. система имеет бесконечный спектр.

Вычисляем алгебраические дополнения: $M_1(p, \lambda) = \lambda - 1, M_2(p, \lambda) = p - \lambda$ к элементам последней строки характеристической матрицы $pE_2 - A(\lambda)$. Решая систему $M_i(p, \lambda) = 0, i = \overline{1, 2}$, имеем $(p, \lambda) = (1; 1)$. Поскольку $e^{-ph} \neq \lambda$, то система (12) спектрально управляема и регулятор полной стабилизации существует.

Для системы полиномов $M(p, \lambda) = [M_1(p, \lambda), M_2(p, \lambda)]'$ находим базис Гребнера: $\{p - 1, \lambda - 1\}$, значит $d_1(p) = p - 1$.

Обеспечим системе (12) полную стабилизацию по схеме теоремы 1. Пусть требуемый характеристический полином замкнутой системы

$$d(p) = (p + 1)(p + 2)(p + 3).$$

Следуя [5], получаем, что в выражении (4)

$$\psi'(p, \lambda) = [-7 - \lambda + (5 + \lambda)(-1 + 2\lambda)/(p - 1); 3 + p + \lambda + (5 + \lambda)(-1 + 2\lambda)/(p - 1)],$$

$$\psi'(p, \lambda)M(p, \lambda) = (p + 1)(p + 2).$$

Согласно (6), (7) имеем

$$a_1(\lambda) = (\lambda - 2)(\lambda - 4)(\lambda - 8), a_2(\lambda) = (\lambda^2 - 18\lambda + 8)/24$$

В данном случае ввиду (5)

$$K(p, \lambda) = (a_1(\lambda)[q_1(\lambda); q_2(\lambda)]M(p, \lambda) + d(p))/(a_2(\lambda) - p) + p(p - \lambda).$$

Полиномы $q_1(\lambda), q_2(\lambda)$ находим по алгоритму Евклида:

$$q_1(\lambda) = (23\lambda - 1218)/6336, q_2(\lambda) = -(11\lambda + 574)/6336.$$

Согласно (11)

$$f'(p, \lambda) = [f_1(p, \lambda), f_2(p, \lambda)] = [-p^2(\lambda - 41)/33 - 32(2\lambda^2 + 9\lambda - 5)/(11(p-1)) - p(\lambda^3 - 59\lambda^2 + 314\lambda - 10264)/792 + (\lambda^4 - 35\lambda^3 - 601\lambda^2 - 7378\lambda + 26496)/792; p(\lambda^2 - 42\lambda + 41)/33 - 32(2\lambda^2 + 9\lambda - 5)/(11(p-1)) + (\lambda^4 - 36\lambda^3 - 668\lambda^2 - 9792\lambda + 5248)/792].$$

Приводя замкнутую систему к нормальной форме (см. [5]) на основе (12), получаем

$$f'(p, \lambda) = [-32(\lambda + 5)(2\lambda - 1)/(11(p-1)) + (23\lambda^2 + 962\lambda + 8832)/264; -32(\lambda + 5)(2\lambda - 1)/(11(p-1)) - (\lambda^2 + 6\lambda + 152)/24]$$

или

$$f'(p, \lambda)x(t) = 32(\lambda + 5)/11 \int_0^h e^s x_1(t-s) ds + (23\lambda^2 + 962\lambda + 8832)/264 x_1(t) + 32(\lambda + 5)/11 \int_0^h e^s x_2(t-s) ds - (\lambda^2 + 6\lambda + 152)/24 x_2(t).$$

Напомним, что λ – оператор сдвига: $\lambda^i x_k(t) = x_k(t - ih)$.

Окончательно регулятор полной стабилизации системы (12) имеет вид

$$u(t) = e_2' A(\lambda)x(t) + f_1(p, \lambda)x_1(t) + f_2(p, \lambda)x_2(t) + a_1(\lambda)x_3(t), \quad (13)$$

$$\dot{x}_3(t) = q_1(\lambda)x_1(t) + q_2(\lambda)x_2(t) + a_2(\lambda)x_3(t), t > 0.$$

Прямым вычислением убеждаемся, что замкнутая система (12), (13) имеет требуемый характеристический полином

$$d(p) = |pE_3 - \tilde{A}(p, \lambda)| = (p+1)(p+2)(p+3).$$

Первые две строки обратной матрицы $(pE_3 - \tilde{A}(p, \lambda))^{-1}$ образованы функциями экспоненциального типа, где старшая степень λ равна 4. Согласно теореме Винера-Пэли в замкнутой системе (12), (13) переменные $x_i(t) \equiv 0$ ($i = 1, 2$), $t \geq 4h = 4 \ln 2$, т. е. регулятор (13) обеспечивает полную стабилизацию системы (12).

Библиографический список

1. Manitius A.Z., Olbrot A.W. Finite Spectrum Assignment Problem for Systems with Delays // IEEE Transactions on Autom. Control. 1979. AC-24. No. 4. P.541-553.
2. Метельский А.В. Задача назначения конечного спектра для системы запаздывающего типа // Дифференц. уравнения. 2014. Т. 50. № 5. С. 692–701.
3. Красовский Н.Н. Теория управления движением. М.: Наука, 1968. 476 с.
4. Метельский А.В. Спектральное приведение, полное успокоение и стабилизация системы с запаздыванием одним регулятором // Дифференц. уравнения. 2013. Т. 49. № 11. С. 1436-1452.
5. Метельский А.В. Модальная управляемость дифференциальной системы запаздывающего типа с одним входом // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. ММТТ-30. Т. 12: в 3 ч. Ч. 1. С. 3-9.

ОЦЕНКА p -АДИЧЕСКОЙ НОРМЫ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО МНОГОЧЛЕНА НА ЦИЛИНДРЫ Q_p

И.М. Морозова*, О.Н. Кемеш**

* Белорусский государственный аграрный технический университет, Беларусь, Минск, INNA.Morozova@tut.by

** Белорусский государственный аграрный технический университет, Беларусь, Минск,
OKSANA.KEMESH@tut.by

Аннотация. В настоящей работе дана оценка для величины p -адической нормы целочисленного многочлена на цилиндры в Q_p .

Ключевые слова: мера Хаара, лемма Гельфонда, размерность Хаусдорфа, поле p -адических чисел, p -адический цилиндр, диофантовы приближения, p -адическая норма.

ESTIMATION p -ADIC NORM INTEGRAL POLYNOMIAL ON CYLINDERS Q_p

I. M. Morozova*, O.N. Kemesh**

*Belarusian State Agrarian Technical University, Republic of Belarus, Minsk, INNA.Morozova@tut.by

** Belarusian State Agrarian Technical University, Republic of Belarus, Minsk, OKSANA.KEMESH@tut.by

Abstract. In this article the estimate for the p -adic norm of integer polynomials on cylinders in Q_p .

Keywords: Haar measure, Gelfond's lemma, Hausdorff dimension, p -adic numbers, p -adic cylinder, Diophantine approximation, p -adic norm.

Часто при решении прикладных задач, возникают ситуации, когда применение архимедовой метрики не описывает суть явления. В этом случае стали использовать неархимедову геометрию и p -адические числа.

Академик В.С. Владимиров [1] с учениками разработали p -адические модели квантовой механики и теории струн. В. Драгович и А. Драгович [2] описывают p -адическую модель генетического кода. А.Ю. Хренников [3] применил p -адический анализ к описанию моделей мышления. Во всех случаях применена неархимедова метрика, которая зависит от делимости заданного числа на степень простого числа. Нашу работу можно считать продолжением исследования выше указанных авторов.

Введем несколько определений.

Определение 1. Любое рациональное число x можно единственным образом представить в виде несократимой дроби $x = p^\gamma \frac{m}{n}$, где p есть простое число, γ есть целое число, m – целое, n – натуральное, p, m, n – взаимно просты.

Определение 2. p -адической нормой вышеприведенного рационального числа x называется число $|x|_p = p^{-\gamma}$. Таким образом, p -адическая норма измеряет, на какую степень p делится рациональное число, и норма тем меньше, чем больше эта степень, то есть последовательность $\{p^\gamma\}, \gamma \rightarrow +\infty$, будет стремиться к нулю в p -адической норме.

Введем класс целочисленных полиномов $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$, у которых степень $\deg P = n$, а высота $H(P) = \max |a_j|, 0 \leq j \leq n$ не превосходит некоторого достаточно большого натурального числа Q . Этот класс обозначим через

$$P_n(Q) = \{P(x) \in Z[x], \deg P = n, H(P) \leq Q\}.$$

Будем обозначать $c_1 = c_1(n), c_2, \dots$ величины, зависящие от n и не зависящие от H и Q . Через $\#B$ обозначим количество элементов конечного множества B . Если два числа K и M отличаются в $c(n)$ раз, то будем записывать $K \approx M$. Нетрудно получить оценки

$$c_1 Q^{n+1} < \#P_n(Q) < c_2 Q^{n+1}$$

и доказать, что подкласс $P_n(Q)$, состоящий из неприводимых над полем рациональных чисел полиномов – $T_n(Q)$ имеет мощность $c_3 Q^{n+1}$. А. О. Гельфонд [4] доказал, что два полинома $P_1(x), P_2(x) \in T_n(Q)$ не могут в трансцендентной точке ξ удовлетворять неравенству $\max(|P_1(\xi)|, |P_2(\xi)|) < c_4 Q^{-2n+1}$ при достаточно малой величине c_4 . Его лемма была обобщена В. И. Берником [5] на значения полинома в точках из некоторого интервала I длины $|I| = Q^{-\eta}, \eta > 0$. Это обобщение стало важным моментом при нахождении размерности Хаусдорфа множества действительных чисел с заданной мерой трансцендентности. Приведем формулировку этого результата.

Лемма 1. Пусть на интервале I , $|I| = Q^{-\eta}, \eta > 0$ заданы два полинома $P_1(x), P_2(x) \in T_n(Q)$, такие, что $\max_{x \in I} (|P_1(x)|, |P_2(x)|) < Q^{-\tau}, \tau > 0$. Тогда, если $\delta > 0$, при $Q > Q_0(\delta)$ верно неравенство

$$\tau + 1 + 2 \max(\tau + 1 - \eta, 0) < 2n + \delta \quad (1)$$

Неравенство (1) при уменьшении η может быть усилено, что важно, например, при оценке количества полиномов $P(x) \in P_n(Q)$ с заданными дискриминантами или дискриминантами, делящимся на бóльшую степень фиксированного простого числа. Для получения более точных оценок обобщим неравенство (1) на поле p -адических чисел.

Доказанная нами теорема отличается от теорем доказанных ранее В.И. Берником тем, что в левую часть неравенства добавлены слагаемые вида $2 \max(\tau + k\eta, 0), k = 1, 2, \dots$, что потребовало рассмотрения не первых производных многочленов, а производных всех порядков.

Обозначим через μA меру Хаара p -адического цилиндра $A \subset Q_p, |w|_p$, – p -адическую норму $w \in Q_p$.

Определение 3. Множество $A \subset Q_p$ называется p -адическим цилиндром, если оно содержит все точки Q_p вида

$$w = a_l p^{-l} + a_{l-1} p^{-l+1} + \dots + a_1 p^{-1} + a_0 + a_1 p + \dots + a_k p^{-k} + b_{k+1} p^{k+1} + \dots,$$

где $a_j, -l \leq j \leq k$ – фиксированные целые числа $0 \leq a_j \leq p-1$, а $b_j, j \geq k+1$ – произвольные целые числа $0 \leq b_j \leq p-1$.

Пусть Q – достаточно большое натуральное число.

Теорема. Пусть $A \subset Q_p$ – цилиндр и $\mu A = Q^{-\eta}, \eta > 0$ для всех p -адических чисел $w \in A$ и два полинома $P(w), T(w)$ без общих корней удовлетворяют неравенствам

$$\max_{w \in A} (|P(w)|_p, |T(w)|_p) < Q^{-\tau}, \tau > 0, \max(H(P), H(T)) \leq Q.$$

Тогда при любом $\delta > 0$ и $Q > Q_0(\delta)$

$$\tau + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \max(\tau - k\eta, 0) < 2n + \delta. \quad (2)$$

Для доказательства теоремы понадобится

Лемма 2. Пусть γ_1 – ближайший корень полинома $P(x)$ к фиксированному числу $w \in Q_p$. Тогда справедливы неравенства

$$|w - \gamma_1|_p \leq |P(w)|_p |P'(w)|_p^{-1}, \quad |w - \gamma_1|_p \leq |P(w)|_p |P'(\gamma_1)|_p^{-1}, \quad (3)$$

$$|w - \gamma_1|_p \leq \min_{2 \leq j \leq n} \left(|P(w)|_p |P'(\gamma_1)|_p^{-1} |\gamma_1 - \gamma_2|_p \cdots |\gamma_1 - \gamma_j|_p \right)^{\frac{1}{j}}. \quad (4)$$

Лемма 2 доказана в работах В.Г. Спринджука и В.И. Берника [6]. Корни $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ полинома $P(w)$ упорядочим относительно w следующим образом:

$$|w - \gamma_1|_p \leq |w - \gamma_2|_p \leq \dots \leq |w - \gamma_n|_p. \quad (5)$$

Доказательство теоремы. Из системы неравенств $|P(w)|_p < Q^{-\tau}$, $|T(w)|_p < Q^{-\tau}$, $w \in A$, и леммы 2 заключаем, что среди корней $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ полинома $P(w)$ и корней $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ полинома $T(w)$ найдется пара корней (γ_k, β_l) , $1 \leq k \leq n, 1 \leq l \leq n$ таких, что корень γ_k будет ближайшим ко всем $w_1 \in L_1 \subset A$, $\mu_{L_1} \geq n^{-1}Q^{-\eta}$, а корень β_l – ко всем $w_2 \in L_2 \subset A$, $\mu_{L_2} > n^{-1}Q^{-\eta}$. Так как $w_1, w_2 \in A$, то $|w_1 - w_2|_p \leq Q^{-\eta}$. Полагаем $k=1, s=1$, и относительно корней γ_1, β_1 произведем упорядочивание остальных корней γ_i, β_j :

$$|\gamma_1 - \gamma_2|_p \leq |\gamma_1 - \gamma_3|_p \leq \dots \leq |\gamma_1 - \gamma_n|_p, \quad |\beta_1 - \beta_2|_p \leq |\beta_1 - \beta_3|_p \leq \dots \leq |\beta_1 - \beta_n|_p.$$

Введем обозначения:

$$|\gamma_i - \gamma_j|_p = Q^{-\rho_j}, \quad \rho_j = \sum_{i=j}^{n-1} \rho_{i+1}, \quad 2 \leq j \leq n. \quad (6)$$

Такие же обозначения введем и для корней β_j полинома $T(w)$. Будем предполагать, что полиномы $P(w)$ и $T(w)$ выбраны из некоторого подмножества $M_n(Q) \subset P_n(Q)$ такого, что величины ρ_j и p_i в (6) для различных полиномов $P(w)$ и $T(w)$ отличаются друг от друга не более чем на некоторую очень малую, но фиксированную величину $\varepsilon_1 > 0$. В итоге левая часть неравенства может измениться на $c_5 \varepsilon_1 < \frac{\delta}{2}$ при подходящем выборе ε_1 . Это стандартное рассуждение в метрической теории диофантовых приближений.

Из последнего неравенства (4) в лемме 2 условие $|P(w)|_p < Q^{-\tau}$ с учетом новых обозначений (6) можно записать так:

$$|w_1 - \gamma_1|_p \leq \min_{1 \leq j \leq n-1} Q^{-\frac{\tau - \rho_j}{j}}. \quad (7)$$

Аналогичное неравенство получим для

$$|w_2 - \beta_1|_p \leq \min_{1 \leq i \leq n-1} Q^{-\frac{\tau - p_i}{i}}. \quad (8)$$

Пусть минимальное значение в правой части неравенства (7) достигается при $j = j_0$, а в (8) при $i = i_0$. Так как w_1 и w_2 можно выбрать так, что

$$|w_1 - \gamma_1|_p \geq \frac{1}{4n} Q^{-\eta}, \quad |w_2 - \beta_1|_p \geq \frac{1}{4n} Q^{-\eta},$$

что легко доказать от противного.

Откуда, используя неравенство $\rho_j \geq 0$, имеем

$$\rho_j > \max(\tau - j\eta, 0), \quad 1 \leq j \leq n-1. \quad (9)$$

Так как минимум в правых частях неравенств (7), (8) достигается при $j_0 = j$, то для всех точек цилиндра A

$$|w_1 - \gamma_1|_p \leq \max \left(Q^{-\frac{\tau - \rho_{j_0}}{j_0}}, Q^{-\eta} \right), \quad |w_2 - \beta_1|_p \leq \max \left(Q^{-\frac{\tau - p_{i_0}}{i_0}}, Q^{-\eta} \right). \quad (10)$$

В дальнейшем важным является соотношение величин $Q^{-\rho_j}, 2 \leq j \leq n$ и правых частей неравенств (10). Ясно, что существует $2 \leq s \leq n-1$, для которого верно неравенство

$$Q^{-p_s} \leq Q^{-\frac{\tau-p_j_0}{j_0}} \leq Q^{-p_{s+1}}, \quad 2 \leq s \leq n-1. \quad (11)$$

Рассмотрим результат полиномов $P(w)$ и $T(w)$, не имеющих общих корней. Доказано, что $|R(P,T)| \leq c_6 Q^{2n}$, поэтому по формуле произведения $|a||a_p| \geq 1$ для $a \in \mathbb{Z}$ имеем

$$Q^{-2n} \leq |R(P,T)|_p. \quad (12)$$

Оценим $|R(P,T)|_p$ сверху. Из определения результата

$$|R(P,T)|_p = \left| a_n^n(P) a_n^n(T) \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} |\gamma_i - \beta_j| \right|_p \leq \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} |\gamma_i - \beta_j|_p. \\ \prod_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} |\gamma_i - \beta_j|_p \leq Q^{-s^2 \frac{\tau-p_j_0}{j_0} - (2s+1)p_s - 2(p_{s+1} + \dots + p_{n-1})} = Q^{-b}. \quad (13)$$

Оценим значение показателя степени b в (13) при $j_0 = s$.

$$b \geq s(\tau - p_s) + (2s+1)p_s + \sum_{k=s+1}^{n-1} p_k. \quad (14)$$

Покажем, что правая часть в неравенстве (14) больше $2n$. Для этого достаточно убедиться, что

$$s(\tau - p_s) + (2s+1)p_s > \tau + 2 \sum_{k=1}^s \max(\tau - k\eta, 0). \quad (15)$$

При $\tau - k\eta \geq 0$ суммы в левой и правой частях (15) можно записать в виде

$$s\tau + (s+1)p_s > 2(s+1)(\tau - s(s+1)\eta), \quad \text{или} \quad (s+1)p_s \geq (s+1)\tau - s(s+1)\eta, \\ p_s \geq \tau - s\eta. \quad (16)$$

Так как последнее неравенство в (16) справедливо по (9), поэтому верно и неравенство (15). Теорема доказана.

Библиографический список

1. Владимиров В.С., Волович И.В., Зеленев Е.И. p -адический анализ и математическая физика. Москва: Наука. 1994.
2. В. Dragovich, A. Dragovich A p -Adic Model of DNA Sequence and Genetic Code. URL: <http://arxiv.org/abs/q-bio.GN/0607018> (дата обращения: 19.09.2017).
3. Хренников А.Ю. Неархимедов анализ и его приложения. Москва: Физматлит, 2003.
4. Гельфонд А.О. Трансцендентные и алгебраические числа М.: URSS/ 2006. 224 с.
5. Bernik V. Application of the Hausdorff dimension in the theory of Diophantine approximations // Acta Arithmetica. 1983. Vol. 42, № 3. P. 219–253.
6. Кемеш О.Н. Обобщение леммы Гельфонда на цилиндры в поле p -адических чисел. Мн. Весці НАН Беларусі. 2018. Т. 1. С. 24-29.

УДК 656.13.05

ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ БЕСПИЛОТНОГО ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Е.Е. Пролиско¹, В.Н. Шуть²

Брестский государственный технический университет
Республика Беларусь, Брест, ¹prolisko@mail.ru, ²lucking@mail.ru

Аннотация. Предложен новый тип городской транспортной системы с характеристиками, которые недоступны классической транспортной системе. Кассетная, роботизированная городская транспортная система массовой конвейерной перевозки пассажиров – это создание нового цифрового автоматического типа транспорта, в управлении которого человек отсутствует, способного перевозить в городской улично-дорожной среде количество пассажиров, сравнимое с метро.

Ключевые слова: дорожное движение, адаптивное управление, пассажиропоток, интеллектуальная транспортная система.

OPPORTUNITIES AND PERSPECTIVES OF THE UNMANNED CITY PUBLIC TRANSPORT

E.E. Prolisko¹, V.N. Shuts²

Brest State Technical University
Republic of Belarus, Brest, ¹prolisko@mail.ru, ²lucking@mail.ru

Abstract. A new type of urban transport system has been proposed with characteristics that are not available to the classical transport system. The cassette, robotized urban transport system of mass conveyor transportation of passengers is the creation of a new digital automatic type of transport, in the driving of which there is no person, capable of transporting in the city traffic the amount of passengers compared to the underground.

Key words: traffic, adaptive management, passenger traffic, intelligent transport system.

В настоящее время в крупных городах отмечается рост количества личного транспорта, который опережает по темпам развитие дорожной инфраструктуры городов, что приводит к возникновению дорожных заторов, загрязнению воздуха выхлопными газами. Наиболее эффективным решением возникшей проблемы является расширение использования электрического транспорта. Одним из направлений в этой области является расширение использования общественного транспорта на электротяге [1]. Однако развитие классического пассажирского электротранспорта большой вместимости, какими являются троллейбус и трамвай, не может в полной мере решить указанную проблему.

Классическая транспортная система пассажирских городских перевозок сложилась 120 лет назад и с этого времени практически не изменилась. Она состоит из парка автотранспортных средств различной вместимости и скоростных характеристик, а также диспетчерского пункта, который обеспечивает разработку городских маршрутов, расписание движения транспортных средств и оперативное управление выводом на маршрут определенного по вместимости транспортного средства в зависимости от мощности пассажиропотока.

Данные о мощности пассажиропотока используются для выбора транспорта необходимой вместимости и определения оптимального количества транспортных средств, обеспечивающих рациональную эффективность их использования и высокий уровень обслуживания пассажиров. Систематически собираемая и анализируемая информация о величине пассажиропотока на маршруте является исходной базой для таких расчетов [2]. Собрать точные данные о пассажиропотоке в реальном времени классическая транспортная система не в состоянии.

Таким образом, современное состояние пассажироперевозок имеет следующие недостатки:

- отсутствие точной, объективной информации в режиме реального времени о мощности пассажиропотока на маршруте, что препятствует принятию оптимальных решений и ведет к экономическим потерям;
- малая номенклатура транспортных средств различной вместимости для более точного покрытия меняющегося пассажиропотока;
- присутствие человеческого фактора (диспетчера) в принятии ответственных решений.

Развитие информационных технологий позволяет пересмотреть концепцию организации и управления современным городским транспортом в будущем. Кассетная, роботизированная городская транспортная система массовой конвейерной перевозки пассажиров – это создание нового цифрового автоматического типа транспорта, в управлении которого человек отсутствует, способного перевозить в городской улично-дорожной среде количество пассажиров, сравнимое с метро [3]. Считаем, что данный тип городского транспорта в течение 10 лет вытеснит с улиц городов привычные автобусы, трамваи и троллейбусы. На многие десятилетия утвердятся новый тип городских транспортных систем, который придет на смену классическому типу.

Основатель кибернетики, американский математик Норберт Винер на заре развития этой науки говорил о возможности появления полностью автоматических заводов, где человека не будет [4]. Полностью автоматические или с минимальным числом людей заводы появились. Теперь такое время наступило для транспорта. Электробус (электрокар) малой вместимости до 50 пассажиров позволит гибко удовлетворять потребности потребителей транспортных услуг в индивидуальных маршрутах следования. Беспилотные электробусы собраны в роботизированную транспортную систему.

Кассетная, роботизированная городская транспортная система массовой конвейерной перевозки пассажиров состоит из выделенного узкого пути (дорожное полотно, рельс, либо монорельс), остановочных пунктов посадки и высадки пассажиров, снабженных турникетами, автономных беспилотных электрокаров. На остановках, при проходе через турникет пассажир, одновременно с оплатой за проезд, указывает пункт назначения. Это позволит собирать необходимую статистику и качественно оптимизировать процесс перевозки пассажиров.

Для самоуправляемых электрокаров предлагается название *инфобус*. Введение такого названия оправдано тем, что предлагаемый тип транспорта является системой, в которой информационные процессы (сбор информации, обработка информации, принятие решений) носят коренной, основополагающий характер. Инфобус жестко вмонтирован в интеллектуальную транспортную систему и является одним из её элементов [3]. Каждый инфобус, емкостью в 50 пассажиров (рис. 1), оборудован компьютером, связанным с сервером системы, команды с которого он отрабатывает полностью автономно под управлением собственного компьютера. Инфобусы базируются в накопителях, расположенных в конечных пунктах



Рис. 1. Автопоезд из двух электрокаров на перекрестке

маршрута. В них выполняется подзарядка инфобусов и далее они выдвигаются на маршрут. Система функционирует при полном отсутствии управления со стороны человека и является принципиально новым видом общественного транспорта.

Технико-экономические характеристики, которые обеспечивает данная транспортная система, недоступны известным на сегодняшний момент транспортным средствам городской перевозки пассажиров, таким как, автобус, троллейбус, трамвай и метро. Все беспилотные электрокары увязаны в один контур управления. Система является адаптивной к пассажиропотоку, т.е. работает по требованию на обслуживание на перевозку с минимальным временем ответа на запрос (время ожидания пассажира).

Система управления движением инфобусов – это специально разработанная программа управления со многими функциями, которые отсутствуют во всех традиционных видах городского транспорта, таких как автобус, троллейбус, трамвай и метро. Система управления универсальная и может быть использована как для наземного транспорта, так и подземного.

Во многих странах Европы и в некоторых республиках экс-СССР скоростные трамваи (Stadtbahn) выполняют функцию своеобразного наземного метро: они недороги в эксплуатации, передвигаются со скоростью (от 25 и до 35 км/ч), экологичны, надежны и комфортабельны, не мешают другим видам наземного транспорта. Строительство путей для них на два порядка ниже строительства метро (так стоимость 1 км. метро составляет от 40 до 60 млн. долларов [5]).

Чтобы скоростной трамвай был по-настоящему скоростным, необходимо менять организацию движения: предоставлять ему приоритет проезда перекрестков, зажигать для него зеленый сигнал светофора раньше. Желательно пускать его по выделенным линиям, отделенным от проезжей части улицы мини-заборчиками. Скоростной трамвай «не дотягивает» до метро по провозной способности в 3-4 раза. В городах с высокой численностью населения (свыше 1 млн.) нет альтернативного транспорта, способного конкурировать с метро по провозной способности, поэтому основными недостатками современного метрополитена являются:

- высокая стоимость строительства;
- низкая скорость строительства (300-350 м в месяц). Отсюда длительные, до 10 лет, сроки строительства.

Все указанные выше недостатки современного метрополитена можно устранить, используя метро щелевого типа «Кротовые норы» (рис. 2). Теперь большинство городов, и не только миллионников, могут иметь такое метро, так как стоимость его на два порядка ниже традиционного метро, а скорость строительства в три раза выше.

Это новый тип полностью автоматического подземного городского общественного транспорта (метро) на базе беспилотных электрокаров (инфобусов) вместимостью до 50 человек, курсирующих в узких тоннелях неглубокого заложения и обслуживающих пассажиров по требованию.

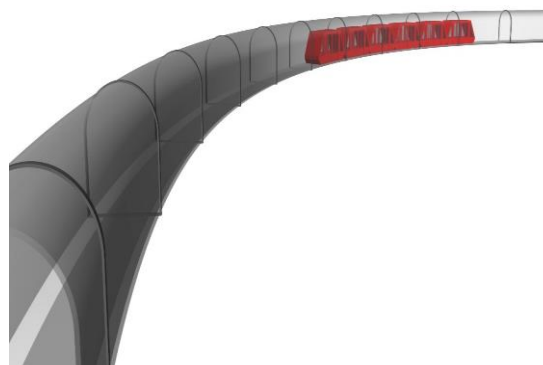


Рис. 2. Тоннель с кассетой из бинфобусов во время движения

Этот тип транспорта высокопроизводителен (не уступает традиционному метро), безопасен, энергоэкономичен, значительно более дешев в сравнении с традиционным метро, имеет более высокую транспортную доступность. Данный тип транспорта является транспортом по запросу, т.е. адаптирован к любому пассажиропотоку (большому, среднему, низкому). Время ожидания пассажиром транспорта минимально и составляет 20 секунд. При этом пассажирам предоставляется возможность движения из пункта A в пункт B , без остановок.

Поставим задачу построения математической модели организации работы этой транспортной системы, обеспечивающей оптимизацию. Например, на основе собранной статистической информации, так организовать отправку поездов по маршруту, чтобы они забрали всех пассажиров на остановочных пунктах с заданной доверительной вероятностью α . Этого можно добиться выбором количества инфобусов, отправляемых по маршруту при фиксированном расписании отправок, либо выбором моментов опрвления поездов из заданного количества инфобусов. Остановимся на первом варианте.

При построении математической модели необходимо учитывать, что пассажиры подходят на остановке и после того, как вагоны отправятся на маршрут. Кроме того, к моменту отправления очередного поезда на маршруте могут находиться и другие поезда, которые «собирают» пассажиров на остановках и часть пассажиров, при этом, может остаться на остановке из-за нехватки мест.

Формализуем работу системы. Рассмотрим стандартную систему организации пассажирских перевозок, когда поезда отправляются из одного накопителя по расписанию и после проезда последней остановки попадают во второй накопитель. Затем эти (или другие поезда, если в накопителе имеется достаточный запас), движутся по обратному маршруту. Полагаем, что загруженность пассажирами по обоим направлениям одинакова, поэтому можно рассматривать только одну ветвь движения.

Пусть на маршруте имеется k остановок, и в заданные расписанием моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$, из 1-го накопителя выходят поезда. Момент выхода 1-го поезда можно считать началом работы системы, т.е. $\tau_1 = 0$. Если поезда выходят через равные промежутки времени $\Delta\tau$, то $\tau_j = (j - 1) \cdot \Delta\tau, j = 1, 2, \dots, m$.

При приближении к остановке каждый поезд движущийся с некоторой постоянной скоростью v_0 : 1) плавно снижает скорость; 2) останавливается; 3) открывает двери; 4) выдерживает интервал выгрузки-загрузки пассажиров; 5) закрывает двери; 6) начинает разгон; 7) выходит на постоянную скорость v_0 .

Из всех перечисленных моментов наиболее значимым представляется 5-ый момент (закрытие дверей), т.к. полагаем, что все пассажиры, пришедшие на остановку до этого момента, могут попасть в поезд. Этот момент назовем моментом проезда остановки, т.е. полагаем, что поезд движется с некоторой постоянной скоростью v_1 ($v_1 < v_0$) и в эти моменты происходит «мгновенный» обмен пассажирами и поезд «без остановки» движется дальше со скоростью v_1 . Обозначим через $\Delta t_i, i = 2, 3, \dots, k$ – интервалы времени между проездом $(i - 1)$ -ой и i -ой остановками. Через Δt_1 обозначим время перемещения поезда от 1-го накопителя до 1-ой остановки. Введем также величины

$$\Delta T_i = \sum_{r=1}^i \Delta t_r, i = 1, \dots, k,$$

определяющие интервал времени между выходом поезда из накопителя и проездом i -ой остановки.

Сравнивая величины ΔT_i и $\Delta\tau$ можно выделить три режима работы системы:

1) $\Delta\tau \geq \Delta T_{k-1}$ – в момент выхода поезда других поездов на маршруте нет за исключением, возможно, поездов, которые проехали предпоследнюю $(k-1)$ -ую остановку, но не достигли последней k -ой (они на работу системы не влияют);

2) $\Delta T_1 \leq \Delta\tau < \Delta T_{k-1}$ – в момент выхода поезда на маршруте есть другие поезда, но предыдущий поезд проехал по крайней мере одну остановку;

3) $\Delta\tau < \Delta T_1$ – в момент выхода поезда на маршруте имеются другие поезда, и предыдущий поезд не доехал до 1-ой остановки.

Наибольший интерес представляет 2-ой режим. В этом режиме можно выделить два класса остановок. К 1-му классу отнесем остановки, которые проехал предыдущий поезд, для них кроме вероятностной информации о пассажирах которые подойдут к остановке имеется информация известная к моменту выезда. Ко 2-му классу отнесем станции, которые предыдущие поезда не проехали, по этим остановкам есть только вероятностная информация о возможных пассажирах. В 1-ом режиме все остановки относятся к 1-му классу, а в режиме 3 – ко 2-му.

Для любого момента работы системы можно построить: *матрицу корреспонденций*; *вектор корреспонденций* для каждого поезда; *вероятностные характеристики потока пассажиров* по станциям; *матрицу предпочтений*.

Квадратную *матрицу корреспонденций* «известных» пассажиров $M(t) = [m_{i,j}(t)]$, $i, j = 1, 2, \dots, k$ можно построить на основе данных с терминалов на остановках, где $m_{i,j}(t)$ – количество пассажиров находящихся в момент t на i -ой станции и желающих доехать до j -ой. Все $m_{i,j}(t) = 0$ для $i = 1, 2, \dots, k$, $j \leq i$. Состояние матрицы корреспонденций изменяется в моменты, когда на остановку подходят новые пассажиры, или пассажиры садятся в поезд. Если t – это момент прохода поезда через i -ую станцию, то все пассажиры находящиеся к этому моменту на этой станции, при наличии свободных мест, садятся в поезд. Это выражается тем, что вся i -ая строка матрицы $M(t)$ – обнуляется. Если свободных мест в поезде не хватает, полагаем, что любой из находящихся к заданному моменту пассажиров с равной вероятностью может попасть в поезд независимо от станции назначения и момента прихода на остановку.

В момент проезда i -ой станции количество «известных» пассажиров, желающих сесть в поезд, определяется как сумма i -ой строки матрицы $M(t)$

$$m_{i\Box}(t) = \sum_{r=1}^k m_{i,r}(t) = \sum_{r=i+1}^k m_{i,r}(t), \quad i=1, \dots, k-1. \quad (1)$$

Вектор корреспонденций n -го поезда в момент t определим, как

$$V^{(n)}(t) = [v_r^{(n)}(t)], \quad r = 1, \dots, k,$$

где $v_r^{(n)}(t)$ – количество пассажиров n -го поезда на момент t , которые выйдут на r -ой станции. После проезда j -ой станции все $v_r^{(n)}(t) = 0$ для $r \leq j$. Величина

$$W^{(n)}(t) = \sum_{r=1}^k v_r^{(n)}(t), \quad (2)$$

определяет текущее, на момент t , количество пассажиров n -го поезда.

Пусть момент t – это момент отправления очередного поезда. Необходимо рассчитать количество вагонов, чтобы решить основную задачу – с заданной вероятностью α собрать всех пассажиров, которые окажутся на станциях к моменту прохода через них этого поезда.

Пассажиров, которые имеются в момент t в системе, разделим на 2 категории:

– «известных» пассажиров количество и станции назначения нам известны. Это пассажиры на станциях, пришедшие до момента t , информация о которых находится в матрице $M(t)$, и пассажиры в поездах, находящихся в момент t на маршруте, информация о которых находится в векторах $V^{(n)}(t)$;

– «неизвестных» пассажиров, количество и станции назначения которых на этот момент не известны. Это пассажиры пришедшие на станции после момента t , пассажиры в поездах, которые попадут после момента t и пассажиры, которые останутся на станциях из-за нехватки мест в предыдущих поездах.

Все показатели, относящиеся к «неизвестным» пассажирам, являются случайными и описываются с использованием аппарата теории вероятностей.

Полагаем что нам известно, например, на основе достаточно продолжительных наблюдений, величины $p_j^{(n)}(t_1, t_2)$, задающие вероятности того, что на n -ую станцию в интервале между моментами t_1 и t_2 прибудет ровно j пассажиров ($j = 0, 1, 2, \dots$).

Полагаем также известной матрицу предпочтений $Q^{(n)} = [q_{i,j}^{(n)}]$, $i, j = 1, \dots, k$, где $q_{i,j}^{(n)}$ – вероятность того, что «неизвестный» пассажир n -го поезда севший на i -ой станции выйдет на j -ой станции. Аналогично матрице корреспонденций можно указать, что $q_{i,j}^{(n)} = 0$ для $i = 1, \dots, k, j \leq i$.

Рассмотрим только «неизвестные» показатели работы системы, не касаясь пока «известных». С дискретными случайными величинами (ДСВ) задающими эти показатели возможны следующие преобразования:

1) сумма двух или более ДСВ, которое возникает, когда, например, необходимо оценить количество пассажиров на станции как суммы пришедших на эту станцию за некоторый промежуток времени и «не взятых» предыдущим поездом, а также количество пассажиров уже находящихся в поезде и вошедших на станции;

2) прореживание ДСВ с заданной вероятностью, когда надо определить количество пассажиров, находящихся в поезде, если каждый из этих пассажиров, независимо от других, может выйти на очередной станции с известной вероятностью.

Распределение суммы двух ДСВ рассчитывается по известной формуле свертки. Пусть $\{p_i^{(1)}\}$ и $\{p_i^{(2)}\}$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) известные распределения двух независимых ДСВ, где $p_i^{(j)}$ – вероятность того, что j -ая ДСВ ($j = 1, 2$) примет значение i . Тогда распределение ДСВ являющейся суммой этих двух будет

$$p_i^{(\Sigma)} = \sum_{r=0}^i p_r^{(1)} \cdot p_{i-r}^{(2)}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, B \quad (3)$$

где B – максимально возможное количество элементов (пассажиров). В нашем случае, например, определяется количеством свободных мест в поезде или на остановке.

Если задана совокупность из случайного числа элементов заданное распределением p_i , $i = 0, 1, 2, \dots$. Например, это ДСВ задающая количество пассажиров в поезде. Пусть с вероятностью q любой из этих элементов не зависимо от других может покинуть совокупность (некоторые из пассажиров выходят на очередной остановке). Тогда количество элементов новой совокупности будет иметь распределение

$$p'_i = p_i - \sum_{r=1}^i C_i^{i-r} \cdot p_i \cdot q^r \cdot (1-q)^{i-r} + \sum_{r=i+1}^B C_r^{r-i} \cdot p_r \cdot q^{r-i} \cdot (1-q)^i, \quad i = 0, 1, \dots, B \quad (4)$$

В (4) 1-ое слагаемое – это исходная вероятность того, что в совокупности ровно i элементов; 2-ое слагаемое (сумма со знаком минус) – вероятность того, что часть реализаций, в которых изначально было i элементов потеряют часть элементов из-за прореживания; 3-е слагаемое (сумма со знаком плюс) – вероятность того, что в части реализаций, в которых изначально больше чем i элементов, произойдут потери элементов из-за прореживания так что в них останется ровно i элементов.

Распределение количества пассажиров «не взятых» поездом определяется исходя из распределения суммы «неизвестных» пассажиров в поезде после «выхода»

пассажиры, доехавших до требуемой станции, и «неизвестных» пассажиров на станции, с учетом свободного места в поезде равного общему числу мест минус количество «известных» пассажиров.

Рассмотрим состояние системы в момент t – выхода нового поезда. Перенумеруем все поезда, находящиеся в этот момент на маршруте. Пусть номер 1 соответствует поезду, который последним покинул накопитель, а N – максимальный номер поезда на маршруте, который к моменту t не проехал предпоследнюю $(k - 1)$ -ую остановку. Известными считаем количество вагонов в каждом поезде $Z^{(n)}$, $n = 1, \dots, N$, следовательно, количество мест в каждом поезде

$$S^{(n)} = H \cdot Z^{(n)}, \quad n = 1, \dots, N$$

где H – максимальное количество мест в вагоне.

Рассмотрим вначале математическую модель N -го поезда. Пусть последняя станция, которую он прошел имеет номер $R^{(N)} \in [0, k - 2]$ (здесь и далее в качестве нулевой станции будем считать исходный накопитель). Для этого поезда известна точная информация о составе пассажиров на станциях с номерами от $R^{(N)} + 1$ до $k - 1$ по состоянию матрицы корреспонденций $M(t)$, и о пассажирах в поезде по состоянию вектора корреспонденций $V_R^{(N)}(t)$. Используя формулы (3) и (4) оценим распределение количества пассажиров в поезде после проезда станций с номерами от $R^{(N)} + 1$ до $k - 1$, а также распределение количества пассажиров «оставленных» на этих станциях, т.е. тех для которых в данном поезде не хватит места.

Аналогично произведем перерасчеты для поездов с номерами $N - 1$, $N - 2$, ..., 1. Расчеты распределений ДСВ, описывающих систему, должны учитывать и «оставленных» пассажиров. Конечным результатом этого этапа расчетов будут распределения количества «оставленных» пассажиров по каждой остановке. Так как полагаем известными распределения количеств пассажиров по всем остановкам, то получим общие распределения, имеющих на каждой из остановок к моменту прибытия на них будущего поезда.

Произведем расчет количества пассажиров для нового (нулевого) поезда. Количество пассажиров, которые окажутся в поезде в момент t – проезда j -ой остановки ($j = 1, \dots, k - 1$) состоит из двух слагаемых детерминированного и случайного. Детерминированное слагаемое определяется по известной на момент t информации

$$D_j^{(0)}(t) = W^{(0)}(t) - v_j^{(0)}(t) + m_{j\Box}(t),$$

где $W^{(0)}(t)$ – общее количество пассажиров в поезде (вычисляется по формуле (2)); $v_j^{(0)}(t)$ – количество пассажиров поезда, которые выйдут на j -ой станции; $m_{j\Box}(t)$ – количество пассажиров на j -ой остановке, которые собираются сесть в поезд (вычисляется по формуле (1)).

Случайное слагаемое представляют «неизвестные» пассажиры, для которых можем получить распределение их количества для каждой из остановок. Для j -ой остановки ($j = 1, \dots, k - 1$) определим величину R_j , для которой можно утверждать, что с заданной доверительной вероятностью α в поезде после j -ой остановки будет находиться не более R_j «неизвестных» пассажиров. Будем считать, что

$$R_j = \min \left(m : \sum_{r=0}^m p_r^{(j)} \geq \alpha \right).$$

Тогда можно утверждать, что после проезда j -ой остановки в поезде с вероятностью α будет не более $v_j = D_j^{(0)} + R_j$ пассажиров, поэтому величина

$$V = \max_j (v_j)$$

определяет максимально количество пассажиров в поезде по всем остановкам. Откуда можно получить необходимое количество вагонов

$$W = \lceil V / H \rceil,$$

где скобки $\lceil \rceil$ означают округление вверх.

Теоретические расчеты подтверждены на имитационной модели. Приведем пример, для которого: интервал времени между выходами вагонов из накопителя $\Delta\tau = 11$ единиц времени (е. в.); интервалы времени перегона от накопителя до 1-ой остановки и между остановками все одинаковые $\Delta t = 19$ е. в.; доверительная вероятность «забрать всех» $\alpha = 0,7$. Потоки пассажиров для каждой остановки – стационарные пуассоновские с одинаковой интенсивностью. На рис. 3 приведены результаты: а) зависимость среднего количества инфобусов в рейсе от интенсивности пассажиропотока; б) зависимость доли полностью обслуженных рейсов от интенсивности пассажиропотока. Интенсивность пассажиропотока изменялась от 0,01 до 6. Усреднение для каждого значения интенсивности проводилось по 10000 реализациям.

Расчетное количество вагонов, необходимых для текущего рейса, может оказаться избыточным. Поэтому возможны рейсы, в которых один вагон «можно было не брать». Такие рейсы называли «пустыми» рейсами. Доля «пустых» рейсов также изображена на рис. 3б).

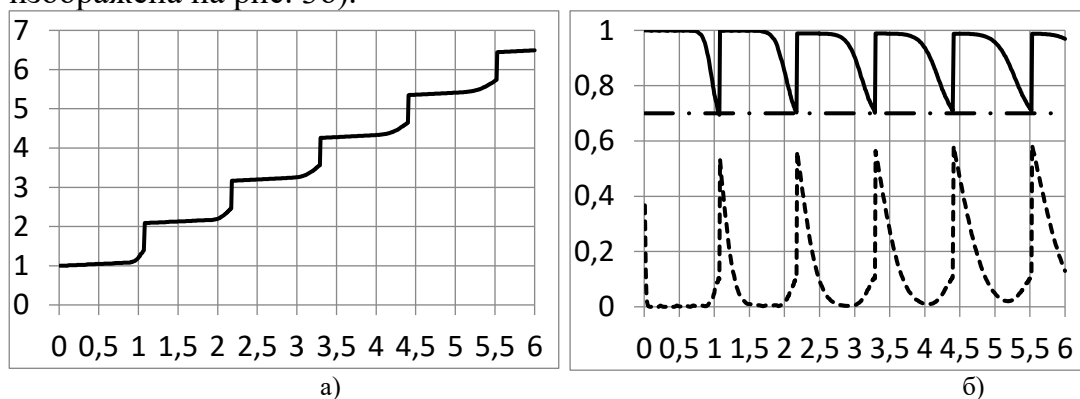


Рис. 3. Результат имитационного эксперимента моделирования работы транспортной системы
а) среднее количество инфобусов в рейсе; б) доля полностью обслуженных рейсов (сплошная), доверительная вероятность (штрих-пунктир) и доля «пустых» рейсов (пунктир)

Результаты моделирования показывают, что предложенная методика расчета оптимального количества вагонов для каждого рейса обеспечивает приемлемый результат.

Библиографический список

1. Проект программы развития зарядной инфраструктуры и электромобильного транспорта в Республике Беларусь.
2. Варелопупо Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. М., Транспорт, 1981. 93 с.
3. Vasili Shuts, Valery Kasyanik. Mobile Autonomous robots – a new type of city public transport. // Transport and Telecommunication. 2011. V. 12 № 4. P. 52-60.
4. Винер Н. Кибернетика. - М., «Советское радио». 1958.
5. Стоимость сооружения 1км метро в Минске составляет от 40 до 60 млн. долларов. URL: <http://minsknews.by/blog/2014/08/19/stoimost-sooruzheniya-1-km-metro-v-minske-sostavlyaet-ot-40-do-60-mln-dollarov/> (дата обращения 14.08.2018).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АЛМАЗНОГО ДАТЧИКА РАСХОДА ВОЗДУХА

И.А. Хорунжий¹, В.А. Мартинович¹, В.Н. Казючиц², М.С. Русецкий², Н.М. Казючиц²

¹Белорусский национальный технический университет, Беларусь, Минск,
igor.khorunzhii@newmail.ru, valeriiam@yahoo.com

²Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск,
kazuchitsvn@bsu.by, rusetsky@bsu.by, kazuchits@bsu.by

Аннотация. Выполнена экспериментальная проверка компьютерной модели датчика расхода воздуха на основе алмаза. Экспериментальный макет состоит из пластины синтетического алмаза, закрепленной на двух балках, медного радиатора, источника питания и системы обдува датчика потоком воздуха. На поверхности алмазной пластины методом ионной имплантации созданы нагреватель и терморезистор. Компьютерная модель адаптирована к параметрам и условиям эксперимента. Зависимости изменения температуры датчика при разных скоростях движения воздуха измерены экспериментально и рассчитаны методом компьютерного моделирования. Получено хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными.

Ключевые слова: синтетический алмаз, датчик расхода воздуха, математическое моделирование, экспериментальная верификация

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION OF DIAMOND AIR FLOW SENSOR

I.A. Khorunzhii¹, V.A. Martinovich¹, V.N. Kazuchits², M.S. Rusetsky², N.M. Kazuchits²

¹Belarussian National Technical University, Belarus, Minsk,
igor.khorunzhii@newmail.ru, valeriiam@yahoo.com

²Belarussian State University, Belarus, Minsk,
kazuchitsvn@bsu.by, rusetsky@bsu.by, kazuchits@bsu.by

Abstract. Experimental verification of computer simulation of the diamond air flow sensor is performed. The experimental model consists of the synthetic diamond plate fixed on two bars, copper radiator, power supply and air flow system for diamond sensor. The heater and the thermoresistor on the diamond plate surface are fabricated by ion implantation method. The computer simulation is adapted to parameters and experimental conditions. The sensor dependencies of temperature change at different air flow speed are measured experimentally and calculated by method of numerical simulation. Good correlation between the experimental and calculated data is obtained.

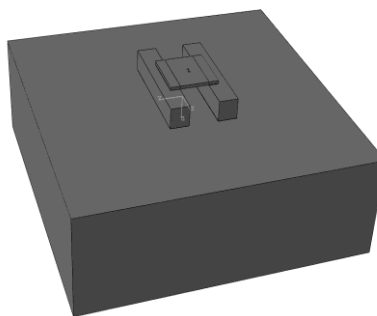
Keywords: synthetic diamond, air flow sensor, numerical simulation, experimental verification.

В работе [1] представлены результаты компьютерного моделирования характеристик алмазного датчика расхода воздуха, установленного в держатели с разной теплопроводностью. Высокое быстродействие датчика обеспечивали держатели с высокой теплопроводностью, но его чувствительность (изменение температуры при изменении скорости воздуха) была низкой. Использование держателей с низкой теплопроводностью увеличивало чувствительность в ущерб быстродействию.

Целью настоящей работы является экспериментальная верификация результатов компьютерного моделирования характеристик алмазного датчика расхода воздуха.

Для проверки результатов компьютерного моделирования изготовлен макет датчика расхода воздуха, фотография которого представлена на рис. 1а. Макет включает алмазную пластину размером $5 \times 5 \times 0,36$ мм³, вырезанную из синтезированного методом НРНТ кристалла и установленную в держатель – две параллельные балки размером 10×2 мм². Балки установлены на массивную медную пластину, выполняющую роль радиатора. Используемые в экспериментах балки изготовлены из меди и фторопласта. Между алмазной пластиной и балками, а также между балками и медной пластиной нанесен тонкий слой теплопроводящей пасты для улучшения теплового контакта. На одной из поверхностей алмазной пластины методом ионной имплантации [2]

изготовлены терморезисторы с термочувствительными областями размером $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$ и двумя контактными областями размером $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$. Один из терморезисторов использовался в качестве нагревателя, а другой, отстоящий на $0,2 \text{ мм}$ – в качестве измерителя температуры. Подключение к нагревателю и термометру осуществлялось с помощью игольчатых контактов. Обдув алмазного датчика воздухом из компрессора проводился через медную трубку с внутренним диаметром 10 мм . Расход воздуха регулировался вентилем. На нагреватель подавалось постоянное напряжение $9,65 \text{ В}$, при этом ток в цепи нагревателя составлял $61,9 \text{ мА}$. Таким образом, электрическая мощность нагревателя составляла примерно 600 мВт .



а
б

Рис. 1. а) фотография макета алмазного датчика расхода воздуха;
б) компьютерная модель, использованная в расчетах

Эксперимент состоял в следующем: после включения нагревателя и стабилизации температуры включали обдув датчика воздухом. Расход воздуха в процессе эксперимента несколько раз увеличивали. При этом терморезистором непрерывно измеряли температуру.

Для проведения верификации математическая модель, разработанная в [1], модифицирована и ее схема максимально приближена к реальному макету датчика расхода воздуха. На рис. 1б представлено изображение компьютерной модели, которая использовалась для расчетов. После доработки модель включала пластину алмазного датчика, две балки, на которые датчик установлен, медную пластину, а также слои теплопроводящей пасты, нанесенные на соприкасающиеся поверхности деталей макета. Геометрические размеры деталей в компьютерной модели и экспериментальном макете датчика были одинаковыми. В центре одной из поверхностей алмазной пластины заданы две резистивные области размером $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$, расстояние между которыми составляло $0,2 \text{ мм}$. Одна из областей являлась источником теплового потока с плотностью $1,49 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ и соответствовала мощности $0,597 \text{ Вт}$ электрического нагревателя в макете датчика расхода воздуха. При расчетах моделировалось распределение температуры в алмазной пластине от источника теплового потока. Рассчитанные на расстоянии $0,2 \text{ мм}$ от источника тепла изменения температуры сравнивались с экспериментально измеренными значениями терморезистором.

На рис. 2а показано рассчитанное распределение температуры от источника теплового потока в алмазной пластине, установленной на медные балки. На рис. 2б приведены зависимости температуры датчика от времени при изменении скорости воздушного потока, измеренные экспериментально (кривая 1) и полученные из расчетов (кривая 2). Воздушный поток включался через 64 с после начала нагрева и последовательно увеличивался в моменты времени, соответствующие $120, 159, 191 \text{ с}$. Скорость воздушного потока составляла по сделанным оценкам $1, 3, 5, 7 \text{ м/с}$,

соответственно. Из рис. 2б видно, что рассчитанные значения температуры близки к значениям, измеренным экспериментально.

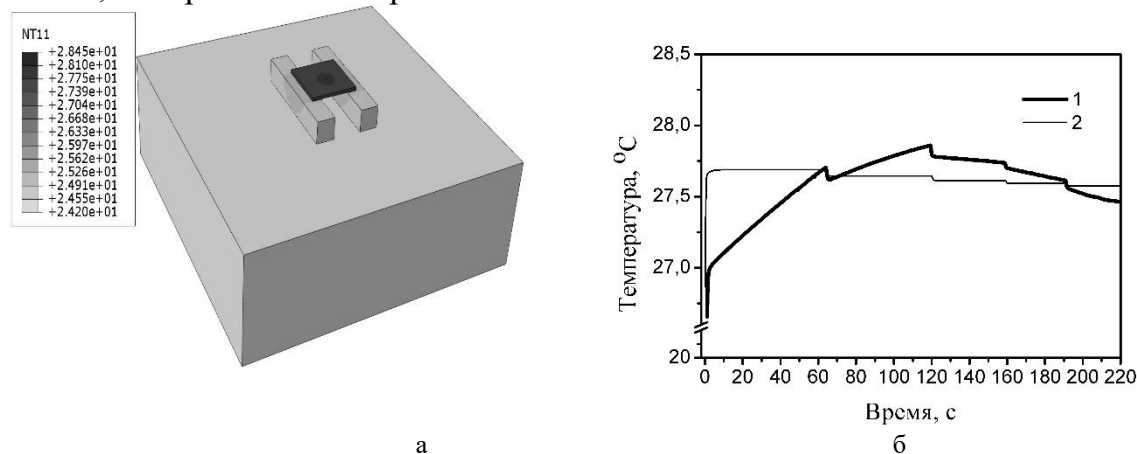


Рис. 2. а) распределение температуры в датчике расхода воздуха на медных балках, полученное на основе компьютерного моделирования;
 б) кривые изменения температуры во времени при изменении скорости воздушного потока (кривая 1 – эксперимент, кривая 2 – моделирование)

Благодаря хорошему отводу тепла по медным балкам разогрев алмазной пластины относительно комнатной температуры составил около 3,5 °С. Резкие уменьшения температуры датчика, наблюдаемые каждый раз при увеличении скорости воздушного потока на 2 м/с, имели близкие по величине значения, составляющие 0,08 °С, которые происходили в одинаковые моменты времени. Это указывает на правильное описание компьютерной моделью процессов, происходящих в датчике расхода воздуха. Экспериментально измеренное колоколообразное изменение температуры, по-видимому, соответствует разогреву, а при возросшем обдуве – охлаждению медных балок. Расхождение экспериментальных и расчетных результатов в данном случае связано с неучтенными в компьютерной модели характеристиками воздушного потока.

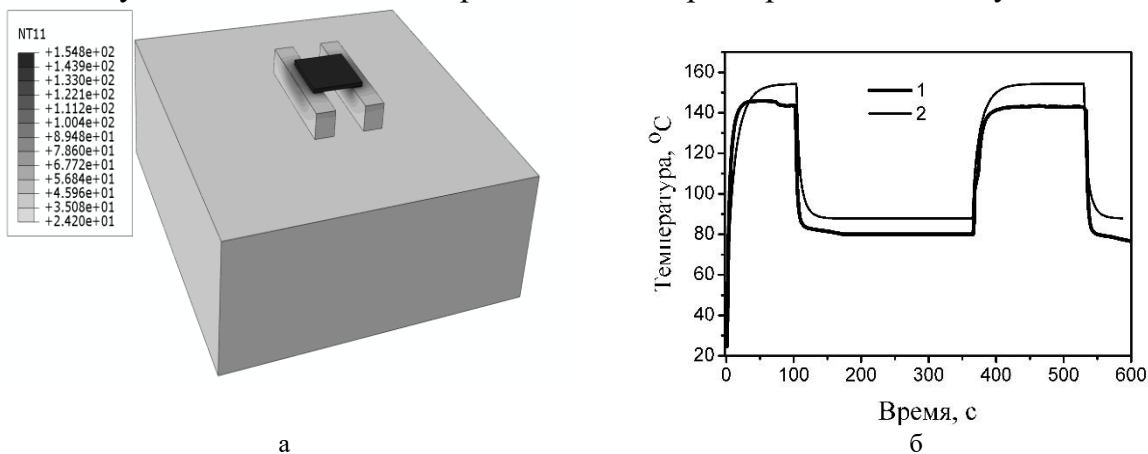


Рис. 3. а) распределение температуры в датчике расхода воздуха на фторопластовых балках, полученное на основе компьютерного моделирования;
 б) кривые изменения температуры во времени при включении-выключении воздушного потока (кривая 1 – эксперимент, кривая 2 – моделирование)

На рис. 3а показано рассчитанное распределение температуры от источника теплового потока в алмазной пластине, установленной на фторопластовые балки. На рис. 3б приведены зависимости температуры датчика от времени при включении-выключении воздушного потока, измеренные экспериментально (кривая 1) и полученные из расчетов (кривая 2). В экспериментах температура достигала приблизительно 150 °С через 20 с после включения нагревателя. На 103 с после начала

нагрева включался воздушный поток, что приводило к снижению температуры до 80 °С. Скорость воздушного потока составляла по оценочным расчетам 5 м/с. Охлаждение продолжалось до 367 с, затем оно выключалось на 165 с и повторно включалось в прежнем режиме. Как видно из рис. 3б, кинетики нагревания и охлаждения хорошо воспроизводились. Значения температуры датчика, полученные экспериментально и методом компьютерного моделирования, отличались примерно на 10%, что, с учетом отсутствия данных о характеристиках воздушного потока, можно считать хорошим совпадением теоретического и экспериментального результатов. Кроме того, совпадали экспериментальная и рассчитанная кинетики изменения температуры датчика при включении-выключении воздушного охлаждения. Следует отметить, что высокая чувствительность датчика на фторопластовых балках, которая составила около 14 °С при изменении скорости потока воздуха на 1 м/с.

Таким образом, из сравнения результатов компьютерного моделирования и результатов экспериментального исследования характеристик алмазного датчика расхода воздуха следует, что компьютерное моделирование хорошо описывает процессы нагревания-охлаждения датчика, установленного на балках с различной теплопроводностью, и может быть использовано для оптимизации параметров его конструкции.

Библиографический список

1. Хорунжий И.А., Мартинович В.А., Русецкий М.С., Казючиц Н.М. Математическое моделирование тепловых процессов в алмазном датчике расхода воздуха // Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов Международной научной конференции. Санкт-Петербург. 2017. Т.10. С. 30-33.
2. Теплоотвод на основе алмаза со встроенным датчиком температуры / В.А. Мартинович, И.А. Хорунжий, М.С. Русецкий, Н.М. Казючиц // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18. № 4. С. 209-217.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ КИНЕТИКИ И ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТБОРА БИОМАССЫ

И. А. Авцинов, Н. В. Суханова, Ю. Е. Кожевников

*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Россия, Воронеж,
Suhanovanv1971@mail.ru*

Аннотация. Представлен вариант решения задачи оптимального управления отбором биомассы из аппарата с использованием принципа максимума Понтрягина. В качестве критерия оптимальности выбрана максимальная продуктивность аппарата. На конечномерном пространстве определяется функция Понтрягина, функция Гамильтона и конечная функция. Доказано, что оптимальное управление возможно при найденных соотношениях коэффициента естественного роста и коэффициента, учитывающего внутривидовую конкуренцию микроорганизмов. Для определения оптимального значения концентрации микроорганизмов и величины отбора биомассы необходимо по ходу процесса культивирования определять численные значения коэффициентов модели.

Ключевые слова: моделирование кинетики, оптимальное управление, отбор биомассы, принцип максимума Понтрягина

METHOD FOR DETERMINING THE FACTORS OF THE MODEL KINETICS AND OPTIMAL SIGNIFICANCE OF BIOMASS SELECTION

I. A. Avcinov, N. V. Sukhanova, Y. Y. Kozhevnikov

Voronezh State University of Engineering Technologies, Russia, Voronezh, Suhanovanv1971@mail.ru

Abstract. Submitted by solution tasks of optimal control of biomass from the selection apparatus using the Pontryagin maximum principle. Optimality criterion chosen maximum productivity of the machine. The finite dimensional space is defined by Pontryagin function, Hamilton function and end function. It is proved that the optimal control is possible when found correlations coefficient of natural growth and factor that takes into account the inner-specific competition of microorganisms. To determine the optimal concentrations of microorganisms and screening values of biomass cultivation process progresses, you must determine the numerical values of model coefficients.

Keywords: modeling of kinetics, the optimal control, the selection of the biomass, the Pontryagin maximum principle

Для биотехнологического процесса выращивания дрожжей задачи оптимизации являются особо актуальными, т.к. они характеризуются влиянием множества факторов на скорость развития популяции, сложностью технологического регламента, плохой воспроизводимостью данных. Все это обуславливает необходимость принятия оптимального решения при известных начальных условиях и при различном течении процесса.

Одной из наиболее актуальных проблем при производстве хлебопекарных дрожжей является ведение отбора биомассы из аппарата в процессе культивирования. Существующие схемы товарной стадии выращивания дрожжей предусматривают жесткую программу ведения отбора, что не всегда обеспечивает ожидаемую продуктивность аппарата. Поэтому возникает необходимость использования текущих данных о процессе и математического описания для определения оптимального значения количества отбираемой биомассы из аппарата в процессе культивирования.

Рассмотрим математическую модель процесса в виде [1-3]:

$$\begin{cases}
\theta \frac{dX}{dt} = \theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot K_4 \cdot X^{2(i)} - \theta \cdot \frac{F}{V^{(i)}} \cdot X^{(i)} + (X^{(i)} - X^{(i-1)}); \\
\theta \frac{dS_1}{dt} = -\frac{\theta}{Y_{X/S_1}} \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} - \theta \cdot m \cdot X^{(i)} + \\
+ \theta \cdot \frac{F_1}{V^{(i)}} \cdot (S_{01} - S_1^{(i)}) + (S_1^{(i)} - S_1^{(i-1)}); \\
\theta \frac{dS_2}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[\alpha_{02} + \frac{(\alpha_{m2} - \alpha_{02}) \cdot S_2^{(i)}}{K_5 + S_2^{(i)}} \right] + \\
+ \theta \cdot \frac{F_2}{V^{(i)}} \cdot (S_{02} - S_2^{(i)}) + (S_2^{(i)} - S_2^{(i-1)}); \\
\theta \frac{dS_3}{dt} = -\theta \cdot \mu_m \cdot \frac{S_1^{(i)}}{K_1 + S_1^{(i)}} \cdot \frac{S_2^{(i)}}{K_2 + S_2^{(i)}} \cdot \frac{S_3^{(i)}}{K_3 + S_3^{(i)}} \cdot X^{(i)} \cdot \left[\alpha_{03} + \frac{(\alpha_{m3} - \alpha_{03}) \cdot S_3^{(i)}}{K_6 + S_3^{(i)}} \right] + \\
+ \theta \cdot \frac{F_3}{V} \cdot (S_{03} - S_3^{(i)}) + (S_3^{(i)} - S_3^{(i-1)}); \\
F = F_1 + F_2 + F_3; \\
\theta \frac{dT}{dt} = T^{(i)} + T_B^{(i)} + \theta \cdot \varphi^{(i)} \cdot a_0 \cdot (X^{(i)} - X^{(i-1)}) \cdot V^{(i)} - \theta \gamma^{(i)} G_{\text{воз}} \cdot \Delta l.
\end{cases} \quad (1)$$

где μ_m – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов; $K_1, K_2, K_3, K_4, Y_{X/S_1}, K_5, K_6$ – коэффициенты; α_0 и α_m – минимальное и максимальное содержание элемента в биомассе для минеральных субстратов; X, S_1, S_2, S_3 – концентрации биомассы, углеводов, азота и фосфора соответственно; V – объем жидкости; F – объемная скорость подачи питательных веществ; F_1, F_2, F_3 – объемные скорости подачи мелассы, сульфата аммония и диаммонийфосфата; S_{01}, S_{02}, S_{03} – концентрации сахаров, азота и фосфора в подпитке; m – скорость потребления субстрата на поддержание жизнедеятельности; θ – время роста микроорганизмов в аппарате; a_0 – коэффициент удельного тепловыделения дрожжей; $G_{\text{воз}}$ – массовый расход воздуха; Δl – приращение теплосодержания воздуха; T – температура культуральной среды в аппарате; T_B – температура воды в рубашке аппарата; φ, γ – промежуточные переменные.

Для определения оптимального значения концентрации микроорганизмов и величины оптимального отбора биомассы, необходимо по ходу процесса культивирования определять численные значения коэффициентов модели ε и β ($\frac{dX}{dt} = [\varepsilon - \beta \cdot X] \cdot X$). Анализ модели (1), показывает, что коэффициенты ε и β можно выразить следующим образом [1, 2]:

$$\varepsilon = \left(\mu - \frac{F}{V} + \frac{1}{\theta} \right), \quad \beta = K_4, \quad (2)$$

где ε – коэффициент естественного роста микроорганизмов, $\varepsilon > 0$; β – коэффициент, учитывающий внутривидовую конкуренцию микроорганизмов, $\beta > 0$.

В качестве критерия оптимальности выбирается максимальная продуктивность аппарата [4]:

$$\Phi = \int_0^{t_K} c \cdot u dt + c \cdot x(t_K), \quad (3)$$

где x – удовлетворяет дифференциальному уравнению:

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{dt} &= [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u] - u; \\
x(0) &= x^0, \quad x(t) \equiv x^0, \quad t \in [0; t_K],
\end{aligned} \quad (4)$$

где x^0 – количество микроорганизмов в аппарате во время отбора; t_k – время выращивания микроорганизмов; u – количество микроорганизмов, отбираемых из аппарата в каждый момент времени $t \in [0; t_k]$, u является управляющим воздействием и характеризует скорость отбора, c – стоимость единицы объема биомассы. При этом выполняется следующее ограничение:

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{x}(t). \quad (5)$$

Интегральный член в функционале задает общую стоимость биомассы, отобранной из аппарата на всем интервале времени $[0, t_k]$. Терминальный член – общую стоимость биомассы, оставшуюся в аппарате в конечный момент времени t_k .

Задача оптимального управления формулируется следующим образом: на интервале времени от 0 до t_k , необходимо найти такое значение $u(t)$, которое обеспечивает максимум Φ в выражении (3) при ограничении в виде (5), при котором концентрация $x(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению (4).

Для решения поставленной задачи введем дополнительную переменную x_0 [4].

$$\frac{dx_0}{dt} = c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u]; \quad x_0(0) = x^0. \quad (6)$$

В этом случае задача оптимизации формулируется следующим образом: необходимо найти $\min[-x_0(t_k)]$ при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} \frac{dx_0}{dt} &= c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u], \\ \frac{dx}{dt} &= c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u] - u, \\ x_0(0) &= x^0, \quad x(0) = x^0, \quad x(t) \equiv x^0, \\ t &\in [0; t_k], \quad u - x \leq 0, \quad u > 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения задачи оптимизации воспользуемся принципом максимума Понтрягина [4]. Определим на конечномерном пространстве $x_0, x, \psi_0, \psi_1, u, l_1, l_2$, функцию Понтрягина H , функцию Гамильтона \mathfrak{R} и конечную функцию L следующим образом:

$$\begin{aligned} H(x_0, x, u, \psi_0, \psi_1) &= -\psi_0 \{c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u]\} - \psi_1 \{c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u] - u\}, \\ \mathfrak{R}(x_0, x, u, \psi_0, \psi_1, l_1, l_2) &= -\psi_0 \cdot \{c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u]\} + \\ &+ \psi_1 \cdot \{c \cdot [\varepsilon - \beta \cdot (x - u)] \cdot [x - u] - u\} + l_1 \cdot [u - x] - l_2 \cdot u, \\ L(l_1, x_0(t_k)) &= -l_1 \cdot x_0(t_k). \end{aligned}$$

Практически при всех $t \in [0; t_k]$ имеет место:

$$H(\bar{x}_0, \bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi}_0, \bar{\psi}_1) = \max \mathfrak{R}(\bar{x}_0, \bar{x}, \bar{u}, \bar{\psi}_0, \bar{\psi}_1), \quad (8)$$

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{x}},$$

$$\frac{d\mathfrak{R}}{du} = 0, \quad (9)$$

и выполняется условие нормировки:

$$\|\mathbf{l}_1\| + \|\bar{\psi}_0\| + \|\bar{\psi}_1\| + \|\mathbf{l}_1\| + \|\mathbf{l}_2\| > 0. \quad (10)$$

Воспользовавшись принципом максимума Понтрягина, получим, что если:

$$\bar{x} \geq \varepsilon \cdot c \cdot \frac{\bar{\psi}_0}{2 \cdot \beta [c \cdot \bar{\psi}_0 + \bar{\psi}_1]} + [1 + \varepsilon] \cdot \frac{\bar{\psi}_1}{2 \cdot \beta [c \cdot \bar{\psi}_0 + \bar{\psi}_1]}, \quad (11)$$

то выражение (8) эквивалентно условию:

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{d\mathfrak{R}}{du} + l_2 - l_1.$$

Из выражения (10) вытекает, что на интервале $[0; t_k]$ $\psi_1 \leq 0$. Максимум H достигается на одном из концов отрезка $[0; x]$. Неравенство (11) эквивалентно выражению $dH/du \leq 0$. Окончательно выражение для управления можно записать в виде:

$$\bar{u} = \begin{cases} \bar{x} - \frac{\varepsilon}{2\beta} - \frac{\psi_1}{2\beta[\psi_0 c + \psi_1]}, \\ \text{при } \bar{x} \geq \frac{\varepsilon}{2\beta} + \frac{\psi_1}{2\beta[\psi_0 c + \psi_1]}, \\ 0, \text{ при } \bar{x} < \frac{\varepsilon}{2\beta} + \frac{\psi_1}{2\beta[\psi_0 c + \psi_1]}. \end{cases} \quad (12)$$

В интегральном принципе максимума $l_1 \neq 0$. Для общности будем полагать $l_1 = 1$.

Подставляя управление \bar{u} из (12) в уравнение (7) для траектории x получим:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \begin{cases} \frac{\varepsilon^2}{4\beta} + \frac{\varepsilon}{2\beta} - \bar{x}, \text{ при } \bar{x} \geq \frac{\varepsilon}{2\beta}, \\ [\varepsilon - \beta \cdot \bar{x}] \cdot \bar{x}, \text{ при } \bar{x} < \frac{\varepsilon}{2\beta}. \end{cases} \quad (13)$$

При этом в силу $\bar{x} \geq \frac{\varepsilon}{2\beta}$ управление имеет вид:

$$\bar{u} = \frac{\varepsilon^2}{4\beta}. \quad (14)$$

Расчет значений ε и β необходимо производить по ходу процесса, используя систему уравнений (1). Отбор биомассы из аппарата начинается при достижении текущей концентрации X уровня $\frac{\varepsilon}{2\beta}$. Для определения объема биомассы, отбираемой из аппарата,

используется выражение:
$$\frac{dX}{dt} = \mu \cdot X^{(i)} - K_4 \cdot X^{(i)2} - \frac{F}{V} \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta} (X^{(i)} - X^{(i-1)}).$$

Учитывая, что весь прирост биомассы должен быть отобран во время отбора, и принимая во внимание нулевые начальные условия, т. е. $X^{(i-1)} = 0$, объем отбираемой биомассы определяется как:

$$V_{от} = \frac{F}{\frac{u}{X^{(i)}} - \mu + K_4 \cdot X^{(i)} + \frac{1}{\theta}}. \quad (15)$$

На основе описанной выше методики разработана АСУ отбором биомассы дрожжей из аппарата в процессе культивирования. Использование такой системы позволяет снизить время культивирования на 1 час. Оптимальная концентрация $X = 59$ кг/м³, время отбора t' – начало 6 часа; время культивирования - $t_k = 12$ ч.

Библиографический список

1. Ануфриев В. В., Кожевников Ю. Е. Математическая модель кинетики роста микроорганизмов с учётом гидродинамики и теплопередачи в аппарате // Электромеханические устройства и системы: межвуз. сб. науч. тр. / Воронеж. гос. технич. ун-т. Воронеж. 1997. С.105 – 109.
2. Авцинов И. А., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В. Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов // Вестник ТГТУ. 2017. Т.23. № 3. С.481 - 487.
3. Голубкина Н. В. Математическая модель полупериодического процесса ферментации биомассы микроорганизмов / Н. В. Голубкина, Л. С. Гордеев, В. В. Ануфриев, Г. И. Щепкин, С. Г. Тихомиров // Информационные технологии и системы. Технологические задачи механики сплошных сред: тез. докл. республ. конф. Воронеж: Воронеж. гос. ун – т. 1992. С. 50.
4. Покорный Ю. В. Оптимальные задачи. Изд-во: Регулярная и хаотичная динамика, 2008. 160 с.

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСИСТЕМ

Е.И. Гацкевич*, М.А. Гундина, М.А. Князев*****

* *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, gatskevich@bntu.by*

** *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, maryanatolevna@mail.ru*

*** *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, maknyazev@bntu.by*

Аннотация. На основе численного решения задачи Стефана проведено моделирование лазерно-индуцированных процессов при облучении импульсами рубинового лазера систем аморфный тонкопленочный Ge на полупроводниковых подложках. Исследованы динамика нагрева и отвердевания в различных режимах лазерного облучения. Проанализированы изменения в последовательности фазовых превращений с ростом плотности энергии облучения и их связь со структурой лазерно-модифицированных плёнок.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка, аморфный германий, тонкие плёнки, гетероструктуры, плавление, отвердевание, задача Стефана.

MODELING THE PROCESSES OF PULSED LASER TREATMENT OF SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURES

E.I. Gatskevich*, M.A. Gundina, M.A. Knyazev*****

* *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, gatskevich@bntu.by*

** *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, maryanatolevna@mail.ru*

*** *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, maknyazev@bntu.by*

Abstract. Modeling the laser-induced processes has been carried out on the basis of numerical solution of Stefan problem at the irradiation of the system of amorphous thin-film Ge on semiconductor substrates by ruby laser pulses. Dynamics of heating and solidification in different regimes of laser irradiation is studied. Changes in the sequence of phase transitions with the growth of irradiation energy density and in the structure of laser modified films are analysed.

Keywords: pulsed laser treatment, amorphous germanium, thin films, heterostructures, melting, solidification, Stefan problem

Импульсная лазерная обработка (ИЛО) полупроводниковых материалов широко применяется для отжига имплантационных слоев, очистки поверхности, формирования р-п переходов, активации электрической примеси и в других технологических процессах [1]. Импульсные лазерные воздействия позволяют минимизировать или даже исключить недостатки, присущие обычной термообработке, среди которых нежелательное перераспределение имплантированных атомов, диффузионное внедрение неконтролируемых примесей, генерация термодфектов и т.д. Эти возможности обусловлены как локальностью (порядка микрометров), так и короткими длительностями (десятки наносекунд) лазерного воздействия. В последнее время ИЛО используется для модификации свойств сложных полупроводниковых систем: структуры с квантовыми точками [2], сверхрешётки [3], многослойные системы [4].

В основе теоретического описания процессов лазерной обработки полупроводниковых структур с длительностями импульсов до десятков наносекунд лежит модель плавления [1]. Моделирование лазерно-индуцированных процессов на основе модели плавления осуществляется на основе численного решения задачи Стефана, причем обычно используются схемы сквозного счёта [5].

В настоящей работе проведено моделирование лазерно-индуцированных процессов в плёнках аморфного германия (a-Ge) на подложках кристаллического Ge при наносекундном облучении импульсами рубинового лазера. Рассмотрена ситуация, когда исследуемые структуры обрабатываются однородными по пространству энергетическими потоками. В этом случае можно использовать одномерное приближение. При переходе к сосредоточенной теплоёмкости [5] уравнение теплопроводности с условием Стефана на границе фазового перехода можно записать в виде:

$$\rho(x,T)(c(x,T) + L\delta(T - T_m))\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k(x,T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + Q(x,t),$$

$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, T|_{x=D} = T|_{t=0} = T_0,$$

где T – температура, $T_0 = 300$ К, координата x направлена вглубь образца, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, L – скрытая теплота плавления, T_m – температура плавления, $\delta(T)$ – дельта функция Дирака. Функция $Q(x,t)$ описывает выделение тепла при поглощении лазерного излучения:

$$Q(x,t) = \alpha(T)(1 - R)q(t)\exp\left\{-\int_0^x \alpha(T(x'))dx'\right\},$$

здесь α – коэффициент поглощения, R – коэффициент отражения. Форма лазерного импульса описывалась выражением $q(t) = \frac{W}{\tau} \sin^2(\pi t / 2\tau)$, $\tau = 80$ ns. В расчете учитывались температурные зависимости оптических и теплофизических параметров слоёв, а также зависимость их от фазового состояния. При моделировании δ -функции использовалась дельта-образная функция, которая аппроксимировалась гауссообразной функцией с шириной по полувысоте Δ , включающей не менее 3-х точек:

$$\delta(T - T_m, \Delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left[-\frac{(T_m - T)^2}{2\Delta^2}\right]$$

На границе пленка – подложка предполагалась идеальная адгезия и равенство тепловых потоков. Уравнение теплопроводности для системы плёнка – подложка решалось в конечных разностях методом прогонки по неявной разностной схеме. Моделирование лазерно-индуцированных процессов в гетероструктуре a-Ge/Ge проводилось для аморфных плёнок толщиной 150 нм.

Свойства аморфного Ge существенно отличаются от свойств кристаллического Ge (c-Ge). В частности, его температура плавления (965 К) почти на 250 К ниже температуры плавления c-Ge (1210К), а скрытая теплота плавления в 1.5 раза меньше. Кроме того, аморфный Ge обладает, как и все аморфные материалы, низкой теплопроводностью, что влияет на кинетику фазовых переходов.

На рис. 1а приведены расчётные временные зависимости пиковой температуре поверхности в различных режимах облучения. Из рисунка видно, что как температурная динамика, так и последовательность фазовых переходов существенно зависят от плотности энергии облучения W . При $W \leq 0.1$ Дж/см² происходит нагрев гетероструктуры, причем максимальная температура поверхности меньше температуры плавления аморфного германия 965 К, то есть пленки остается в аморфном состоянии.

При плотности энергии больше 0.2 Дж/см^2 поверхностный слой нагревается до температуры плавления аморфного германия и пленка плавится на некоторую глубину с образованием переохлажденного расплава Ge (ul-Ge), но поглощенной энергии недостаточно, чтобы расплавить всю плёнку, температура на границе пленка/подложка меньше температуры плавления a-Ge. Переохлажденный расплав при отвердевании переходит в аморфное состояние. В этой ситуации в плёнке имеет место следующая последовательность фазовых переходов: a-Ge \Rightarrow ul-Ge \Rightarrow a-Ge. Дальнейшее

увеличение плотности энергии облучения ($W=0.3$ и 0.5 Дж/см^2) приводит к увеличению температуры в пленке и подложке (рис. 1а), а также к росту глубины проплавления, которая все ещё остается меньше толщины пленки (рис. 1б), при этом последовательность фазовых переходов не изменяется. При $W=0.7 \text{ Дж/см}^2$ происходит полное расплавление плёнки, на температурной зависимости наблюдается резкое увеличение температуры ($t \approx 100 \text{ нс}$), что обусловлено тем, что поглощённая энергия более не тратится на плавление плёнки, а идет только на её нагрев. Расплавленная пленка остается в переохлажденном состоянии. Последовательность фазовых переходов не изменяется.

При увеличении W до 0.9 Дж/см^2 начинает плавиться подложка. В этой ситуации температура в пленке выше температуры плавления кристаллического Ge, то есть, осуществляется переход от переохлаждённого расплава к равновесному расплаву. При отвердевании равновесный расплав переходит в поликристаллическое состояние. Фазовые переходы будут происходить в следующей последовательности: a-Ge \Rightarrow ul-Ge \Rightarrow l-Ge \Rightarrow pc-Ge, здесь l-Ge и pc-Ge обозначают равновесный расплав ($T \geq 1210 \text{ К}$) и поликристаллический Ge, соответственно. Время существования расплава с увеличением плотности энергии возрастает со 120 нс до 250 нс , а затем с началом плавления подложки это время уменьшается. При $W=0.9 \text{ Дж/см}^2$ время существования расплава уменьшается почти на 50 нс , что обусловлено увеличением теплоотвода в подложку за счёт более высокой теплопроводности кристаллического Ge, а также большей скрытой теплотой плавления и более высокой температурой отвердевания pc-Ge.

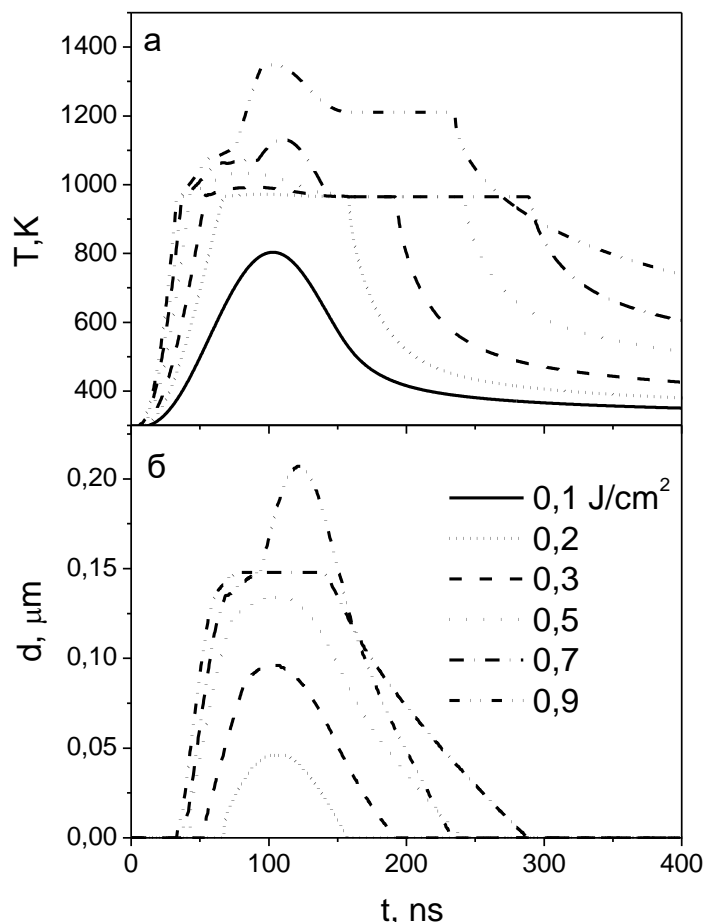
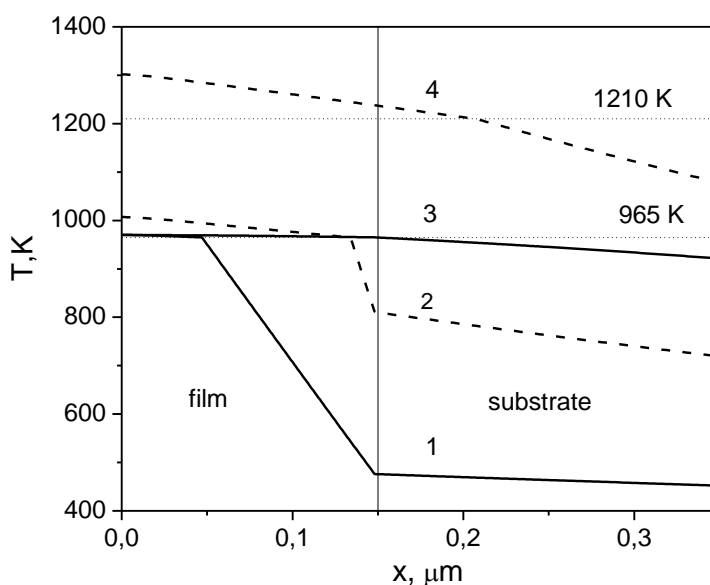


Рис. 1. Временные зависимости температуры поверхности гетероструктуры a-Ge/Ge и глубины плавления при указанных значениях плотности энергии облучения

Представляется интересным рассмотреть распределения температуры по глубине в момент начала отвердевания (рис. 2). При $W=0.2$ Дж/см² плёнка плавится на глубину порядка 50 нм, в расплавленной части в момент начала отвердевания расплавленная плёнка находится при температуре близкой к температуре плавления аморфного Ge и в ней практически отсутствует градиент температуры, зато в нерасплавленной части пленки наблюдается достаточно высокий градиент температуры, обусловленный слабым отводом тепла из-за низкой теплопроводности аморфного Ge. При отвердевании переохлаждённый расплав переходит в аморфное состояние

При увеличении W до 0.5 Дж/см² плёнка также характеризуется низким градиентом температуры, нерасплавленная часть плёнки является теплоизолирующим слоем с высоким градиентом температуры. При плотности энергии облучения 0.8 Дж/см² плёнка проплавляется на всю глубину и температуры в плёнке и подложке выравниваются, причем расплав продолжает находиться в переохлажденном состоянии, при отвердевании образуется аморфный Ge. При $W=0.9$ Дж/см² температура в плёнке достигает температуры равновесного расплава и отвердевание происходит с образованием поликристаллического Ge.

Таким образом, на основе численного решения одномерной задачи Стефана проведено моделирование лазерно-индуцированных процессов в тонкоплёночном германии на подложках кристаллического германия при наносекундном облучении. Получены данные по динамике нагрева и остывания при ИЛО. Установлено, что при плотностях энергии облучения W недостаточных для плавления всей плёнки или достижения в ней равновесной температуры плавления (1210 К), имеет место следующая последовательность фазовых превращений: a-Ge ⇒ ul-Ge ⇒ a-Ge. При W достаточных для достижения равновесной температуры плавления фазовые превращения происходят в следующей последовательности: a-Ge ⇒ ul-Ge ⇒ l-Ge ⇒ pc-Ge.



1- $W=0.2$ Дж/см², $t=113$ нс; 2 – 0.5, 116;
3-0.8, 159; 4- 0.9, 124

Рис. 2. Распределение температуры по глубине в момент начала отвердевания при ИЛО a-Ge/Ge

Библиографический список

1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. / В.П. Вейко [и др.]. М.: Физматлит. 2008. 312 с.
2. Володин, В. А. Модификация квантовых точек в наноструктурах Ge/Si импульсным лазерным облучением / В.А. Володин [и др.] // ФТП. 2006. Т.40. №2. С.207-214.
3. Pulsed laser annealing of Si-Ge superlattices/ Sobolev N.A.[et al.] // Materials Sciences and Engineering, 2003, Vol. C23. pp.19-22.
4. Pulsed laser annealing of highly doped Ge:Sb layers deposited on different substrates / R.I. Batalov [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. С. 395102 (7pp).
5. Самарский А.А., Моисеенко В.Д. Экономическая схема сквозного счёта для многомерной задачи Стефана//Журнал выч. математики и мат. физики. 1965. Т.5. №5. С.828-840.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ МИНИКОЛЬЦЕВЫХ НАСАДОК НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

М. Г.-Г. Багомедов*, М. Г. Беренгартен**, А. С. Пушнов***

* *Московский политехнический университет,
Россия, Москва, bagomedovmurad@mail.ru*

** *Московский политехнический университет,
Россия, Москва, berengarten@mail.ru*

*** *Московское химическое общество им. Д. И. Менделеева,
Россия, Москва, pushnovas@gmail.com*

Аннотация. Исследовано гидравлическое сопротивление сухих и орошаемых миникольцевых насадок с различной высотой элементов: 50×5×0,2 мм, 50×10×0,2 мм и 50×15×0,2 мм. Получены уравнения для расчета зависимости гидравлического сопротивления от скорости газового потока в расчете на полное сечение пустого аппарата для сухой и орошаемой насадок. Показано, что с уменьшением высоты элементов насадки от 15 мм до 5 мм наблюдается закономерное увеличение гидравлического сопротивления в слое насадки. Предложены конструкция новых контактных устройств для колонных аппаратов химической технологии, выполненных в виде миникольцевых насадок типа МКМ.

Ключевые слова: промышленные насадки, гидравлическое сопротивление, порозность, миникольцо, удельная поверхность, эквивалентный диаметр.

INFLUENCE OF HEIGHT OF MINIRING PACKINGS ON HYDRAULIC RESISTANCE

M. G.-G. Bagomedov*, M. G. Berengarten**, A. S. Pushnov***

* *Moscow polytechnic university,
Russia, Moscow, bagomedovmurad@mail.ru*

** *Moscow polytechnic university,
Russia, Moscow, berengarten@mail.ru*

*** *Moscow chemical society. D.I. Mendeleev,
Russia, Moscow, pushnovas@gmail.com*

Abstract. The hydraulic resistance of dry and irrigated miniring packings with different element heights was investigated: 50×5×0.2 mm, 50×10×0.2 mm and 50×15×0.2 mm. The equations are obtained for calculating the dependence of the hydraulic resistance on the gas flow velocity in the calculation on total cross section of the empty apparatus for dry and irrigated nozzles are obtained. It is shown that with a decrease in the height of the nozzle elements from 15 mm to 5 mm, a regular increase in the hydraulic resistance in the nozzle layer is observed. The proposed of new contact devices for column devices of chemical technology, made in the form of miniring packings type MRM.

Keywords: industrial packings, hydraulic resistance, porosity, miniring, specific surface, equivalent diameter.

Интенсивность тепло- и массообменных процессов в насадочных колонных аппаратах в большей степени зависят от конструкции контактного устройства. Для обеспечения высокой интенсивности тепло- и массообменных процессов насадочное контактное устройство должно обладать большой удельной поверхностью и обеспечивать полное обмывание этой поверхности без образования застойных зон с сохранением низкого гидравлического сопротивления. Перспективными контактными устройствами для осуществления тепло- и массообменных процессов в химической технологии являются миникольцевые насадки, обладающие уникальным свойством самоориентации в пространстве при их загрузке в колонные аппараты «внавал». У существующих промышленных мини-кольцевых насадок высота элемента насадки в пределах от $h = 12$ мм до $h = 18$ мм [1]. Актуальной является задача определения оптимальных габаритных размеров элементов этих насадок. Для этой цели необходимо детальное исследование новых типов эффективных насадок.

Важнейшим технологическим преимуществом разработанной нами конструкции мини-кольцевых насадок является форма насадки, выполненная в виде

колец Мебиуса типа МКМ, которая позволяет обеспечить полное обмывание всей поверхности элементов насадки без образования застойных зон при осуществлении процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах химической технологии. В работе изучалась влияние высоты этих насадок на их гидравлическое сопротивление. Исследовали три типоразмера колец Мебиуса, геометрические характеристики испытанных насадок представлены в табл. 1. Высота элементов испытанных насадок составляла 5, 10 и 15 мм.

Гидравлические испытания проводили в колонне диаметром $D = 0,2$ м. Высота слоя насадки в колонном аппарате составляла $H = 0,65$ м. Опыты проводили на сухой и орошаемой насадке. Нагрузки по газу изменяли в пределах от $W_0 = 0,4$ м/с до $W_0 = 1,3$ м/с. Здесь W_0 – скорость воздушного потока в расчете на полное сечение пустого аппарата. Нагрузка по жидкости (вода) составляла $24 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$.

Таблица 1. Основные геометрические характеристики насыпных колец Мебиуса типа МКМ.

Размер элемента насадки, мм	Удельная поверхность $\alpha, \text{м}^2/\text{м}^3$	Порозность $\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр $d_e, \text{м}$	Число элементов $N, \text{шт}/\text{м}^3$
50×5×0,2	179	0,9848	0,022	123000
50×10×0,2	170	0,9863	0,023	59400
50×15×0,2	160	0,9878	0,025	37700

На рис. 1 представлены результаты опытов с сухой насадкой исследованных типоразмеров в виде зависимости гидравлического сопротивления от скорости газового потока в расчете на полное сечение пустого аппарата $\left(\frac{\Delta P}{H}\right) = f(W_0)$

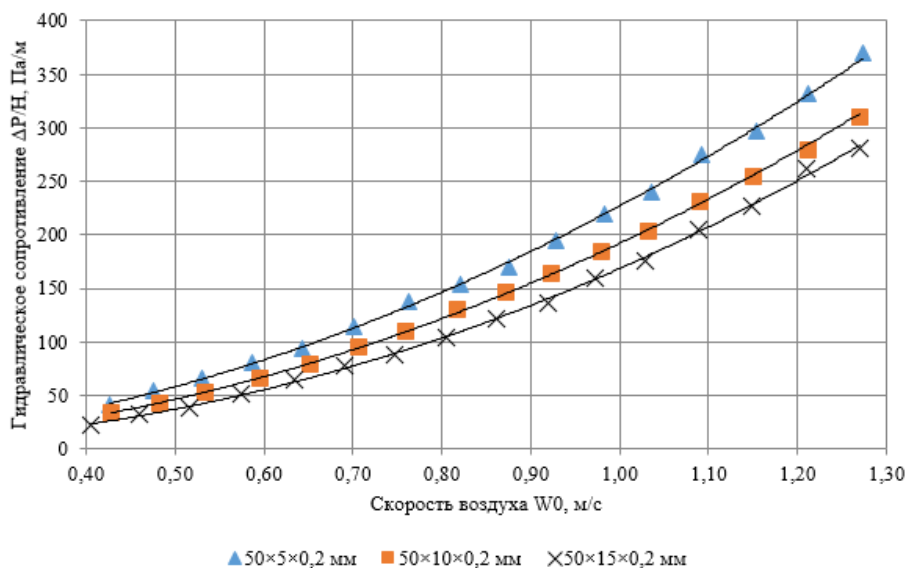


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газового потока для различных размеров сухой насадки

Как это следует из данных представленных на рис. 1, гидравлическое сопротивление у колец меньшей высоты более высокое, что объясняется увеличением количества «концевых эффектов» в этом случае. Аналогичный эффект в работе [2], где изучали гидравлическое сопротивление регулярных насадок различной высоты.

Опытные данные по гидравлическому сопротивлению сухой насадки обобщены в виде степенной зависимости:

$$\left(\frac{\Delta P}{H}\right) = A \times W_0^m, \quad (1)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление, Па; H – высота слоя насадки, м; W_0 – скорость воздуха в расчете на полное сечение пустого аппарата, м/с; A – коэффициент, для насадки $50 \times 5 \times 0,2$ мм $A = 229$; для насадки $50 \times 10 \times 0,2$ мм $A = 191$; для насадки $50 \times 15 \times 0,2$ мм $A = 162$; m – показатель степени, для всех типоразмеров насадки $m = 2$.

На рис. 2 представлены результаты опытов с орошаемой насадкой исследованных типоразмеров в виде зависимости гидравлического сопротивления от скорости газового потока в расчете на полное сечение пустого аппарата $\left(\frac{\Delta P}{H}\right) = f(W_0)$.

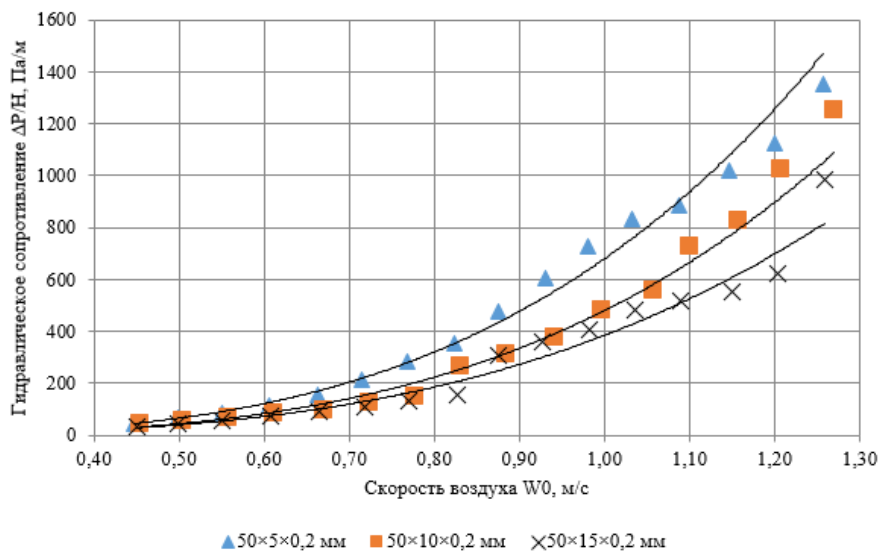


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газового потока для различных размеров насадки при плотности орошения $24 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что у орошаемой насадки, также как и у сухой, гидравлическое сопротивление колец меньшей высоты более высокое, что также объясняется увеличением количества «концевых эффектов».

Опытные данные по гидравлическому сопротивлению орошаемой насадки с различной высотой элементов насадки обобщены в виде аналогичной степенной зависимости:

$$\left(\frac{\Delta P}{H}\right) = A \times W_0^m \quad (2)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление, Па; H – высота слоя насадки, м; W_0 – скорость воздуха в расчете на полное сечение пустого аппарата, м/с; A – коэффициент, для насадки $50 \times 5 \times 0,2$ мм $A = 672$; для насадки $50 \times 10 \times 0,2$ мм $A = 473$; для насадки $50 \times 15 \times 0,2$ мм $A = 391$; m – показатель степени, для всех типоразмеров насадки $m = 3,3$.

Число «концевых эффектов» у миникольцевых насадок типа МКМ пропорционально числу элементов в единице объема. Анализ показал, что при высоте элементов насадки в диапазоне от $h = 5$ мм до $h = 10$ мм число «концевых эффектов» значительно увеличивается это видно из графика зависимости $N = f(h)$ (см. рис. 3).

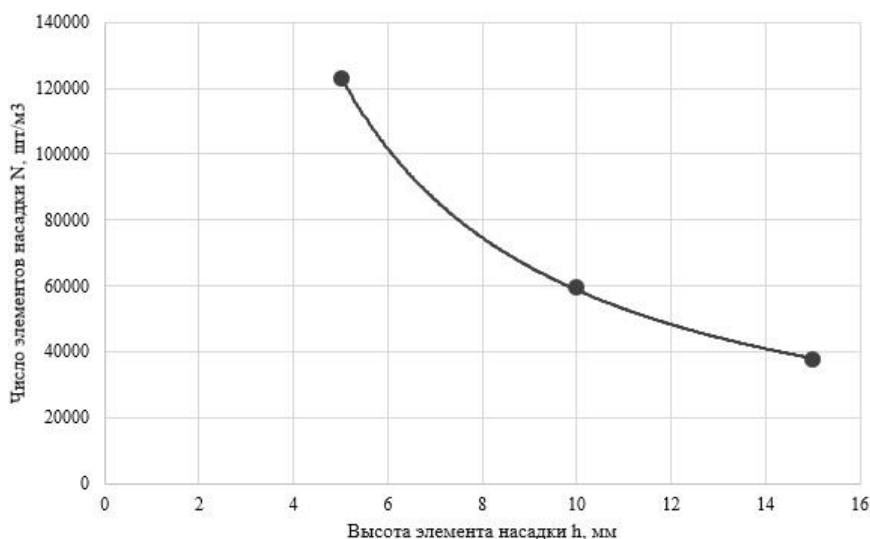


Рис. 2. График зависимости числа элементов насадки от высоты элемента

В работе [2] установлено, что с уменьшением высоты одиночных пакетов регулярной насадки при прочих равных условиях объемные коэффициенты массоотдачи, благодаря влиянию «концевых эффектов», существенно возрастают, что дает основание для предположения о том, что эта высота является целесообразной для миникольцевых насадок. С другой стороны, увеличение числа «концевых эффектов» приводит к росту гидравлического сопротивления в слое насадки. Таким образом задача оптимизации заключается в поиске наибольшей эффективности при одновременно минимальном гидравлическом сопротивлении. В нашем случае в соответствии с результатами, полученными в работах [1, 2] можно полагать, что указанным требованиям отвечает насадка типа МКМ с размерами 50x5x0,2 мм.

На основании проведенных исследований нами получены расчетные уравнения для оценки сухих и орошаемых насадок в испытанном диапазоне нагрузок: по скорости газового потока в расчете на полное сечение пустого аппарата от $W_0 = 0,4$ м/с до $W_0 = 1,3$ м/с; по жидкости 24 м³/(м² ч), что может быть применено для расчета тепло- и массообменных процессов в контактных насадочных аппаратах.

Библиографический список

1. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. Монография. Под. ред. Лаптева А.Г. Казань: Отечество. 2013. 454 с.
2. Махнин А.А. Совершенствование процессов и аппаратов для очистки паровоздушных смесей от органических растворителей сорбционными методами: дис. ... д-р техн. наук. Ярославль, 2010.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ В РЕГУЛИРУЮЩЕМ КЛАПАНЕ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ОК-12А¹

В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, С.А. Токарев, И.В. Алексеев

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,
Россия, Иваново, nik-lon@mail.ru*

Аннотация. Анализируются потери, возникающие при течении пара через регулирующий клапан приводной турбины ОК-12А, работающей в составе питательного турбонасосного агрегата энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. Анализ выполняется на основе построенной трехмерной модели регулирующего клапана с привлечением САЕ пакетов программ. Верификация моделей производилась на основе эксплуатационных параметров, полученных в процессе работы энергоблока при различных режимах. Определены поля распределения потерь давления, возникающие при различных режимах работы приводной турбины.

Ключевые слова: регулирующий клапан, паровая турбина, потери энергии, турбопитательный насос, трехмерное моделирование.

DETERMINATION OF THE ENERGY LOSSES OF THE WORKING MEDIUM IN THE REGULATING VALVE OF THE STEAM TURBINE OK-12A

V. N. Gorbunov, N. A. Lonshakov, S. A. Tokarev, I. Alekseev

*Ivanovo State Power University. V. I. Lenin,
Russia, Ivanovo, nik-lon@mail.ru*

Annotation. The losses arising from the steam flow through the control valve of the drive turbine OK-12A, operating as part of the feed turbine pump unit of the NPP unit with the reactor type VVER-1000, are analyzed. The analysis is performed on the basis of the constructed three-dimensional model of the control valve with CAE packages of programs. The models were verified on the basis of operational parameters obtained during the operation of the power unit under different conditions. Determined field distribution of the pressure loss that occurs when different modes of operation of the drive turbine.

Keywords: control valve, steam turbine, energy loss, turbo-feed pump, three-dimensional modeling.

Проблема модернизации действующего оборудования энергетической отрасли не теряет актуальность и в настоящее время. Множество агрегатов, эксплуатируемых на отечественных ТЭС и АЭС, спроектированы в 60-70х годах XX века в соответствии с уровнем научно-технологического развития этого времени. В наши дни существует широкий спектр возможностей в области анализа работы оборудования на основе цифровых методов моделирования, позволяющие определить конструктивно-технологические недостатки действующего оборудования энергетической отрасли. В качестве объекта исследования выбран питательный турбонасосный агрегат (ТПН), предназначенный для подачи питательной воды в парогенераторы из цикла регенерации второго контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. Для привода ТПН используется паровая турбина ОК-12А, спроектированная в 70-х годах Калужским турбинным заводом [1]. Подача рабочего тела на приводную турбину осуществляется через 2 параллельно работающих регулирующих клапана (РК), в которых посредством дросселирования происходит падение давления перегретого пара на 280000-600000 Па.

Для построения трехмерной модели регулирующего клапана использовались геометрические характеристики основных элементов проточной части, полученные из сборочного чертежа, а также на основе анализа научно-технической литературы [2,3,4]. Модель клапана построена в программном пакете SolidEdge (рис. 1-2).

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке федерального агентства по делам молодежи «Росмолодежь».

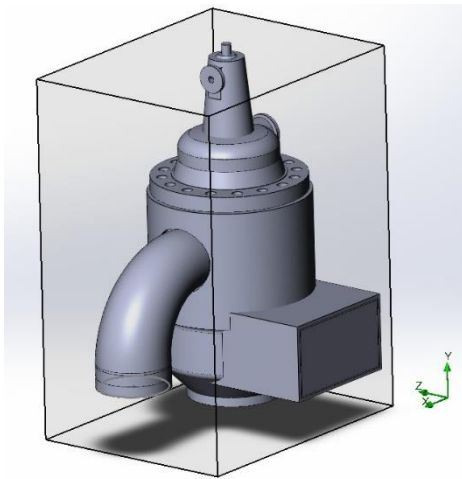


Рис. 1. Общий вид 3D модели клапана

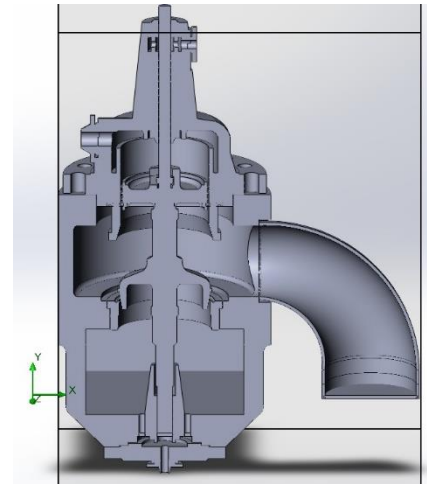


Рис. 2. Разрез 3D модели клапана

Далее, для проведения расчета течения водяного пара через проточную часть регулирующего клапана методом конечных элементов, весь паровой объем разбивается на элементы. Вычисления выполняются в САЕ программных пакетах: Ansys Fluent, Ansys CFX и Solid Edge Flow Simulation (SEFS). Расчетная сетка, полученная в каждом из программных пакетов, отличается как структурой, так и количеством элементов. Для SEFS паровой объем разбит на 60 000 - 200 000 ячеек прямоугольной формы (рис. 3-4)

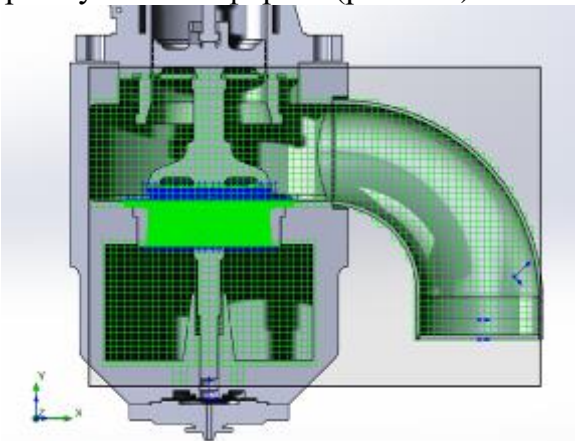


Рис. 3. Расчетная сетка для Solid Edge Flow Simulation

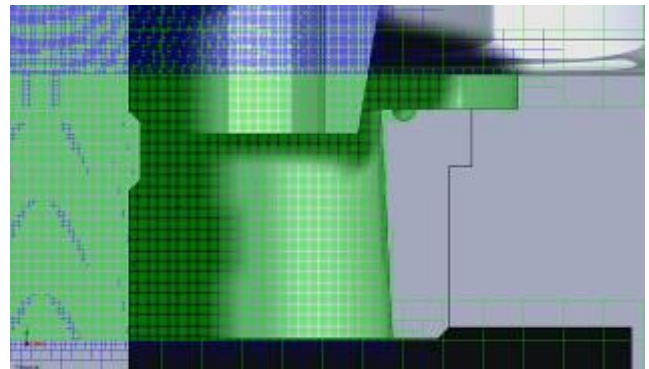


Рис. 4. Расчетная сетка для зазора регулирующего клапана в Solid Edge Flow Simulation

В программных пакетах Ansys использовались тетрагональные элементы, количеством от 500 000 до 900 000 штук (рис. 5-6).

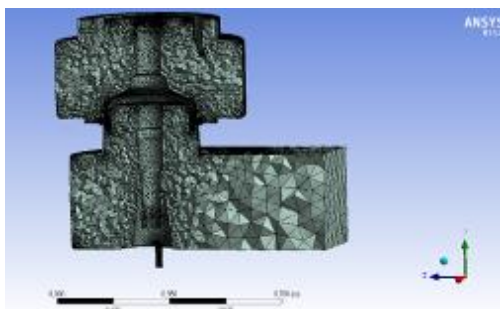


Рис. 5. Расчетная сетка для Ansys Fluent/CFX

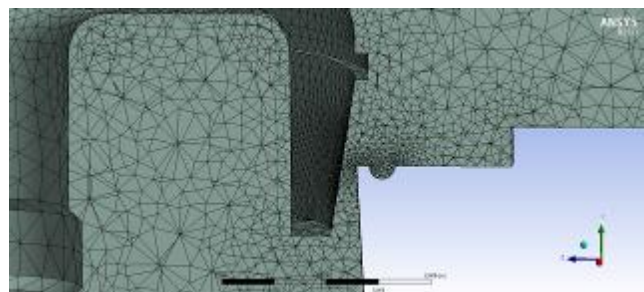


Рис. 6. Расчетная сетка для зазора регулирующего клапана Ansys Fluent/CFX

Для задания граничных условий и верификации созданных трехмерных моделей регулирующего клапана получены эксплуатационные данные по работе ТПН на

действующей АЭС [5]. Из массива данных выбраны точки, отражающие работу приводной турбины при различных эксплуатационных условиях (табл. 1).

Таблица 1. Данные по работе турбопитательного насоса

№	Степень открытия РК, мм	Расход пара через РК, кг/с	Давление до РК, Па	Температура до РК, К	Давление за РК, Па	Температура за РК, К
1	33,2	20	855135	451	311849	433
2	40,7	23,5	947317	516	511904	508
3	49,3	24,1	912994	517	552111	511

В качестве граничных условий для выполнения расчета принято давление на входе в регулирующий клапан и массовый расход пара на выходе из РК, верификация работы моделей проводилась на основе давления пара после клапана.

В ходе расчетов получены поля распределения термодинамических параметров перегретого пара по проточной части регулирующего клапана. В качестве примера приведены поля распределения давления и скорости пара, при степени открытия РК 33,2 мм (рис. 7-12).

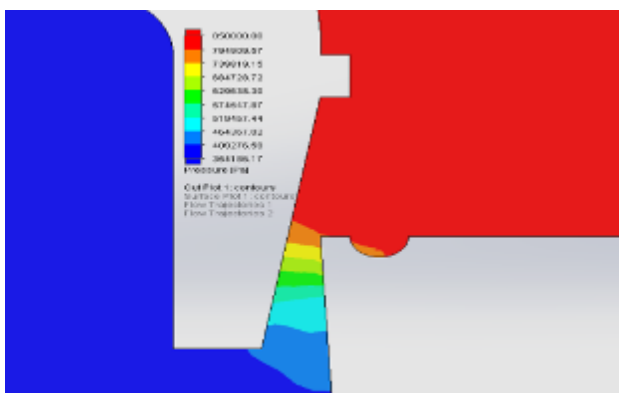


Рис. 7. Поле распределения давления в РК, определенное SEFS

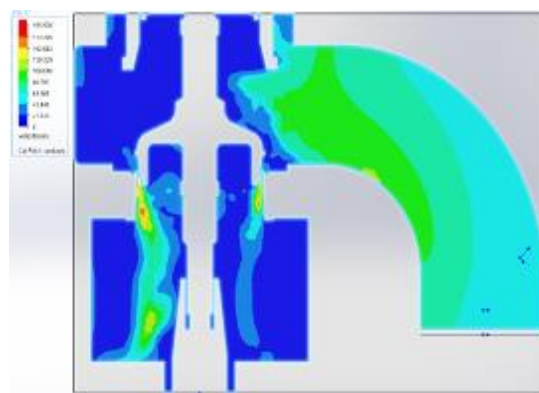
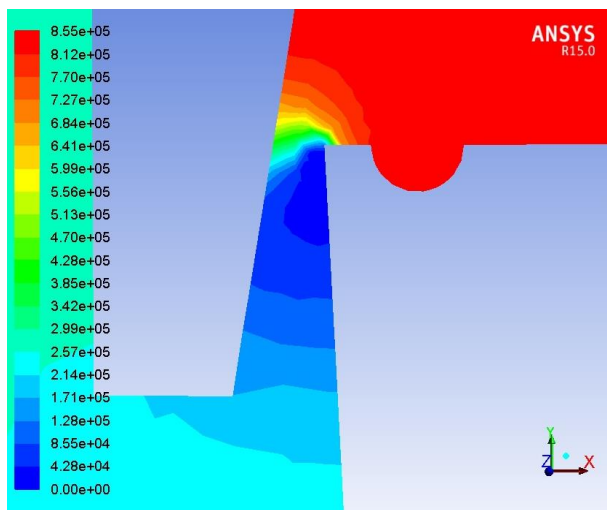
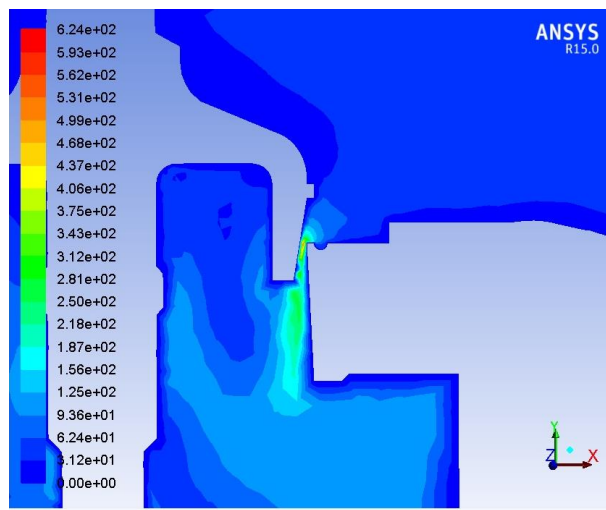


Рис. 8. Поле распределения скоростей в РК, определенное SEFS



Contours of Absolute Pressure (pascal) ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, ske) Oct 15, 2018

Рис. 9. Поле распределения давления в РК, определенное Ansys Fluent



Contours of Velocity Magnitude (m/s) ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, ske) Oct 15, 2018

Рис. 10. Поле распределения скорости в РК, определенное Ansys Fluent

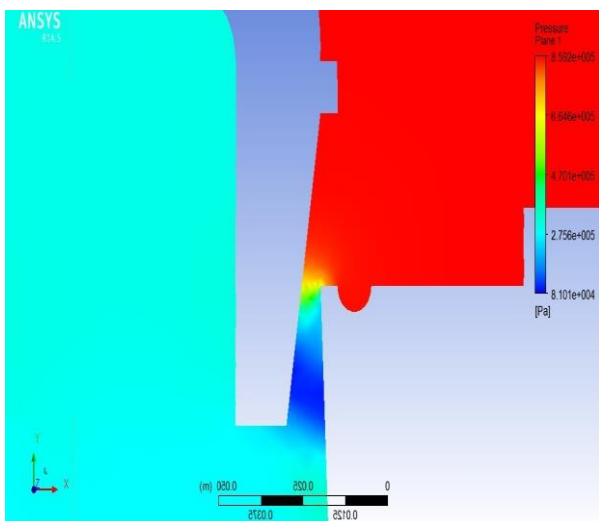


Рис. 11. Поле распределения давления в РК, определенное Ansys Fluent

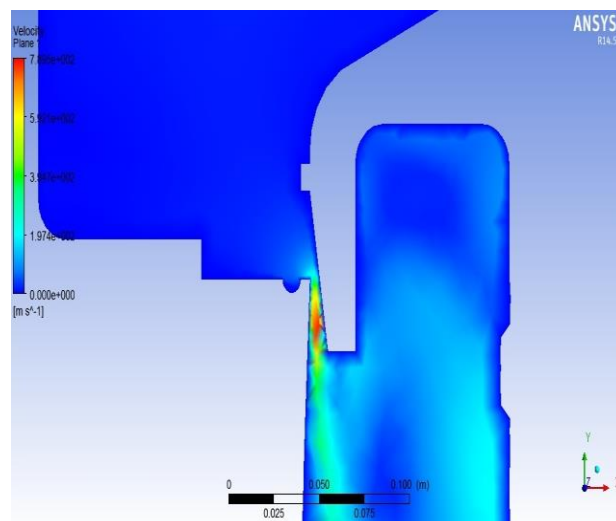


Рис. 12. Поле распределения давления в РК, определенное Ansys Fluent

Таким образом, во всех САЕ программных пакетах получены схожие результаты. Наиболее интенсивное изменение параметров происходит в зазоре между затвором и седлом клапана, где скорость потока пара может достигать 400 м/с. Наибольшей точностью обладают расчеты, проведенные в программной среде Ansys уменьшением размеров и возможностью изменения форм расчетных элементов. Все проведенные расчеты обладают погрешностью расчета, определяемого по конечному давлению, в пределах 5%.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации проточной части регулирующего клапана с целью снижения потерь энергии пара, поступающего на впуск приводной паровой турбины ОК-12А, работающей в составе турбопитательного насосного агрегата блока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. Уменьшение потерь энергии позволит сократить расход пара на входе в турбину без снижения эффективности ее эксплуатации [6].

Библиографический список

1. Турбина паровая ОК-12А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации № 103-М-0211. Калужский турбинный завод.
2. Зезюлинский Г.С. Основы эксплуатации турбинных установок атомных электростанций. Книга 1. Учебник. Севастополь: СНУЯЭиП. 2009.
3. Насосы АЭС: Справочное пособие / П.Н.Пак, А.Я.Белоусов, А.И.Тимшин и др./ Под общ. ред. П.Н.Пака. - М.: Энергоатомиздат. 1989.
4. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; Под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. М.: Издательство МЭИ. 2001. 488 с.
5. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А. Оптимизация затрат энергии турбопитательных насосов блока АЭС нейросетевыми методами моделирования // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. №3. с. 54 – 61.
6. В.А. Иванов «Эксплуатация АЭС». Энергоатомиздат. 1994.

СИСТЕМНЫЙ И РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗЫ ПОЖАРОВ НА ЛОКОМОТИВАХ

В.С. Асламова, Е.Ю. Фролова

Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск, aslamovav@yandex.ru

Аннотация. Актуальность работы обоснована неудовлетворительным состоянием пожарной безопасности на российских железных дорогах и необходимостью системного анализа причин возникновения пожара на локомотивах и прогнозирования их количества.

Ключевые слова: статистика пожаров, локомотив, значимые факторы, регрессионная модель.

SYSTEM AND REGRESSION ANALYSES OF FIRES IN LOKOMOTIVA

V. S. Aslamova, E.Yu. Frolova

Irkutsk state Transport University, Russia, Irkutsk, aslamovav@yandex.ru

Abstract. The relevance of the work is justified by the unsatisfactory state of fire safety on the Russian Railways and the need for a systematic analysis of the causes of fire on locomotives and predict their number.

Keywords: fire statistics, locomotive, significant factors, regression model.

Ежегодно по железным дорогам России перевозится не менее 45 % грузов [2]. Для адекватного расчета индивидуального пожарного риска необходимо выполнить анализ пожарного состояния локомотивов (рис. 1) и установить статистические закономерности пожаров. Как видно из рис. 1, по сравнению с данными о пожарах за 2017 г. (20 пожаров), с 1 января по 31 июля 2018 г. наблюдается снижение численности пожаров в 1,65 раза. Наибольшее количество пожаров на локомотивах за рассматриваемый период времени допущено в следующих региональных дирекциях тяги: Северной – 73 случая (11,7 % от общего числа пожаров); Свердловской – 68 сл. (10,9 %); Дальневосточной – 65 сл. (10,4 %); Забайкальской – 55 сл. (8,8 %).

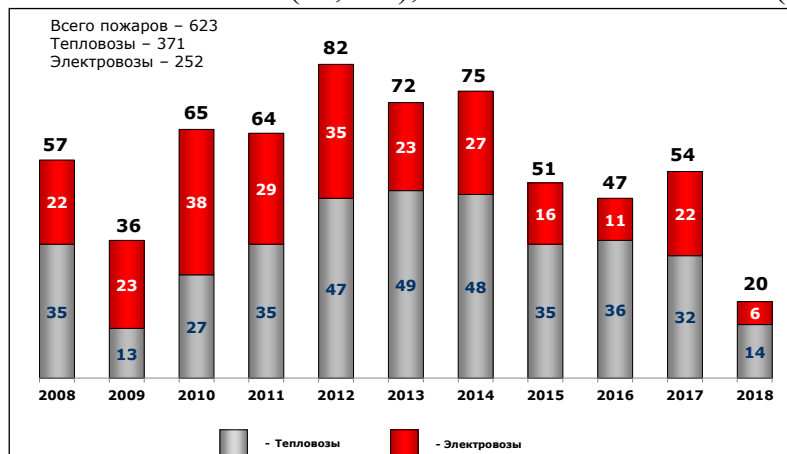


Рис. 1. Динамика числа пожаров на локомотивах ОАО «РЖД» за период 2008-2017 гг. и 7 мес. 2018 г. [1]

Наиболее подвержены пожарам серии тепловозов ТЭ10 в/и – 242 случая (65,2 % от общего числа пожаров на тепловозах) и 2ТЭ116 в/и – 101 сл. (27,2 %).

На рис. 2 представлена диаграмма Парето узлов тепловоза, отказ которых стал причиной возникновения пожара.

Как видно из рис. 2, 74 % от общего числа пожаров вызвано 3 значимыми факторами (отказом узлов): дизельный двигатель (топливная система, масляная система, выхлопная система, турбокомпрессор) – 37 %; электрические цепи управления – 22 %; силовые электрические цепи – 15 %.

Существенными факторами (причинами), влияющими на частоту возникновения пожара на тепловозах (9 % от общего числа пожаров), являются:

тяговый электродвигатель – 5 %; главный генератор – 4 %. Причем, что 83 % от общего количества пожаров вызваны неисправностями 42 % оборудования.

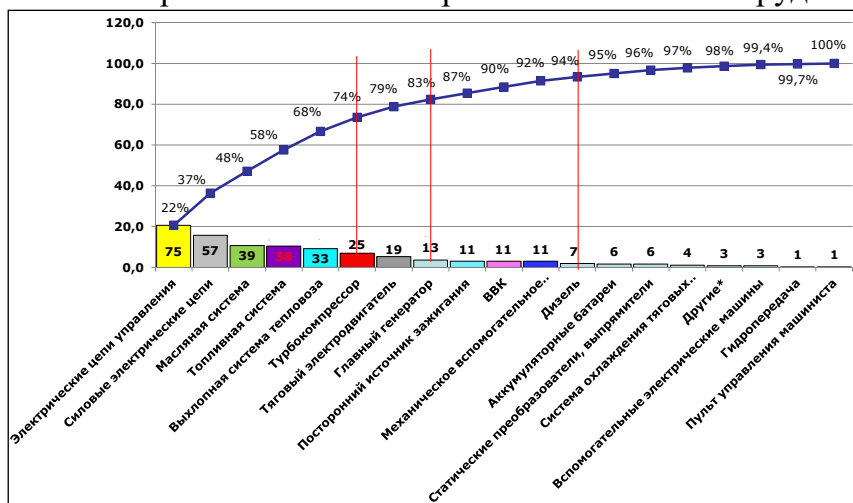


Рис. 2. Причины (узлы) возникновения пожаров на тепловозах

Как видно из рис. 2, 74 % от общего числа пожаров вызвано 3 значимыми факторами (отказом узлов): дизельный двигатель (топливная система, масляная система, выхлопная система, турбокомпрессор) – 37 %; электрические цепи управления – 22 %; силовые электрические цепи – 15 %.

Существенными факторами (причинами), влияющими на частоту возникновения пожара на тепловозах (9 % от общего числа пожаров), являются: тяговый электродвигатель – 5 %; главный генератор – 4 %. Следует также отметить, что 83 % от общего количества пожаров вызваны неисправностями 42 % оборудования.

Выявлены серии электровозов, наиболее подверженных пожарам: ВЛ80 в/и – 136 случаев (54 % от общего числа пожаров на электровозах); ВЛ11 в/и – 53 сл. (21 %); ВЛ10 в/и – 33 сл. (13,1 %). На рис. 3 приведена диаграмма Парето ранжирования узлов электровозов, отказ которых стал причиной возникновения пожара.

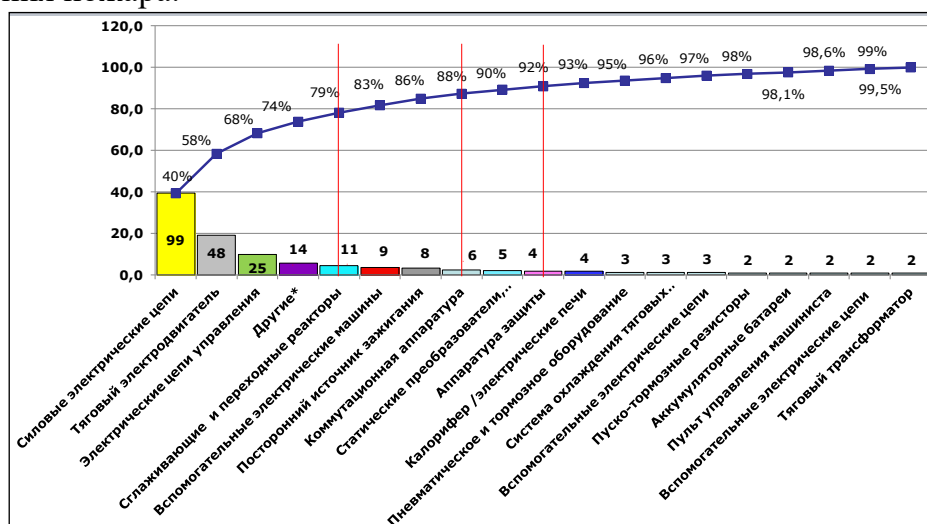


Рис. 3. Причины возникновения пожаров на электровозах

Как видно из рис. 3 значимыми факторами пожара в 79 % случаев от общего числа пожаров на электровозах являются отказы 5 узлов: силовые электрические цепи – 40 %; тяговый электродвигатель – 18 %; электрические цепи управления – 10 %; сглаживающие и переходные реакторы – 6 %; другие причины – 5 %.

Существенными причинами пожара являются 3 узла (фактора пожара): посторонний источник зажигания – 4 %; вспомогательные машины – 3 %; коммутационная аппаратура – 2 %.

С использованием пакета Statgraphics Plus по статистическим данным: количество пожаров k на локомотивах, число оснащённости ob сгоревших локомотивов системами пожарной сигнализации и пожаротушения (СПС и СПП), число неиспользованных nis установок пожаротушения при пожаре среди оснащенных СПС и СПП локомотивов за период времени g с 2012 г. по 2017 г. и 7 мес./ 2018 г. построены регрессионные модели, которые могут быть применены для получения прогнозных значений указанных переменных. Вид регрессии выбирался по наибольшему значению коэффициенту детерминации R^2 , %. Критерии адекватности полученных моделей (R^2 , скорректированный коэффициент детерминации R^2_c , %, среднеквадратическая σ и абсолютная Δ ошибки) приведены в табл. 1

Таблица 1– Критерии адекватности регрессионных моделей

Номер формулы	$R^2, \%$	$R^2_c, \%$	DW	σ	Δ
(1)	95,06	94,07	2,69	5,63	3,84
(2)	95,18	92,78	2,58	3,66	2,43
(3)	97,74	93,21	3,46	2,35	0,93

Динамика пожаров локомотивов описывается линейной моделью (1) и представлена на рис. 4.

$$k = 21067,90 - 10,489g .$$

(1)

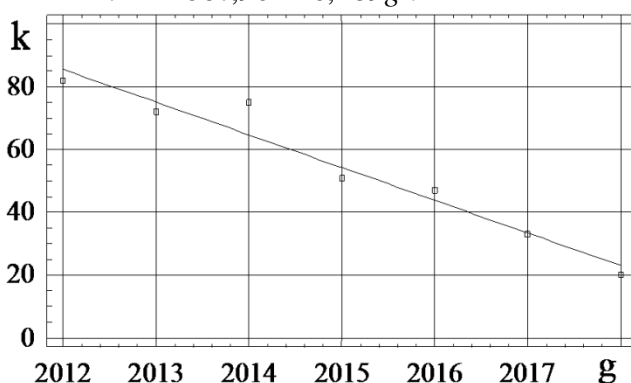


Рис. 4. Динамика пожаров на локомотивах

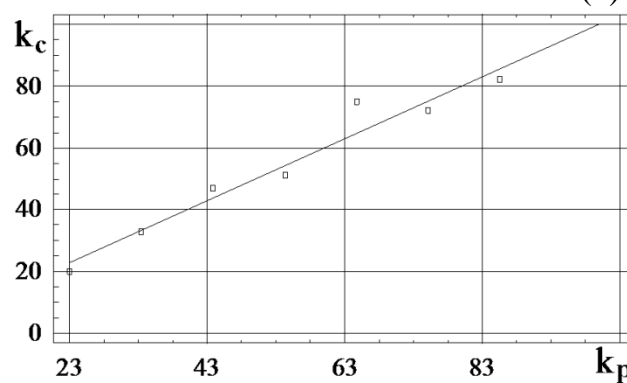


Рис. 5. Сопоставление расчетных k_p и статистических k_c данных

Адекватность найденной регрессии можно оценить по рис. 5, на котором приведены результаты сопоставления расчетных по модели (1) значений k_p со статистическими данными k_c .

Для прогноза числа оснащённых ob сгоревших локомотивов СПС и СПП получена нелинейная модель (2), представленная на рис. 6.

$$ob = 45,132 + 10,301(g - 2012) - 6,369(g - 2012)^{1,5} .$$

(2)

На рис. 7 дано сравнение расчетных по модели (2) значений ob_p со статистическими данными ob_c .

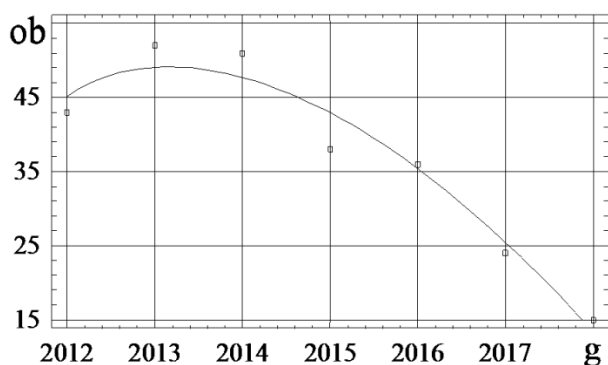


Рис. 6. Динамика оборудования локомотивов системами пожаротушения

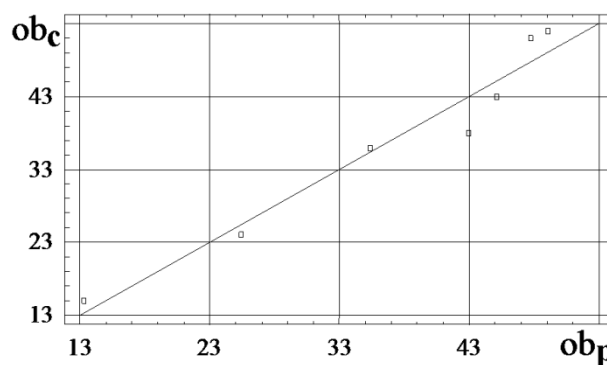


Рис. 7. Сравнение расчетных ob_p и статистических ob_c данных

Для прогноза числа неиспользованных при пожаре установок пожаротушения nis среди оснащенных СПС и СПП локомотивов предлагается нелинейная модель (3), представленная на рис. 8.

$$nis = 17,321 + 41,154(g - 2012) - 33,60(g - 2012)^2 + 8,335(g - 2012)^3 - 0,655(g - 2012)^4 \quad (3)$$

На рис. 9 дано сравнение расчетных по модели (3) значений is_p со статистическими данными is_c .

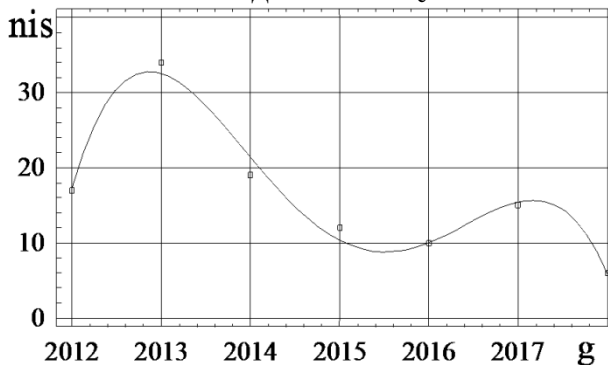


Рис. 8. Динамика неиспользования СПС и СПП при пожаре на локомотивах

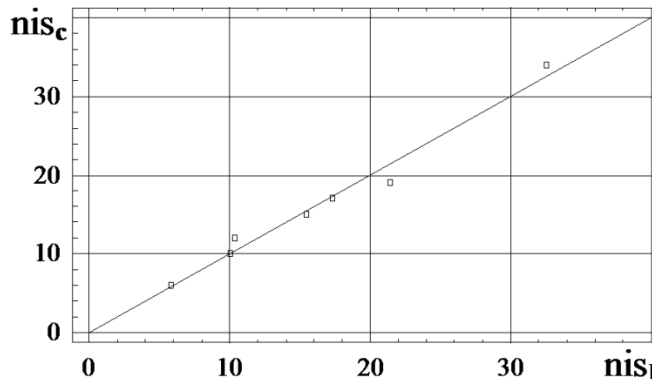


Рис. 9. Сравнение расчетных nis_p и статистических nis_c данных

Заключение.

1. Несмотря на то, что количество пожаров в 2017 г. по сравнению с 2012 г. уменьшилась в 1,5 раза, пожарная безопасность на сети железных дорог России остается неудовлетворительной. Это объясняется как отсутствием у локомотивов СПС и СПП, так и их неиспользованием при пожаре (коэффициент их использования, не превышающая 65,4%).

2. Так как больше 95% статистических данных, описываются найденными уравнениями регрессии, то их можно использовать для прогноза исследованных параметров.

Библиографический список

1. Справочный материал ПКБ – филиала ОАО РЖД «Анализ пожарного состояния локомотивного парка ОАО РЖД». 2018.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК

Н.И. Березовский*, Н.П. Воронова**

*Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, berezovsky@bntu.by

**Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, ifomobntu@bntu.by

Аннотация. Рассматриваются задачи структурного анализа сложных систем. Исследуется обобщенная математическая модель сопряженного тепломассопереноса во влажных капиллярно-пористых материалах, реализованная численными методами. Предлагается усовершенствование процессов на результатах анализа системы.

Ключевые слова: метод управления системами с распределенными параметрами, численные методы.

THE IMPROVEMENT OF INDUSTRIAL PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER ON THE BASIS OF THE ASSESSMENT

N.I. Berezovsky*, N. P. Voronova**

* Belarusian national technical University,
Belarus, Minsk, berezovsky@bntu.by

** Belarusian national technical University,
Belarus, Minsk, ifomobntu@bntu.by

Annotation. The problems of structural analysis of complex systems are considered. A generalized mathematical model of conjugate heat and mass transfer in wet capillary-porous materials, implemented by numerical methods, is investigated. It is proposed to improve the processes based on the results of the system analysis.

Keywords: control method of systems with distributed parameters, numerical methods.

При анализе процессов тепломассопереноса пользуются математическими моделями, пригодными для описания широкого класса реальных сложных систем, которые позволяют построить обзорный математический аппарат для расчета и исследования с опорой на методы моделирования на ЭВМ.

Практические задачи структурного анализа сложных систем разделяют на три уровня [1]: 1) наличие связи; 2) направление передачи сигнала; 3) виды сигналов (входные или управляющие). Методы структурного анализа достаточно широко представлены в специальной литературе: анализ с помощью неориентированных графов [2]; анализ с помощью систем массового обслуживания; анализ на основе марковских процессов и т.д. Предлагается рассмотреть анализ сложных систем методом управления системами с распределенными параметрами.

Процессы сопряженного тепломассопереноса во влажных капиллярно-пористых материалах (сушка торфа) описываются системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} c\rho = \operatorname{div}(\lambda \nabla T), \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 W + a_m^T \nabla^2 T, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} c\rho = \operatorname{div}(\lambda \nabla T), \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 W + a_m^T \nabla^2 T, \end{array} \right. \quad (2)$$

где T – температура; τ – время; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; W – влагосодержание; a_m – коэффициент диффузии влаги; a_m^T – коэффициент термодиффузии влаги.

Наиболее точно отражает физику процесса обезвоживания граничное условие в виде:

$$\nabla U / n = \beta U, \quad (3)$$

где β – коэффициент тепло либо массопереноса для соответствующего значения U ; U/n – значение U на поверхности.

Для достижения требуемого значения распределения U на поверхности (U^*) вводится квадратичный функционал

$$Y_o = \int_0^{\theta_o} (U^* - U)^2 d\theta, \quad (4)$$

где θ_o – глубина обработанного слоя.

Управляющие функции процесса $W(\tau)$ и $T(\tau)$ подчинены ограничениям вида

$$W_{\min}(\tau) \leq W(\tau) \leq W_{\max}(\tau), \quad (5)$$

$$T_{\min}(\tau) \leq T(\tau) \leq T_{\max}(\tau), \quad (6)$$

где $W_{\min}(\tau)$, $W_{\max}(\tau)$, $T_{\min}(\tau)$, $T_{\max}(\tau)$ – функции, заданные на отрезке продолжительности процесса $[0; \tau_o]$.

Задача о наилучшем приближении к заданному распределению формулируется следующим образом [4]: выбрать функции $T(\tau)$ и $W(\tau)$ и продолжительность процесса τ_o такими, чтобы функционал (4) достигал минимума на решениях уравнений (1) – (3) и были выполнены ограничения (5), (6).

Однако, при заданной точности достижения заданного распределения влагосодержания либо температуры U^* представляет интерес задача о выборе режима $W(\tau)$ и $T(\tau)$ такого, чтобы при выполнении ограничений (5), (6) и при заданном значении функционала (4) $Y_o = Y_o^*$ продолжительность процесса τ_o минимальная.

Предложенная методика на примере оптимизации по времени процесса сушки торфа реализована на основе численных методов.

Рассмотрим процесс изменения влагосодержания, описываемый уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D(W) \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad x > 0, t > 0,$$

где W – концентрация влаги в весовых процентах; t – время; x – расстояние от поверхности; $D(W)$ – эффективный коэффициент диффузии.

Предположим, что W_o – начальное содержание влаги, $W_{noe}(t)$ – содержание влаги на поверхности. Пусть заданное в момент окончания процесса распределение влаги в поверхностном слое равно W_{noe}^* при $x = x_o$ и далее линейно спадает до уровня $W_{(x)}^*$, который должен достигаться на заданном расстоянии от поверхности.

Задача состоит в выборе режима $W_{noe}(t)$ таким образом, чтобы в момент окончания процесса выполнялись условия

$$W(t_o, x_o) = W_{noe}^*,$$

$$I_o = \int_0^{x_o} [W_{noe}^*(x) - W(t_o, x)]^2 dx \rightarrow \min$$

за минимальное время.

Ограничим класс выбираемых функций $W_{noe}(t)$ двухступенчатыми функциями вида:

$$W_{noe}(t) = \begin{cases} W_1, & 0 \leq t \leq t_1 \\ W_2, & t_1 \leq t \leq t_o \end{cases}$$

и пусть $W_2 = W_{noe}^*$, тогда оптимальная задача сводится к выбору трех параметров W_1, t_1 и t_o . Введем безразмерные переменные по формулам

$$\begin{cases} \theta = \frac{W(x, t) - W_o}{W_{noe}^* - W_o}, \quad \varphi = \frac{1}{x_o^2} \int_0^t D(\tau) d\tau, \\ \theta_1 = \frac{W_1 - W_o}{W_{noe}^* - W_o}, \quad \eta = \frac{x}{x_o}. \end{cases}$$

В результате решение задачи может быть представлено в компактной форме и краевая задача имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}, \eta > 0, \quad \theta > 0, \\ \theta(0, \eta) = 0, \\ \theta(\varphi, 0) = \begin{cases} \theta_1, & 0 \leq \varphi \leq \varphi_1, \\ 1, & \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_0. \end{cases} \end{cases}$$

Безразмерные параметры φ_0 и φ_1 , соответствуют размерным величинам t_1 и t_0

Постановка задачи в безразмерных координатах предлагает выбрать параметры $\varphi_1, \varphi_0, \theta$ таким образом, чтобы в момент окончания процесса $\varphi = \varphi_0$ было выполнено следующее условие

$$\theta(1, \varphi_0) = \theta^* = \frac{W^* - W_0}{W_{нов}^* - W_0},$$

а функционал

$$I_o = \int_0^1 [\theta^*(\eta) - \theta(\eta, \varphi_0)]^2 d\eta \quad (7)$$

достигает минимума. Функция $\theta^*(\eta)$ задана формулой

$$\theta^*(\eta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \eta \leq \theta, \\ \frac{1-\eta}{1-\nu} + \frac{\eta-\nu}{1-\nu} \theta^*, & \nu < \eta < 1. \end{cases} \quad (8)$$

Решение задачи имеет вид [5]

$$\theta(\eta, \varphi) = 1 - (1 - \theta_1) \Phi\left(\frac{\eta}{2\sqrt{\varphi_2}}\right) - \theta_1 \Phi\left(\frac{\eta}{2\sqrt{\varphi_0}}\right), \quad (9)$$

где $\varphi_2 = \varphi_0 - \varphi_1$, $\Phi(\nu) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\nu e^{-t^2} dt$.

Задача далее сводится к поиску минимума известной функции трех переменных $I_o(\theta_1, \varphi_2, \varphi_0)$, заданной формулами (7), (8) при дополнительном условии (9). Условие (9) позволяет исключить одну из переменных, например, φ_0 . При заданном θ_1 , функция I_o зависит только от одной переменной, поэтому, чтобы данной паре параметров θ_1 и θ^* сопоставить такую пару чисел φ_2 и φ_0 , которая обеспечит выполнение условий (7), (8), достаточно уметь вычислять минимум функций единой переменной $I_o(\varphi_2)$.

Алгоритм решения задачи состоит в следующем: по заданным значениям θ_1 и θ^* , удовлетворяющим условиям $\theta_1 \geq 0, 0 < \theta^* < 1$, уравнение (9) задает жесткую связь между значениями φ_2 и φ_0 или между φ_1 и φ_0 , т.к. $\varphi_0 = \varphi_1 + \varphi_2$. Поэтому при фиксированном значении φ_2 параметр φ_0 определяется однозначно из уравнения (9). Кроме того, это уравнение вводит ограничение сверху для параметра φ_2 . Максимальное значение φ_2 достигается при $\theta_1 = 1$. В этом случае весь процесс протекает в одной зоне при заданном влагосодержании на поверхности. Длительность такого процесса максимальна при повышенном влагосодержании в первой зоне. Естественно, что область допустимых значений параметра φ_2 тогда необходимо задать в виде $0 \leq \varphi_2 \leq \varphi_2 \max$, где φ_2 соответствует однозонному процессу. Определившись с областью допустимых значений

для φ_2 , вычисляем значение φ_0 . На их основе можно вычислить $I_0(\varphi_2, \varphi_0)$ по формулам (7), (8). Далее осуществляется поиск минимума функции $I_0(\varphi_2)$.

Интеграл (7) может быть вычислен, например, методом Гаусса. Решение трансцендентного уравнения (9) можно осуществить методом Ньютона. В результате предложенный алгоритм обеспечит точность расчета порядка 10^{-4} . По заданным значениям рассчитываются значения φ_2 и φ_0 , при которых минимизируется величина I_0 и выполняется условие (8). Всюду в расчетах коэффициент D принимается в виде, полученном в соответствии с методикой, изложенной в [4] для торфа.

$$D(W) = -0,0421 \cdot W^2 - 0,0987 \cdot W + 2,0357.$$

Оптимальное время пребывания в каждой из зон вычисляется по формулам

$$t_1 = \frac{\varphi_1 x_0^2}{D_1}, t_2 = \frac{\varphi_2 x_0^2}{D_2},$$

Методы расчета, учитывающие кинетику сушки материала, в идеальном случае должны основываться на аналитическом решении системы дифференциальных уравнений переноса тепла и влаги во влажных материалах. Однако даже при таких расчетах из-за сложности процессов, протекающих при сушке, получаются приближенные результаты. Основные технические данные труб-сушилок (пневмогазовых и барабанных паротрубчатых), необходимы для расчета материально-теплового баланса, удельных энергозатрат при сушке и для создания систем автоматического регулирования процессом сушки.

Одной из проблем внедрения автоматического управления сушилками на брикетных заводах является отсутствие надежного математического обеспечения систем автоматического управления процессом сушки. Известные статистические модели имеют невысокую надежность из-за своей эмпиричности, справедливы лишь для конкретных условий проведения исследований и только для определенных сушилок.

Предложенная в работе технология сушки торфа, основанная на математическом моделировании процессов обезвоживания и дальнейшим определением оптимального времени процесса внедрена на ПРУТП "Усяж" и ПРУТП "Слуцкое".

Разработанная математическая модель может служить базовой для экспертной оценки сложных систем на базе процессов тепломассопереноса и способствовать совершенствованию промышленных процессов в плане их оптимизации по энерго- и ресурсосбережению.

Библиографический список

1. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Гурьева Л.В. Оптимизация теплообменных процессов и систем. М.: Энергоатомиздат. 1988. 192 с.
2. Дорохов И.Н., Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Экспертные системы для совершенствования промышленных процессов гетерогенного катализа. М.: Наука. 1989. 376 с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия. 1978. 480 с.
4. Воронова Н.П. Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки: монография. Минск: БНТУ. 2006. 86 с.
5. Воронова Н.П. Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств: монография. Минск: БНТУ. 2009. 260 с.

ПОИСК КРАТЧАЙШЕЙ ТРАЕКТОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХГРАННЫХ ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ФЛОЙДА-УОРШЕЛЛА

Ю.В. Полозков*, Д.А. Волков*, Т.Э. Шульга**

** Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, yuvpolozkov@bntu.by*

*** Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, taiss@yandex.ru*

Аннотация. Описан алгоритм поиска кратчайшей траектории формообразования четырехгранных ячеистых структур с использованием алгоритма Флойда-Уоршелла. Рассмотрены примеры работы этого алгоритма. Описаны особенности формирования прямолинейных и хаотических траекторий.

Ключевые слова: ячеистые структуры, легковесные детали, оптимизация, графы, алгоритм Флойда-Уоршелла.

SEARCH OF THE SHORTEST TRAJECTORY FORMING FOR TETRAHEDRAL CELLULAR STRUCTURES BASED ON THE FLOYD-WARSHALL ALGORITHM

Yu.V. Polozkov*, D.A. Volkov*, T.E. Shulga**

** Belarusian National Technical University,
Belarus, Minsk, yuvpolozkov@bntu.by*

*** Yuri Gagarin state technical university of Saratov,
Saratov, Russia, taiss@yandex.ru*

Abstract. The algorithm for finding of shortest trajectory forming for tetrahedral cellular structures using the Floyd-Worshell algorithm is described. Examples of this algorithm are considered. The peculiarities of the formation of straight and chaotic trajectories are described.

Keywords: Cellular Structures, Lightweight, Optimization, Graphs, Floyd-Worshell Algorithm.

В развитии аддитивных технологий важной задачей является снижение материалоемкости деталей [1-3]. Одним из наиболее эффективных путей решения этой задачи является замещение монолитных деталей «легковесными», в теле которых создаются полые области – ячейки. Среди систем, реализующих аддитивные технологии, широкое распространение получили струйные 3D принтеры. Принцип их работы заключается в создании детали послойным нанесением расплавленного материала из движущейся экструзионной головки. Перемещение непосредственно экструзионной головки или ее перемещение, согласованное с движением рабочего стола, определяет форму будущей детали. При изготовлении деталей, имеющих множество ячеек (ячеистых структур), движение формообразующей экструзионной головки 3D принтера, соответствующее возвратно-поступательному перемещению будет наименее эффективным. Это обусловлено значительной долей холостых ходов, выполняемых при создании пустотелых полостей ячеек, т.е. перемещений головки без нанесения материала. Повысить эффективность аддитивного изготовления возможно поиском кратчайшей сложной траектории перемещения формообразующей головки из множества траекторий, которые могут быть построены в зависимости от формы ячеек, их взаимного расположения, а также расположения ячеек относительно конструктивных элементов детали. Поэтому поиск кратчайшей траектории движения формообразующей экструзионной головки 3D принтера при послойном изготовлении деталей, включающей максимальное количество и длину рабочих перемещений при минимизации холостых ходов является актуальной задачей в решении комплексной проблемы оптимизации формообразования легковесных деталей с ячеистыми структурами [3].

Для решения задачи по расчету кратчайшей траектории формообразования в качестве тестового примера взята деталь со структурами, состоящими из

четырёхгранных ячеек (рис. 1). Ячеистую структуру предлагается представить в виде графа, где в качестве узлов выступают вершины многоугольников, задающих форму ячеек, а в качестве ребер – стороны этих многоугольников. Тогда решение задачи сводится к поиску кратчайшего пути прохода всех ребер графа.

Рассматривая способы решения поставленной задачи можно отметить, что для расчёта всех кратчайших путей в плотных графах, когда имеет место большое количество пар ребер между парами вершин, эффективным является алгоритм Флойда-Уоршелла. В случае разреженных графов с рёбрами неотрицательного веса лучшим

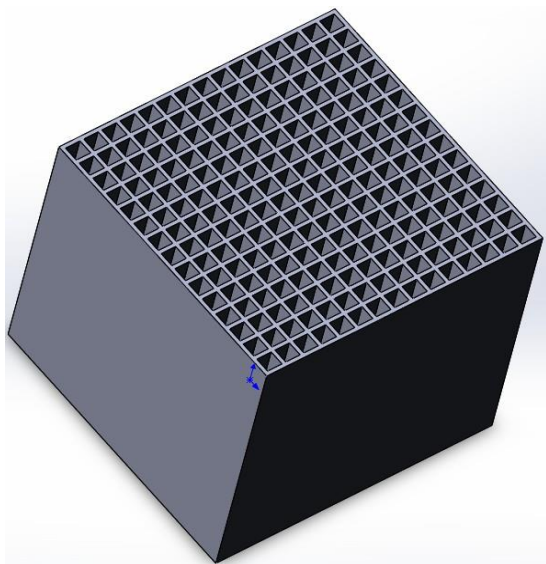


Рис. 1. Тестовая деталь для расчета оптимальной траектории формообразования

выбором считается использование алгоритма Дейкстры для каждого возможного узла. Если граф разрежен, у него имеются рёбра с отрицательным весом и отсутствуют циклы с отрицательным суммарным весом, то используется алгоритм Джонсона, который имеет аналогичную сложность, что и вариант с алгоритмом Дейкстры [4]. Из-за того, что решение задачи заключается в поиске кратчайшего пути прохода всех ребер плотного графа, целесообразно применить алгоритм Флойда-Уоршелла, используемый в ситуациях, когда необходимо найти ближайшее не пройденное ребро от текущей вершины.

В основе алгоритма Флойда-Уоршелла содержится достаточно простое динамическое программирование (ДП): пусть $dp[i][j][k]$ – длина кратчайшего пути между вершинами i и j , проходящего только через промежуточные вершины $\{0, 1, \dots, k\}$ (i и j не считаются). Требуется пересчитать путь при увеличении k : необходимо улучшить длину пути между i и j при увеличении k на 1. Есть два варианта: не использовать вершину $k+1$ (тогда $dp[i][j][k+1] = dp[i][j][k]$), или использовать, пройдя через неё. Утверждается, что кратчайший путь из i в $k+1$ и из $k+1$ в j получается объединением кратчайших путей из i в $k+1$ и из $k+1$ в j (используя промежуточные вершины до k , так как $k+1$ уже не является промежуточной). Тогда $dp[i][j][k+1] = dp[i][k+1][k] + dp[k+1][j][k]$. Для улучшения любого пути нужны только предыдущие значения длин путей для $k-1$, откинув последнее измерение (k) в массиве, принимается $dp[i][j]$ – текущая минимальная длина пути из i в j , которая постепенно улучшается [5].

В начальных значениях для ДП, кратчайший путь из каждой вершины в саму себя равен 0: $dp[i][i] = 0$; кратчайший путь между двумя вершинами, между которыми есть ребро равен его длине: $dp[i][j] = len(i, j)$; а кратчайший путь между всеми остальными парами вершин равен бесконечности: $dp[i][j] = \infty$. Начальные значения не используют никаких промежуточных вершин, поэтому алгоритм начинается с $k = 0$ [5].

Алгоритм нахождения оптимальной траектории формообразования четырехгранных ячеистых структур заключается в выполнении следующих основных шагов (рис. 2):

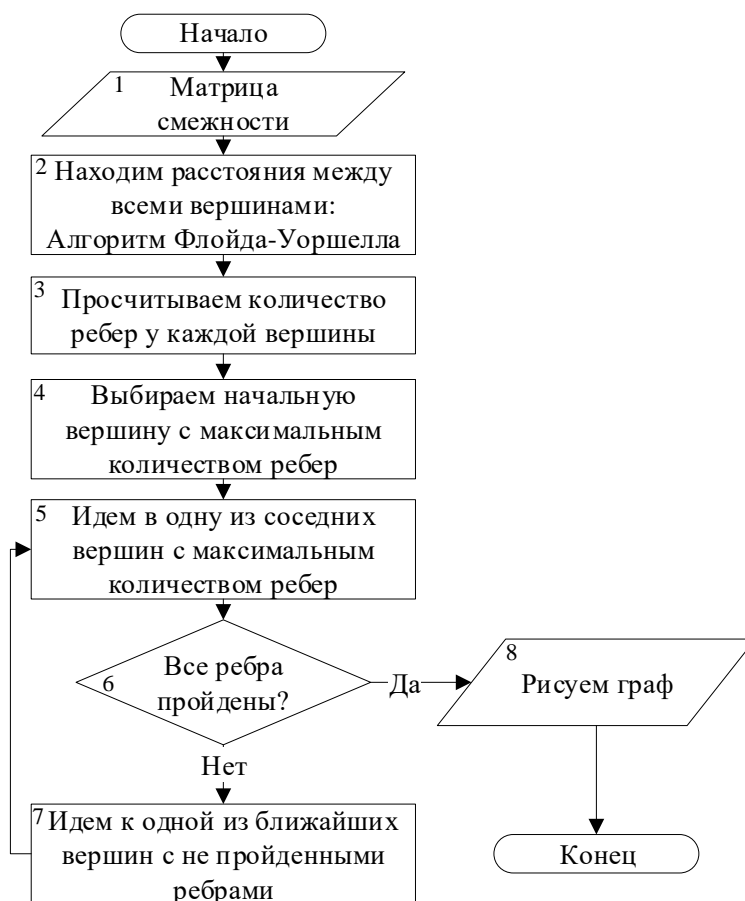


Рис. 2. Общий алгоритм процесса расчета оптимальной траектории

Шаг 1. Генерация или считывание матрицы смежности из текстового файла. Матрицей смежности $A = \|\alpha_{i,j}\|$ взвешенного графа $G = (V, E)$ называется матрица $A_{[V \times V]}$, в которой $\alpha_{i,j}$ – вес ребра, соединяющего вершины v_i и v_j [6].

Шаг 2. Расчёт расстояний между всеми вершинами графа с помощью алгоритма Флойда-Уоршелла.

Шаг 3. Расчёт количества ребер у каждой вершины графа.

Шаг 4. Выбор начальной вершины с максимальным количеством ребер.

Шаг 5. Произвольный выбор соседней вершины с максимальным количеством ребер.

Шаг 6. Проверка: все ребра в графе пройдены?

Шаг 7. Переход к произвольно выбранной ближайшей вершине с не пройденными ребрами.

Шаг 8. Пошаговое рисование пути прохождения на графе.

Учитывая технологические особенности аддитивного изготовления, допускающие возможность существования холостых перемещений, а также повторный переход в вершины многоугольников (узлы графа), для сходимости алгоритма расчета кратчайшего пути было введено ограничение по относительной суммарной длине холостых ходов. Эту длину в процентах можно указать в настройках программы. Также в настройках вводится количество итераций, размерность матрицы и тип расчета траектории: «прямолинейный» (рис. 3) или «хаотичный» (рис. 4). Для расчета абсолютной длины траектории указывается длина ребра в мм. Результат работы можно сохранять в файл и считывать из файла. При необходимости, в соответствие с размерами рассматриваемых ячеистых структур, можно сгенерировать матрицу любого размера.

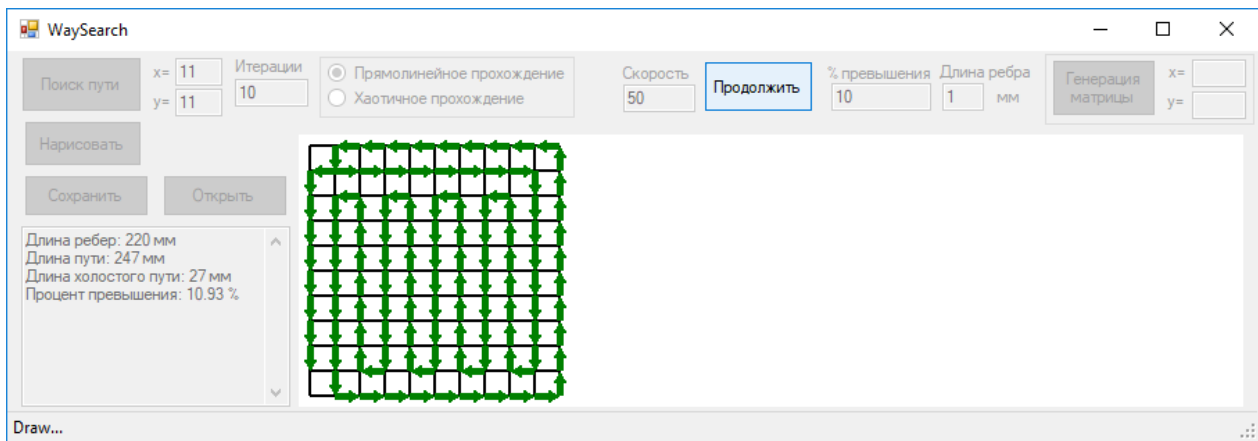


Рис. 3. Пример прямолинейной траектории формообразования

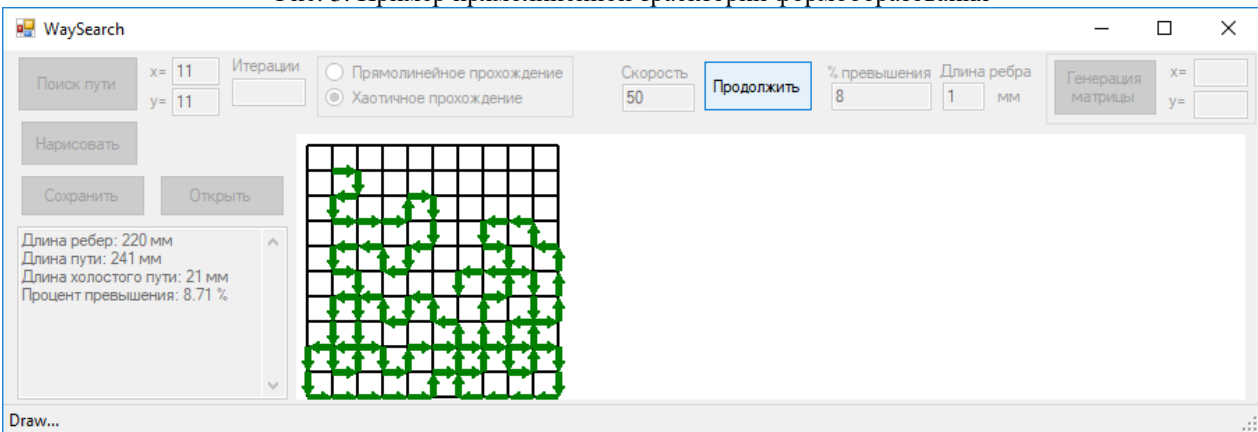


Рис. 4. Пример хаотичной траектории формообразования

В результате работы алгоритма выводятся следующие данные: длина пути, длина холостого пути, процент холостого пути, а также визуальное представление траектории печати. Красным цветом обозначены ребра, которые проходились повторно (рис. 5).

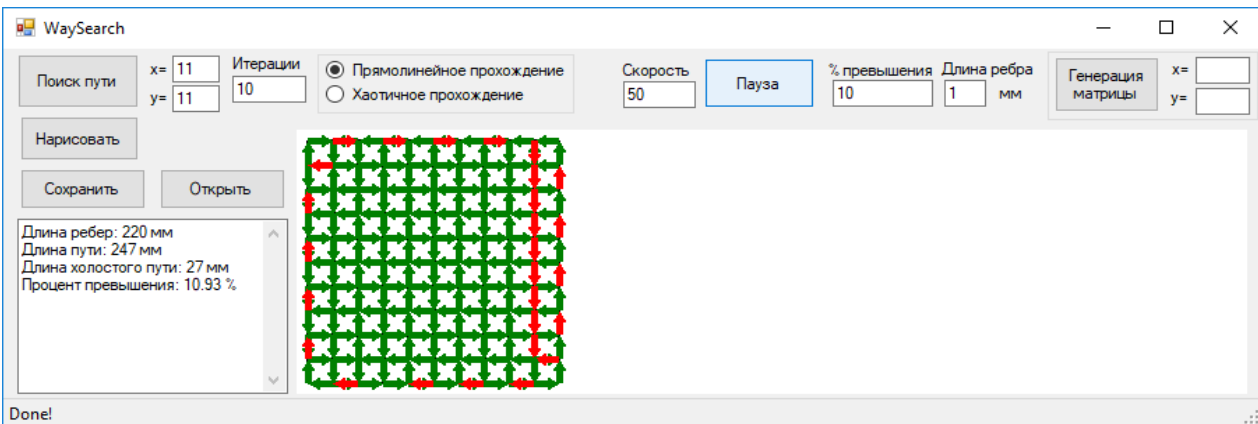


Рис. 5. Результат работы программы

Для поиска кратчайшего пути используются два вида расчета траектории:

1. «Прямолинейный», при выполнении которого печатающая головка проходит деталь в основном по прямым линиям (рис. 3). Особенность этого алгоритма заключается в малом количестве итераций: оптимальный путь находится обычно за 10-20 итераций, и чем больше количество ячеек в изделии, тем меньше будет процент холостого пути. Этот вид траектории подойдет для деталей с относительно большим количеством ячеек. На рис. 6 представлена зависимость процента холостого пути от размерности графа: чем больше граф, тем меньше процент холостого пути.

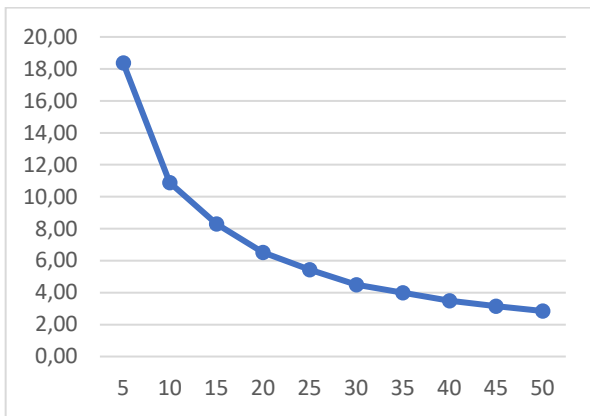


Рис. 6. График процента холостого пути от размерности графа

2. «Хаотичный», при котором печатающая головка почти после каждого прохода ребра изменяет направление перемещения (рис. 4). Для получения результата алгоритму необходимо большое количество итераций (1000 – 10000). При этом, как показали исследования, количество холостых переходов во многих случаях в малых графах будет меньше по сравнению с прямолинейным расчетом. Учитывая то, что для смены направления печати принтер затратит некоторое дополнительное время,

а также возможные погрешности в получении требуемой геометрической формы ячеек при таком режиме работы, можно заключить, что этот вид траектории более эффективен для деталей с меньшим количеством ячеек и ячеек большего размера.

В заключении следует отметить, что найденный в результате расчетов кратчайший путь, выступающий в качестве траектории формообразования ячеистых структур, представляет совокупность дискретных траекторий, которые связываются в вершинах ячеек, с повторным заходом. Эти вершины технологически представляют стыки материала. Для обеспечения монолитности в местах стыков материала разработанный алгоритм необходимо дополнить управляющим параметром, учитывающим временной интервал затвердевания материала. Кроме того, разработанный алгоритм применим для случая изготовления ячеистых структур с толщиной стенки, равной толщине материала. Во многих случаях для обеспечения требуемых физико-технических свойств деталей необходимо создание ячеистых структур с толщиной стенок между ячейками, превышающей толщину формообразующего материала. Поэтому перспективные исследования также связываются с пересмотром традиционного способа построения графа и матрицы смежности для ячеистых структур с учетом возможных перемещений экструзионной головки и рабочего стола, т.е. с учетом особенностей различных конструктивных схем 3D принтеров. Таким образом, представленный алгоритм поиска кратчайшей траектории формообразования ячеистых структур составляет основу в решении комплексной проблемы оптимизации изготовления легковесных деталей, направленной на повышение производительности и эффективности аддитивного производства.

Библиографический список

1. Review: The 11th AM and 3D Printing Conference 2016// TCT + Personalize. 2016. URL: <http://www.tctmagazine.com/3D-printing-news/additive-manufacturing-3d-printing-conference-review/>. (Date of access : 11.08.2016).
2. Materials, Design And Manufacturing For Lightweight Vehicles / Edited by P. K. Mallick.: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC. 2010. 384 p.
3. Полозков Ю.В. Проблемы проектирования и формообразования легковесных деталей в аддитивном производстве // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф., Минск, 10 – 12 октября 2017 г. / СПб.: Изд-во Политехн. ун-та ; под общ. ред. А. А. Большакова. Минск. 2017. Т. 10. С. 61 – 65.
4. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика. М. : МГТУ. 2006. 744 с.
5. Алгоритм Флойда-Уоршелла // Brestprog. URL:<http://brestprog.by/topics/floyd/> (дата обращения: 07.07.2018).
6. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms / Под ред. И. В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс. 2005. 1296 с.

О РЕАЛИЗАЦИИ МОДУЛЯ TIN CAN API В LEARNING MANAGEMENT SYSTEM

В.С. Игнатюк*, Ю.Б. Попова**

* Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, veronica.ignatyuk@gmail.com

** Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, julia_popova@mail.ru

Аннотация. Исследована спецификация Tin Can Api и возможность миграции контента в Learning Management System. Разработан программный модуль внутри Learning Management System CATS (Care About The Students) для загрузки Tin Can Api контента и запуска учебных материалов. Для корректной работы системы необходима ссылка на Learning Record Store и соответствующий аккаунт.

Ключевые слова: система дистанционного обучения, Learning Management System, LMS CATS, спецификация Tin Can Api, учебный контент, Learning Record Store.

ON THE IMPLEMENTATION OF THE TIN CAN API MODULE IN THE LEARNING MANAGEMENT SYSTEM

V.S. Ignatyuk*, U.B. Popova**

* *Belarussian National Technical University,*
Belarus, Minsk, veronica.ignatyuk@gmail.com

* *Belarussian National Technical University,*
Belarus, Minsk, julia_popova@mail.ru

Abstract. Tin Can Api specification and the ability to migrate content to the Learning Management System are explored. A software module was developed inside the Learning Management System called CATS (Care About The Students) to download Tin Can Api content and launch training materials. For the system to work correctly, you need a link to the Learning Record Store and the corresponding account.

Keywords: distance learning system, Learning Management System, LMS CATS, Tin Can Api specification, learning content, Learning Record Store.

В настоящее широкое распространение и популярность получают системы дистанционного обучения или LMS (англ., Learning Management System). Подробное описание и классификация таких систем приведена в [1]. Следует отметить, что основной проблемой использования LMS является сложность миграции контента. Системы разработаны разными производителями с отличающимися требованиями к организации и хранению учебно-методических материалов, тестов, отчетов и т.д. Например, созданные в одной системе тесты, не могут быть использованы в другой системе без дополнительных трудозатрат. Поэтому для унификации создаваемого контента необходим стандарт, т.е. формат контента, утвержденный признанным институтом стандартизации или принятый предприятиями отрасли де-факто в качестве образца. Долгое время таким стандартом считался SCORM (англ., Sharable Content Object Reference Model) [2], однако с развитием мобильного обучения, игр, симуляции и т.д. возникла необходимость в разработке нового стандарта, который получил название TIN CAN API.

На кафедре «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Белорусского национального технического университета разработана и используется LMS, получившая название CATS (Care About The Students) [3]. Система позволяет студентам использовать контент, созданный по стандарту SCORM. Принимая во внимание современные тенденции миграции контента, принято решение о разработке программного модуля для стандарта TIN CAN API.

Причем, TIN CAN API — это спецификация программ в сфере дистанционного обучения. Она позволяет обучающим системам взаимодействовать на основе отслеживания и записи учебных занятий всех видов [4]. Информация об учебной

деятельности сохраняется в специальную базу данных, которая называется хранилищем учебных записей (англ., learning record store, LRS). LRS может являться как частью систем управления обучением, так и быть самостоятельной системой. Таким образом, в центре обучения – LRS, которая управляет различными видами систем, позволяющих обучаться. Структурная схема этого типа систем приведена на рис. 1.

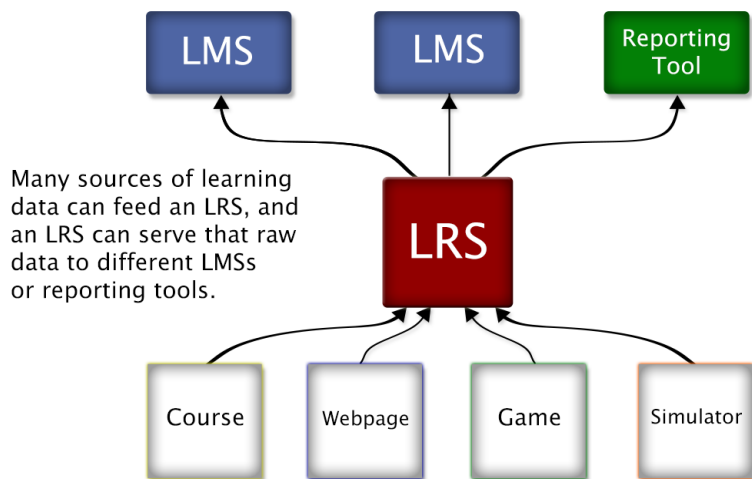


Рис. 1. Структурная схема TIN CAN API [4]

Стандарт TIN CAN API позволяет обеспечить многократное использование и совместимость учебного контента. Совместимость поддерживается благодаря представлению материала в виде отдельных небольших блоков и независимо от того, с помощью каких средств этот учебный контент создан.

Для перехода к программному модулю TinCanApi необходимо выбрать соответствующий пункт в главном меню LMS CATS.

В результате появится список загруженных учебных курсов стандарта TIN CAN API, как изображено на рис. 2. Иконки справа от названий курсов дают возможности просмотреть курс, открыть доступ к нему для обучающихся, отредактировать его название либо удалить курс из системы.

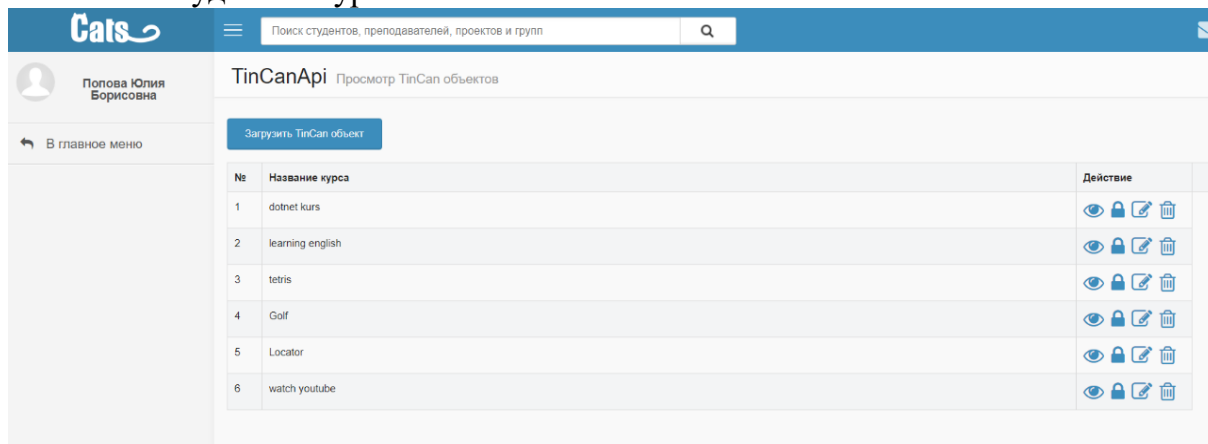


Рис. 2. Список загруженных TIN CAN уроков в LMS CATS


Для добавления нового курса необходимо нажать на кнопку «Загрузить TinCan объект» и в диалоговом окне выбрать zip-архив. Для того, чтобы успешно загрузить архив, в нем должен присутствовать файл tincan.xml с информацией о системе и о входной точке «<launch lang="en-us">index.html</launch>». При этом с клиентской части модуля будет отправлен запрос:

```
POST http://localhost/LMPlatform.UI/TinCanMod/LoadObject HTTP/1.1
Host: localhost
Connection: keep-alive
Content-Length: 64262
Accept: */*
Origin: http://localhost
X-Requested-With: XMLHttpRequest
```

User-Agent: Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/69.0.3497.100 Safari/537.36
 Content-Type: multipart/form-data; boundary=----WebKitFormBoundaryIAAaaJhoVSFumquJ
 Referer: http://localhost/LMPlatform.UI/TinCanMod
 Accept-Encoding: gzip, deflate, br
 Accept-Language: ru-RU,ru;q=0.9,en-US;q=0.8,en;q=0.7

Запрос будет получен серверной частью программного модуля и далее обработан методом LoadObject контроллера TinCanApiController:

```
public ActionResult LoadObject(string name, HttpPostedFileBase file)
{
    var guid = Guid.NewGuid().ToString();
    file.SaveAs(TinCanFilePath + "\\" + guid + ".zip");
    using (ZipFile zip = ZipFile.Read(TinCanFilePath + "\\" + guid + ".zip"))
    {
        Directory.CreateDirectory(TinCanFilePath + "\\" + guid);
        zip.ExtractAll(TinCanFilePath + "\\" + guid, ExtractExistingFileAction.OverwriteSilently);
    }
    if (!System.IO.File.Exists(TinCanFilePath + "\\" + guid + "\\tincan.xml"))
    {
        return Json(new
        {
            error = "Загруженный файл не является объектом TinCanApi"
        });
    }
    System.IO.File.Delete(TinCanFilePath + "\\" + guid + ".zip");
    using (var repositoriesContainer = new LmPlatformRepositoriesContainer())
    {
        repositoriesContainer.RepositoryFor<TinCanObjects>().Save(new TinCanObjects()
        {
            Name = name,
            Path = guid,
            Enabled = false,
            IsDeleted = false
        });
        repositoriesContainer.ApplyChanges();
    }
    return Json(name, JsonRequestBehavior.AllowGet);
}
```

После того, как файл успешно загружен, его можно просматривать, изменять, удалять и делать недоступным. Для запуска одного из обучающих курсов необходимо нажать на иконку «» рядом с соответствующим курсом. Затем вызовется функция \$scope.viewTinCan из модуля Angular, которая отправит запрос на серверную сторону:

```
$scope.viewTinCan = function (object) {
    $scope.viewTinCanClient = true;
    $scope.viewTinCanObject = object;
    $("#TinCanNameView").text(object.StatementJson);
    $.ajax({
        type: 'GET',
        url: "/LMPlatform.UI/TinCanMod/ViewTinCan?id=" + object.Id,
        dataType: "json",
        contentType: "application/json",

    }).success(function (data, status) {
        $scope.$apply(function () {
            $scope.treeActivity = data;
            $scope.frameLoad(data);
        });
    });
};
```

Функция ViewTinCan контроллера TinCanApiController вернет путь к папке:

```
public ActionResult ViewTinCan(int id)
{
    using (var repositoriesContainer = new LmPlatformRepositoriesContainer())
    {
        var data = repositoriesContainer.RepositoryFor<TinCanObjects>().GetBy(new
        Query<TinCanObjects>(e => e.Id == id));
    }
}
```

```

var tincanPath = TinCanFilePath + "/" + data.Path + "/" + "tincan.xml";
var dirName = new FileInfo(TinCanFilePath).Directory.Name;
XDocument xdoc = XDocument.Load(tincanPath);
var name = dirName + "/" + data.Path + "/" + xdoc.Descendants(XName.Get("launch",
@"http://projecttincan.com/tincan.xsd")).First().Value;
return Json(name, JsonRequestBehavior.AllowGet);
}}

```

После этого вызовется функция `$scope.viewTinCan` из Angular модуля, которая загрузит непосредственно курс в LMS:

```

$scope.frameLoad = function (urlRes) {
    $scope.urlServiceCore = "/LMPlatform.UI/" + urlRes + "?"
        + "endpoint=" + $window.encodeURIComponent($scope.endpoint)
        + "&auth=" + $window.encodeURIComponent($scope.auth)
        + "&actor=" + $window.encodeURIComponent(JSON.stringify($scope.actor));
    document.getElementById('TinCan').src = document.getElementById('TinCan').src;
};

```

На рис. 3 изображен запущенный курс обучения игре в гольф, который удалось импортировать по стандарту TIN CAN API в LMS CATS.

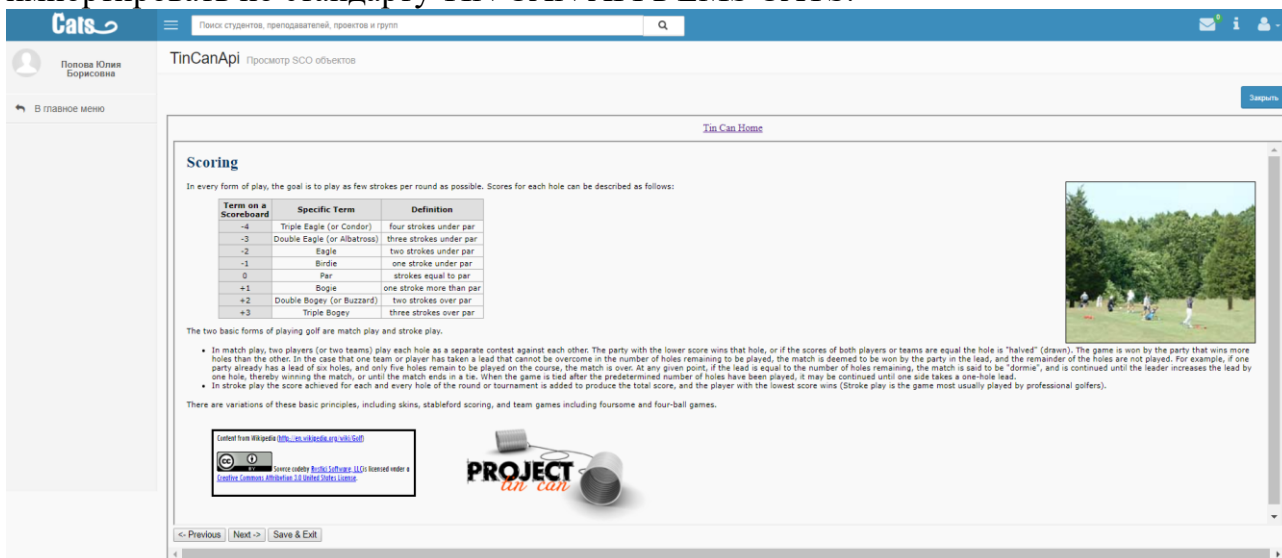


Рис. 3. Результат запуска учебного курса игры в гольф в LMS CATS

В результате исследования получен вывод, что миграция контента по стандарту TIN CAN API возможна. Предложена архитектура программного модуля и выполнена его реализация для LMS CATS.

Библиографический список

1. Попова Ю.Б. Классификация автоматизированных систем управления обучением // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. №2. С. 51–58.
2. Попова Ю.Б., Яцынович С.В. Программная реализация миграции контента по стандарту SCORM в системе управления обучением // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. №2. С. 87–96.
3. Попова Ю.Б. Функциональные возможности автоматизированной системы управления обучением CATS (Care About The Students) // Информатизация образования и методика электронного обучения: материалы II Междунар. науч. конф. в 2 ч. Ч. 1 / под общ. ред. М.В. Носкова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2018. С. 232–236.
4. Experience API / What is the Experience API? URL: <https://tincanapi.com/overview/> (дата обращения: 17.10.2017).
5. LearnUpOn [Электронный ресурс] / Tin Can API vs SCORM: which should you choose? URL: <https://www.learnupon.com/tin-can-api-vs-scorm/> (дата обращения: 17.10.2017).
6. Miller, B. Anatomy of a Tin Can API Statement / B. Miller. 2013. 89 p.
7. Игнатюк В.С., Попова Ю.Б. Возможности стандарта Tin Can API // Результаты V Международной научно-технической Интернет-конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве» URL: <http://www.bntu.by/images/stories/mido/ntik5/ignatyuk1.pdf> (дата обращения: 01.10.2018).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХМЕРНОГО ОБЪЕКТА

С.С. Довнар*, Н.Н. Гурский, Ю.А. Скудняков*****

* *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, dovser94@gmail.com*

** *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, ngursky@bntu.by*

*** *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Беларусь, Минск, juri_alex@tut.by*

Аннотация. Рассмотрен алгоритм сопоставления изображений, его достоинства и недостатки. Написанное программное обеспечение реализует предложенный алгоритм и в дополнении к нему процесс построения образа исходного объекта в трехмерном пространстве.

Ключевые слова: компьютерное зрение, гоммография, программные средства; реконструкция, облако точек.

SOFTWARE RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECT

S.S. Dovnar *, N.N. Gursky **, Yu.A. Skudnyakov ***

* *Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, dovser94@gmail.com*

** *Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus, ngursky@bntu.by*

*** *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus, juri_alex@tut.by*

Annotation. The algorithm for comparing images among themselves, its pros and cons. The software implements this algorithm and, in addition to it, the process of building the image of the original object in three-dimensional space.

Keywords: computer vision, hommography, software; reconstruction, point cloud.

Введение. В настоящее время в системах обработки информации широко применяются алгоритмы из теории компьютерного зрения. Основные задачи, рассматриваемые в теории, анализе изображений следующие: обнаружение, распознавание, отслеживание и классификация объектов [1].

Изучение компьютерного зрения проводится с 1960-х годов, а широкая распространенность задач, связанных с анализом изображений, и принципиальные сложности в разработке алгоритмов с течением времени только увеличивают количество публикаций и исследований в этой области.

Обработка изображений или анализ изображений [2], в основном сосредоточены на работе с двумерными изображениями, т.е., как преобразовать одно изображение в другое. Например, попиксельные операции увеличения контрастности, операции по выделению краёв, устранению шумов или геометрические преобразования, такие как аффинные преобразования. Эти операции предполагают, что обработка/анализ изображения действуют независимо от содержания изображений.

Компьютерное зрение связано с обработкой трехмерных сцен, спроектированных на одно или несколько изображений. Например, на восстановлении структуры или другой информации о трехмерной сцене по одному или нескольким изображениям. Компьютерное зрение часто зависит от определенных, достаточно сложных допущений относительно того, что представлено на изображениях.

В настоящей статье исследуются возможности использования компьютерного зрения для реконструкции трехмерных сцен.

Методы обработки. Для сопоставления изображений в работе используется метод выделения некоторых особых (ключевых) точек и их сравнения [3]. Можно

утверждать, что заменяется изображение некоторой моделью – набором его ключевых точек. Отметим, что особой называется точка изображенного объекта, которая с большой долей вероятности находится на другом изображении этого объекта. Детектором называется метод извлечения ключевых точек из изображения. Детектор должен обеспечивать инвариантность нахождения одних особых точек относительно преобразований изображений.

Поэтому получается следующая схема решения задачи сопоставления изображений: на изображениях выделяются ключевые точки и их дескрипторы; по совпадению дескрипторов выделяются соответствующие ключевые точки; на основе набора совпавших ключевых точек строится модель преобразования изображений, с использованием которой из одного изображения можно получить другое.

Основным моментом в детектировании особых точек является построение пирамиды гауссианов (Gaussian) и разностей гауссианов (Difference of Gaussian, DoG). Гауссианом (или изображением, размытым гауссовым фильтром) является изображение:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y). \quad (1)$$

где L – значение гауссиана в точке с координатами (x, y) , σ – радиус размытия, G – гауссово ядро, I – значение исходного изображения, $*$ – операция свертки.

Запишем выражение, определяющее разность гауссианов как изображение, полученное на основе попиксельного вычитания одного гауссиана исходного изображения из гауссиана с другим радиусом размытия:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \quad (2)$$

Масштабируемым пространством изображения является набор всевозможных, сглаженных некоторым фильтром, версий исходного изображения. Гауссово масштабируемое пространство является линейным, инвариантным относительно сдвигов, вращений, масштаба, не смещающим локальные экстремумы, и обладает свойством полугрупп. Важно, что различная степень размытия изображения гауссовым фильтром может быть принята за исходное изображение, взятое в некотором масштабе. В общем, инвариантность относительно масштаба достигается определением ключевых точек для исходного изображения, взятого в разных масштабах. Для этого строится пирамида гауссианов: все масштабируемое пространство разбивается на некоторые участки — октавы, причем часть масштабируемого пространства, занимаемого следующей октавой, в два раза больше части, занимаемой предыдущей. При переходе от одной октавы к другой делается ресэмплинг изображения, его размеры уменьшаются вдвое. Каждая октава охватывает бесконечное множество гауссианов изображения, поэтому строится только некоторое их количество N , с определенным шагом по радиусу размытия. С тем же шагом достраиваются два дополнительных гауссиана (всего получается $N+2$), выходящие за пределы октавы. Масштаб первого изображения следующей октавы равен масштабу изображения из предыдущей октавы с номером N . Параллельно с построением пирамиды гауссианов строится пирамида разностей гауссианов, состоящая из разностей соседних изображений в пирамиде гауссианов. Соответственно, количество изображений в этой пирамиде равен $N+1$.

В компьютерном зрении любые два изображения одного плоского объекта в пространстве связаны гомографией, если используется *pin-hole* модель камеры. Таким образом, это преобразование плоскость — плоскость, т.е., имея набор точек на целевом объекте и сопоставленный ему набор точек в сцене, можно найти между ними соответствие в виде матрицы гомографии H и наоборот, соответственно. В основе этого преобразования содержится алгоритм, использующий итеративную оценку гомографии для случайно выбранных точек (4 на изображении и 4 в сцене).

Программная реализация. При подготовке разработано программное обеспечение, которое взаимодействует с камерой, либо набором изображений, строит множество точек, соответствующее особым точкам на изображениях. Схема работы программного обеспечения представлена на рис. 1.

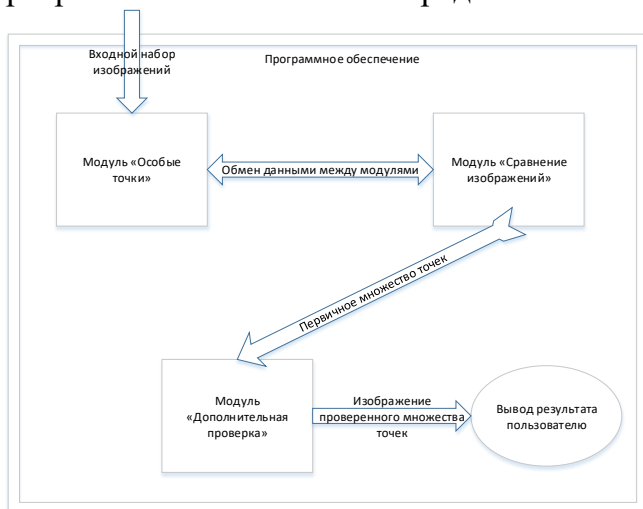


Рис. 1. Схема работы программного обеспечения

Из схемы программного обеспечения, представленной на рис. 1, можно выделить 3 основных модуля:

- «Особые точки» - отвечает за нахождение на изображениях особых точек для сравнения использует алгоритмы построения SIFT и DAISY дескрипторов;
- «Сравнение изображения» - сравнивает особые точки на изображениях между собой соотнося их, использует для этого алгоритмы SURF и RANSAC (стандартная гомография); на основе алгоритма Лукаса-Канаде дополнительно соотносим положения

камер, ранее полученные данные, используем для построения карты глубин, т.е. множества точек, соответствующее расположению особых точек в 3d пространстве; вместе с модулем «Особые точки» работают одновременно, постоянно обмениваются информацией;

- «Дополнительная проверка» – «проходит» по всему множеству точек и удаляет из него явно «ложные точки», т.е. существенно удаленные от других.

Под входным набором изображений подразумевается видеосигнал с камеры, либо набор ранее сделанных фотографий объекта.

Проведен эксперимент с набором исходных данных фотографий фигурки (258 фото). На рис. 2 представлен результат, в виде облака точек, обработки набора фотографий фигурки.

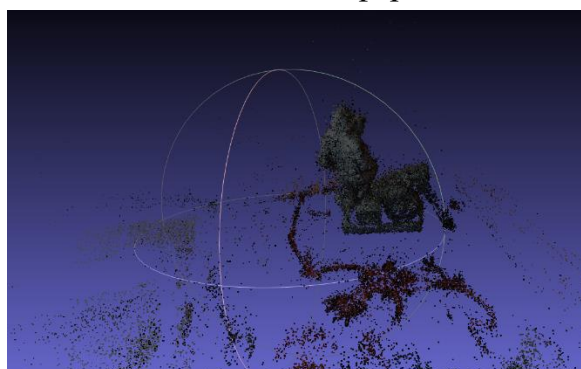


Рис. 2. Результат в виде облака точек (фигурка)

Заключение. Таким образом, в работе получены следующие результаты: проанализированы и выбраны наиболее эффективных методов определения положения гауссова видеоимпульса на фоне шумов; разработано приложение для реконструкции объектов на основе фото- или видеоматериала

Полученный результат показывает, что на изображениях с малым числом помех можно достигнуть приемлемого соответствия между полученным множеством точек и исходным объектам, не прибегая к дополнительным этапам обработки исходного изображения или полученного результата.

Для изображений объектов, полученных не в лабораторных условиях, свойственно существенно большее количество помех, что приведет к менее точному результату и потребует дополнительных шагов обработки исходных изображений или полученного множества, для отбрасывания точек, не соответствующих реальному объекту построения.

Библиографический список

1. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Вильямс. 2004. 928 с.
2. Претт У. Цифровая обработка изображений. Москва: Мир. 1982. 422 с.
3. Васильев К.К. Статистический анализ многомерных изображений. Ульяновск: УлГТУ. 2002. 156 с.

УДК 519.2

ИНВАРИАНТНОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ СЕТЕЙ С НЕАКТИВНЫМИ ЗАЯВКАМИ

Ю.С. Крук*, Ю.Е. Летунович**, Л.Н. Марченко***

* Белорусский национальный технический университет,
Республика Беларусь, Минск, *juls1982@list.ru*

** Белорусский национальный технический университет,
Республика Беларусь, Минск, *yletunovich@gmail.com*

*** Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
Республика Беларусь, Гомель, *lamarchenko@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены замкнутые сети массового обслуживания с неактивными заявками и многорежимными стратегиями обслуживания. Узлы могут функционировать в нескольких режимах, соответствующих различной степени работоспособности обслуживаемого устройства. Для сетей Гордона-Ньюэлла с неактивными заявками и многорежимными стратегиями установлена инвариантность стационарного распределения вероятностей состояний по отношению к функциональной форме распределения длительностей обслуживания и количества работы по обслуживанию заявок при фиксированных первых моментах.

Ключевые слова: сеть Гордона-Ньюэлла, неактивные заявки, эргодичность, инвариантность стационарного распределения вероятностей состояний.

STATIONARY DISTRIBUTION INSENSITIVITY OF A CLOSED NETWORK WITH NON-ACTIVE CUSTOMERS

J.S. Kruk*, Y.E. Letunovich**, L.N. Marchenko***

* Belarusian national technical university,
Minsk, Belarus, *juls1982@list.ru*

** Belarusian national technical university,
Minsk, Belarus, *yletunovich@gmail.com*

*** Francisk Skorina Gomel State University,
Gomel, Belarus, *lamarchenko@yandex.ru*

Abstract. Stationary functioning of a closed queueing network with temporarily non-active customers and multi-regime service is considered. Non-active customers are located in queues of network systems, being not serviced. Each system can operate at several regimes corresponding to different degrees of its efficiency. Stationary distribution insensitivity is established for Gordon-Newell network, where service times are independent random distributed random values or quantity of work for customer service is a random distributed value.

Keywords: Gordon-Newell network, non-active customer, ergodicity, stationary distribution insensitivity.

В теории сетей массового обслуживания достаточно актуальной является проблема исследования надежности обслуживаемых систем. Однако не только обслуживаемая система может выходить из строя. По целому ряду причин могут терять качественные характеристики и поступающие в систему заявки. С точки зрения надежности поступающих заявок большой интерес для исследователей представляют сети массового обслуживания с неактивными заявками. Заявки в таких сетях делятся на два класса: первые могут обслуживаться узлами, а вторые являются временно неактивными и не обслуживаются, скапливаясь в очередях узлов. Поступающие в сеть потоки информационных сигналов позволяют заявкам изменять состояние: из неактивного переходить в состояние, когда они могут получать обслуживание, и наоборот. Неактивные заявки можно интерпретировать как заявки, имеющие некоторый дефект, делающий их непригодными для обслуживания. Действительно, при передаче данных в информационно-телекоммуникационных сетях может возникать ситуация, когда пересылаемая заявка становится непригодной для обслуживания в результате поломки или сбоя в процессе ее пересылки. Таким образом,

результаты изучения сетей массового обслуживания с неактивными заявками представляют интерес с точки зрения исследования функционирования реальных объектов, имеющих сетевую структуру. В большинстве случаев исследователей интересуют характеристики стационарного функционирования таких сетей, в частности вид стационарного распределения вероятностей состояний.

В [1] Г.Ш. Цициашвили и М.А. Осиповой рассмотрена открытая сеть с временно неактивными заявками: исследовано стационарное распределение вероятностей состояний в предположении, что длительности обслуживания заявок распределены по экспоненциальному закону. Классическая модель сети Джексона исследована в [2] в предположении, что длительность обслуживания заявки также имеет показательное распределение, однако на практике это ограничение выполняется редко. Действительно, закон распределения длительности обслуживания заявки обычно отличается от показательного. Поэтому существует актуальная проблема разработки аналитического аппарата для исследования сетей массового обслуживания с произвольными функциями распределения времени обслуживания, привлекающая все большее внимание исследователей [3–5].

Ивницкий В.А. при исследовании немарковских сетей массового обслуживания ввел в рассмотрение понятие кусочно-линейных (КЛСеМО) и кусочно-непрерывных сетей массового обслуживания (КНСеМО). Обслуживание в таких сетях имеет не «временную», а так называемую «энергетическую» трактовку, т.е. каждая операция обслуживания характеризуется случайной величиной работы, которую необходимо выполнить. При произвольных функциях распределения количества работы, необходимого для обслуживания заявки, случайный процесс, характеризующий количество заявок в каждом из узлов, не марковский, поэтому, как и в большинстве работ по инвариантности, используется метод расширения фазового пространства (метод дополнительных переменных). В зависимости от того, как поведут дополнительные переменные, характеризующие остаточное количество работы, необходимое для окончания некоторой операции обслуживания, и происходит деление немарковских сетей массового обслуживания на КЛСеМО и КНСеМО. Энергетическая интерпретация обобщает представление о процессе обслуживания, представляет большой интерес с практической точки зрения и позволяет рассматривать более широкий класс задач и исследовать более сложные и интересные модели сетей.

Большое значение для практических приложений представляет изучение сетей массового обслуживания, в которых обслуживающие приборы в узлах могут выходить из строя. Действительно, в реальных сетях технические средства в силу естественного износа или нарушения условий эксплуатации могут либо полностью прекращать функционирование, либо продолжать работать с меньшей производительностью. Однако найти стационарное распределение для таких сетей достаточно сложно. В работах Ю. В. Малинковского исследованы открытые и замкнутые сети, в которых приборы могут частично выходить из строя, работая при этом в щадящем режиме. В таких сетях однолинейные узлы могут работать в нескольких режимах. Установлено, что стационарное распределение имеет форму произведения.

Настоящая работа посвящена обобщению вопросов инвариантности стационарного распределения вероятностей состояний замкнутых сетей массового обслуживания с неактивными заявками и многорежимными стратегиями обслуживания. Исследуются сети Гордноа-Ньюэлла с неактивными заявками и многорежимными стратегиями обслуживания. Приборы в узлах сети могут функционировать в нескольких режимах, отвечающих различной степени

работоспособности узлов. Каждый режим отличается набором показателей. При переходе узла в режим с большим номером производительность узла уменьшается, ухудшается процесс обслуживания. При переходе узла в режим с меньшим номером происходит восстановление показателей процесса обслуживания, улучшается качество обслуживания. Устанавливается инвариантность стационарного распределения по отношению к функциональной форме распределений длительностей обслуживания заявок и по отношению к функциональному виду распределения количества работы, требующегося для обслуживания заявок, при фиксированных первых моментах.

Стационарное распределение замкнутой сети с неактивными заявками и многорежимными стратегиями обслуживания

Исследуется замкнутая сеть массового обслуживания с множеством узлов $J = \{1, \dots, N\}$. Все заявки, находящиеся в сети (предполагается, что в сети циркулируют M заявок), подразделяются на обыкновенные (активные), которые могут получать обслуживание, и неактивные. Кроме того, в узлы сети поступают независимые простейшие потоки информационных сигналов с интенсивностями ν_i и φ_i . Информационный сигнал, поступивший в i -ый узел с интенсивностью ν_i ; уменьшает количество обыкновенных заявок на единицу и увеличивает на единицу количество неактивных заявок. В случае отсутствия в i -ом узле обыкновенных заявок сигнал покидает сеть. Информационный сигнал, поступивший в i -ый узел с интенсивностью φ_i , уменьшает на единицу количество неактивных заявок, увеличивая на единицу количество обыкновенных заявок. В случае отсутствия в i -ом узле неактивных заявок сигнал покидает сеть. Информационные сигналы не требуют обслуживания.

Предполагается, что i -ый узел может функционировать в одном из r_i+1 режимов. Обозначим l_i – номер режима, в котором функционирует i -ый узел ($l_i = 0, \dots, r_i$; $r_i > 0$; $i \in J$). Состояние сети в момент времени t характеризуется вектором $z(t) = (z_1(t); z_2(t); \dots; z_N(t))$, где $z_i(t) = (n_i(t); n'_i(t); l_i(t))$ – состояние i -го узла в момент времени t . Здесь $n_i(t)$ и $n'_i(t)$ – число обыкновенных и соответственно неактивных заявок в i -ом узле в момент времени t , $l_i(t)$ – режим функционирования i -го узла, $n_i(t) + n'_i(t)$ общее число заявок в i -ом узле. Фазовое пространство случайного процесса $z_i(t)$ имеет вид

$$Z_i = \left\{ z_i = (n_i, n'_i, l_i) : n_i, n'_i \geq 0, \sum_{i \in J} (n_i, n'_i) = M, l_i = \overline{0, r_i}, i \in J \right\}.$$

Нумерация обыкновенных заявок в очереди каждого узла осуществляется от «хвоста» очереди к прибору, т.е. если в i -ом узле находится n_i обыкновенных заявок, то заявка, которая обслуживается, имеет номер n_i , а последняя заявка в очереди имеет номер 1. Временно неактивные заявки в очереди i -го узла нумеруются следующим образом: заявка, последняя ставшая неактивной, имеет номер n'_i . Поступающий в узел i сигнал ν_i воздействует на обыкновенную заявку, имеющую номер 1, которая становится неактивной заявкой под номером n'_i+1 . Сигнал φ_i воздействует на неактивную заявку, имеющую номер n'_i , которая становится обыкновенной заявкой под номером 1.

Назовем нулевой режим основным режимом работы. Время работы узла, находящегося в состоянии $z_i = (n_i, n'_i, l_i)$, в режиме l_i ($l_i = \overline{0, r_i}$, $i = \overline{1, N}$) имеет показательное распределение, при этом с интенсивностью $\sigma_i(n_i + n'_i, l_i)$ ($\sigma_i(n_i + n'_i, l_i) > 0$) i -ый узел переходит в $(l_i + 1)$ -й режим ($l_i = \overline{0, r_i - 1}$), а с интенсивностью

$\rho_i(n_i + n'_i, l_i)$ ($\rho_i(n_i + n'_i, l_i) > 0$) – в $(l_i - 1)$ -й режим ($l_i = \overline{1, r_i}$). Переключение прибора с одного режима в другой сохраняет общее число заявок в узле.

Пусть в момент времени t состояние i -го узла есть вектор $(n_i(t), n'_i(t), l_i(t))$ и сразу после указанного момента в этот узел поступает заявка, которая, как отмечалось выше, начинает немедленно обслуживаться, то длительность ее обслуживания является случайной величиной с произвольной функцией распределения $B_i(n_i + n'_i + 1, z)$ и конечным математическим ожиданием $\frac{1}{\mu_i}$. Предполагается, что функция распределения $B_i(n_i + n'_i + 1, 0) = 0$, $i \in J$.

Дисциплина обслуживания *LCFS-PR*. Поступающая в i -ый узел заявка начинает сразу обслуживаться и получает номер $n_i + 1$, а вытесненная заявка сохраняет номер n_i и становится первой в очереди на дообслуживание. Предполагается, что в начальный момент времени временно неактивные заявки в сети отсутствуют.

Заявка, получившая обслуживание в i -м узле, мгновенно с вероятностью p_{ij} переходит в j -ый узел ($\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1, i \in J$). Не ограничивая общности рассуждений, договоримся считать $p_{ii} = 0, i \in J$. Матрица маршрутизации предполагается неприводимой.

Для замкнутых сетей показано, что в случае неприводимости матрицы маршрутизации (p_{ij}) система уравнений трафика

$$\varepsilon_j = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i p_{ij}, \quad j \in J, \quad (1)$$

имеет единственное точно до постоянного множителя положительное решение [2]. Процесс $z(t)$ – однородный марковский процесс с непрерывным временем и конечным фазовым пространством $Z = \{Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_N\}$, где Z_i – фазовое пространство случайного процесса $z_i(t)$.

Пусть $\xi_{i,k}(t)$ – время, оставшееся до окончания обслуживания заявки, стоящей в момент времени t на k -ой позиции в i -ом узле, $\xi_i(t) = (\xi_{i,1}(t), \dots, \xi_{i,n_i+n'_i}(t))$, $i \in J$.

Тогда в общем случае процесс $z(t)$ не является марковским, поэтому рассмотрим кусочно-линейный марковский процесс $\zeta(t) = (z(t), \xi(t))$, добавляя к $z(t)$ непрерывную компоненту $\xi(t) = (\xi_1(t), \dots, \xi_N(t))$.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} F(z, x) &= F(z, x_{1,1}, \dots, x_{1,n_1+n'_1}; x_{2,1}, \dots, x_{2,n_2+n'_2}; x_{N,1}, \dots, x_{N,n_N+n'_N}) = \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} P\{z(t) = z, \xi_{i,1}(t) < x_{i,1}, \dots, \xi_{i,n_i+n'_i}(t) < x_{i,n_i+n'_i}, i \in J\}, z \in Z, x_{k,l} \in R \forall k, l. \end{aligned}$$

Функции $F(z, x)$ будем называть стационарными функциями распределения вероятностей состояний кусочно-линейного процесса $z(t)$, т.к. при каждом фиксированном z функция $F(z, x)$ в части непрерывных компонент представляет функцию распределения.

Теорема. Случайный процесс $z(t)$ эргодичен, а при выполнении условий

$$\begin{aligned} \sigma_i(n_i + n'_i, l_i - 1) \rho_i(n_i + n'_i - 1, l_i) &= \\ &= \sigma_i(n_i + n'_i - 1, l_i - 1) \rho_i(n_i + n'_i, l_i), \quad (2) \\ l_i &= \overline{1, r_i}, \quad i \in J, \end{aligned}$$

стационарные функции распределения вероятностей состояний $F(z, x)$ определяются по формулам

$$F(z, x) = \frac{1}{G(M, N)} \times p_1(n_1, n'_1, l_1) \dots p_N(n_N, n'_N, l_N) \times \\ \times \prod_{i=1}^N \prod_{s=1}^{n_i+n'_i} \mu_i^{n_i+n'_i} \int_0^{x_{i,s}} (1 - B_i(s, u)) du, z \in Z,$$

где

$$p_i(n_i, n'_i, l_i) = \left(\frac{\varepsilon_i}{\mu_i} \right)^{n_i} \left(\frac{\varepsilon_i \nu_i}{\mu_i \varphi_i} \right)^{n'_i} \prod_{k=1}^{l_i} \frac{\sigma_i(0, k-1)}{\rho_i(0, k)}, \quad (3)$$

ε_i – решение системы уравнений трафика (1), а $G(M, N)$ – нормирующая константа.

Пусть $\{p(z), z \in Z\}$ – стационарное распределение вероятностей состояний процесса $z(t)$. Из теоремы с учетом равенства $p(z) = F(z, +\infty)$ вытекает следующее следствие.

Следствие. Процесс $z(t)$ эргодичен и, если выполняется условие (2), то стационарное распределение вероятностей состояний сети $\{p(z), z \in Z\}$ не зависит от функционального вида распределений $B_i(s, x)$, $i \in J$, и имеет мультипликативный вид:

$$p(z) = \frac{1}{G(M, N)} p_1(n_1, n'_1, l_1) \dots p_N(n_N, n'_N, l_N), z \in Z.$$

где $p_i(n_i, n'_i, l_i)$ определяются по формулам (3).

Таким образом, установлена инвариантность стационарного распределения по отношению к функциональной форме распределений длительностей обслуживания заявок при фиксированных первых моментах. Следует отметить, что для обобщенной модели сети на случай произвольного распределения количества работы, требующегося для обслуживания заявок, справедлив аналогичный результат, и стационарное распределение инвариантно для случая энергетической постановки.

Результаты математического моделирования могут быть применены на практике для исследования стационарного функционирования реальных объектов, имеющих сетевую структуру.

Библиографический список

1. Tsitsiashvili G. Sh., Osipova I. Distributions in Stochastic Network Models. N.Y.: Nova Publishers Incorporated. 2008. 75 p.
2. Jackson J.R. Network of Waiting Lines // Oper. Res. 1957. Vol. 5. № 4. P. 518-521.
3. Kruk J., Dudovskaya Y. Insensitivity of the Stationary Distribution of State Probabilities in an Open Network with Non-active Customers // Autom. Remote Control. 2015. Vol. 76. №. 12. P. 2168-2178.
4. Kruk J. Dudovskaya Y. Stationary Distribution Insensitivity of a Closed Multi-regime Queueing Network with Non-active Customers // Inform. Technologies and Mathematical Modelling Communications in Computer and Inform. Sci. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. Vol. 564, №1. P. 373-383.
5. Крук Ю.С., Дудовская Ю.Е. Инвариантность стационарного распределения вероятностей состояний сетей массового обслуживания с неактивными заявками. Минск: БНТУ. 2016. 130 с.

КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ ЗЕНИТНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ РАКЕТОЙ

А.В. Лопухов

УО «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь, Минск, lopuhov.2017@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы аналитического конструирования агрегированного регулятора, позволяющего обеспечивать синергетический синтез систем управления движения зенитной управляемой ракеты.

Ключевые слова: синтез, движение, зенитная управляемая ракета, регулятор.

THE DESIGN OF A REGULATOR FOR THE SYNERGISTIC CONTROL THEORY ANTI-AIRCRAFT GUIDED MISSILE

A.V. Lopuhov

E.I. «Military Academy of the Republic of Belarus», Republic of Belarus, Minsk, lopuhov.2017@mail.ru

Abstract. Considers the questions of analytical design of aggregated regulator, allowing providing synergetic synthesis of control systems of anti-aircraft guided missile.

Keywords: synthesis, motion, anti-aircraft guided missile, regulator.

Синергетический подход в теории управления базируется на принципах направленной самоорганизации нелинейных динамических систем, которая осуществляется на основе синтеза соответствующих взаимосвязанных законов управления. Синергетические законы управления являются законами управления нового класса, т.к. они получаются аналитически по нелинейной модели управления зенитной управляемой ракетой и учитывают взаимосвязь каналов управления. Регулятор, реализующий синергетические законы управления, представляет совокупность нелинейных обратных связей по переменным состояния системы.

Точками соприкосновения синергетики и синергетической теории управления являются: открытость системы; взаимодействие; когерентность поведения компонентов системы; нелинейное описание систем.

Синергетические системы обладают двумя основными свойствами: обмен с внешней средой энергией и информацией; взаимодействие компонентов системы.

Перспективным для развития синтеза является перенос свойств синергетических систем на конструируемые системы управления нелинейными объектами.

Основные особенности синергетической теории управления применительно к задаче синтеза состоят: во-первых, в кардинальном изменении целей поведения синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете в процедурах синтеза естественных свойств нелинейных объектов; в-третьих, в формировании нового механизма генерации обратных связей.

Целью синтезируемых систем – достичь целевых аттракторов, т.е. состояний системы, в которые она стремится попасть из любого состояния, и инвариантных многообразий которые отражают физическую сущность процессов, протекающие в динамическом объекте. Введение в процедуру синтеза инвариантных многообразий позволяет построить регулярный механизм аналитической генерации естественной совокупности отрицательных и положительных нелинейных обратных связей, которые формируют процессы направленной самоорганизации в синтезируемых системах.

При синергетическом подходе к синтезу систем целью функционирования замкнутой нелинейной системы, в отличие от классической теории регулирования и теории оптимального управления, является не только выполнение требований к характеру переходного процесса, в первую очередь, обеспечение желаемого асимптотического поведения системы на аттракторе или в его близкой окрестности.

Это связано с тем обстоятельством, что поведение нелинейной диссипативной системы может быть разделено на этап переходного движения, когда ее траектории устремляются к аттрактору, а также этап асимптотического движения на желаемом аттракторе – цели системы. Такой подход позволяет принципиально разрешить проблему аналитического синтеза объективных и взаимосвязанных законов управления нелинейными многомерными и многосвязными объектами, такими как зенитная управляемая ракета. Это законы обратных связей, синтезируемых на основе наиболее полных нелинейных моделей динамических объектов с непосредственным учетом их естественных закономерностей, физических критериев и ограничений [1].

В основе синергетического подхода к синтезу систем содержатся два фундаментальных принципа: инвариантности или сохранения; расширения-сжатия фазового объема в диссипативных системах произвольной природы.

Базовые положения подхода являются:

- в синергетических системах в процессе самоорганизации происходит динамическая декомпозиция фазового пространства, приводящая к выделению параметров порядка – макропеременных, к которым подстраиваются остальные координаты систем. Образование параметров порядка сопровождается процессом сжатия объемов в фазовом пространстве синтезируемых систем;

- следствием процесса самоорганизации является образование аттракторов, к которым притягиваются все траектории системы. Указанные аттракторы имеют размерность, всегда меньшую размерности исходной системы, что означает «забывание» начальных условий, откуда начинаются траектории движения. Следствием этого является образование инвариантных решений нелинейных дифференциальных уравнений систем;

- каждый аттрактор имеет собственную область притяжения, поэтому можно выделить границу, разделяющую такие области. Тогда достаточно малое изменение начальных условий может привести к качественно различному поведению нелинейной системы. Это означает, что, прилагая к системе достаточно малые воздействия, согласованные с ее внутренними свойствами, можно обеспечить качественно новое поведение вдали от ее положения равновесия. Такое необычное свойство, объясняемое эффектом самоорганизации в диссипативных системах, открывает новые возможности в решении задач управления нелинейными динамическими объектами [2].

Целью синтезируемой системы является асимптотически устойчивое конечное состояния, т.е. достижение желаемого аттрактора. Размерность аттрактора – цели исходной системы – обычно существенно меньше размерности ее исходного фазового пространства. Для обеспечения процессов обработки информации и управления в сложных нелинейных динамических системах необходимо, чтобы указанные процессы включали, по меньшей мере, две фазы: расширения и сжатия фазового пространства.

Эти фазы реализуются с использованием совокупности нелинейных положительных и отрицательных обратных связей. При этом в фазе расширения в системе формируется подмножество различных альтернатив поведения для взаимодействия с внешней средой или другими системами, а в фазе сжатия система сжимает область притяжения аттракторов, ранее построенных, в один из желаемых аттракторов – цель системы.

Принцип динамического «расширения-сжатия» фазового пространства систем. Согласно базовым положениям синергетической теории управления, стратегия управления направленными процессами самоорганизации в синтезируемых системах состоит в формировании и поддержании внешне- и внутрисистемных инвариантов,

определяющих структуру соответствующих аттракторов – целей системы. В зависимости от поставленных целей вводимые инварианты и аттракторы могут быть постоянными или динамическими, что соответственно означает стабилизацию состояния системы или переход ее в новое динамическое состояние. Целенаправленное формирование инвариантов и аттракторов позволяет осуществить способ направленной самоорганизации систем. В исходной постановке стандартной задачи управления система описывается дифференциальными уравнениями зенитной управляемой ракеты [3].

Для перехода от схемы «объект-внешние силы» к формированию уравнений самоорганизации необходимо силы соответствующим образом исключить. Для этого следует расширить исходные уравнения системы «объект – внешние силы» таким образом, чтобы включенные в уравнения системы внешние силы оказались для нее внутренними. Тогда для новой, расширенной, системы ее уравнения могут стать уравнениями самоорганизации, т.е. в результате указанного расширения можно перейти от организации системы к ее самоорганизации. Именно такого рода расширение происходит при соответствующей формулировке проблемы синтеза систем, которая состоит в определении законов управления в функции координат состояния расширенной системы. Эти законы, являющиеся уравнениями регулятора, должны обеспечить желаемые динамические свойства замкнутой системы «объект-закон управления». Тогда по отношению к новой, расширенной системе («объект-регулятор») целесообразно и применить соотношения, характеризующие процессы самоорганизации синергетики в соответствии с выделенными выше свойствами. Таким образом, исходная система, состоящая из некоторого динамического объекта и действующих на него внешних, в результате замыкания прямыми и обратными связями преобразуется в новую, расширенную систему. При этом первоначальные воздействия, бывшие внешними силами по отношению к исходному объекту, становятся внутренними силами расширенной системы. Такая система становится открытой, и через нее протекают энергия. Носителями энергии или вещества и информации являются синтезируемые управления.

Для применения синергетического подхода в проблемах управления необходимо перейти от исходной задачи управления, включающей уравнения объекта и внешние силы, к расширенной постановке задачи таким образом, чтобы силы стали внутренними взаимодействиями общей системы. Для этого следует представить внешние задающие и возмущающие воздействия как частные решения некоторых дополнительных дифференциальных уравнений, описывающих информационную модель, и т.о. осуществить их «погружение» в общую структуру расширенной системы. Затем проблему управления необходимо формулировать как проблему поиска законов взаимодействия между компонентами расширенной системы, обеспечивающих возникновение в ней процессов самоорганизации. Конкретно эта проблема сводится к синтезу соответствующих законов замкнутого управления в функции координат состояния расширенной системы. Подведением энергии или вещества в расширенной системе можно создать неравновесную ситуацию, необходимую для возникновения направленных процессов самоорганизации.

В соответствии с принципом «расширения-сжатия» (рис. 1) к базовым положениям синергетического подхода к проблеме синтеза нелинейных динамических систем относятся:

а) формирование расширенной системы дифференциальных уравнений, отражающих процессы отработки задающих воздействий, подавления возмущений, оптимизации;

б) конструирование «внешних» управлений, обеспечивающих сжатие исходного фазового пространства до размерности конечного многообразия;

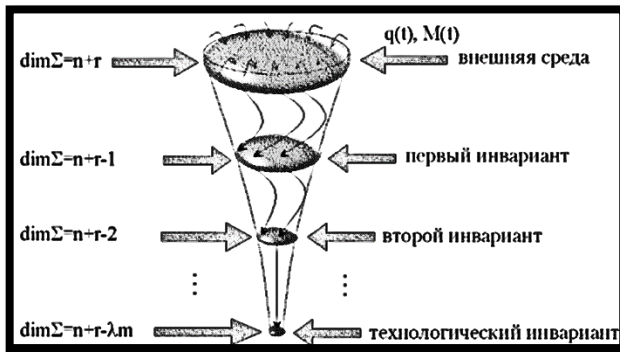


Рис. 1. «Сжатие и расширение» фазового пространства

в) формирование таких инвариантных многообразий между «внутренними» координатами системы, которые обеспечивают достижение поставленной цели управления.

Синтезируемая система зенитной управляемой ракетой должна обладать достаточным числом степеней свободы для реализации поставленной технологической задачи. Это означает, что, если объект обладает ограниченным

числом степеней свободы, то для реализации поставленной цели управления, необходимо предварительно осуществить операцию расширения фазового пространства исходного объекта. Для синтеза синергетических систем следует предварительно произвести добавление стольких степеней свободы, чтобы быть достаточным для реализации целей управления. Изложенные выше позволяет сделать выводы:

- управление объектом представляет организованный и целенаправленный процесс редукции избыточных степеней свободы исходной системы, т.е. все избыточные по отношению к заданной цели степени свободы редуцируются и в конечном итоге остаются только степени свободы, которые определяют технологическую задачу управления;
- согласно синергетическому подходу, процедура редукции степеней свободы означает формирование между координатами системы инвариантных многообразий, которые и реализуют указанную редукцию. При этом инвариантные многообразия вводятся в синтезируемую систему с помощью соответствующего закона управления;
- редуцируемые степени свободы замкнутой системы представляют собой элементы управления как некоторые системные категории, а инвариантные многообразия ограничивают разнообразие системы и формируют связи, т.е. некоторые внутренние управления [4].

Основным методом синергетической теории управления, который реализует приведенные выше базовые положения, является метод аналитического

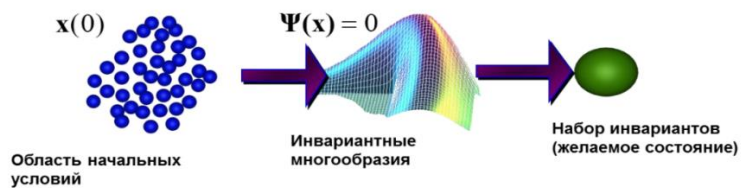


Рис. 2. Формирование направленной самоорганизации

конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), который основывается на введении инвариантных многообразий (рис. 2).

Библиографический список

1. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М: Наука. 1987. 53с.
2. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными процессами: механические и электромеханические системы. М.: КомКнига. 2006. 85с.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления М.: Энергоатомиздат. 1994. 121с.
4. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления. Таганрог.:изд-во ТРТУ. 2000. 81с.

ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Н.С. Булдакова*, Т.И. Булдакова**, А.В. Опольский*, С.И. Суятинов**

* *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, natala.s@gmail.com*

** *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, buldakova@bmstu.ru*

Аннотация. Рассмотрена проблема разработки адекватных математических моделей для оценки функционального состояния организма человека-оператора. Представлены механизмы регулирования и модель параметрического управления сердечно-сосудистой системой, которая является индикатором адаптивности организма к внешней среде. Показано, что адекватность повышается при наличии априорной информации о психофизиологических характеристиках человека. Предложена модель биосистемы «сердце-сосуды», разработанная на основе зарегистрированных биосигналов. Даны геометрическая интерпретация областей адекватности математических моделей и их особенности, приведен пример.

Ключевые слова: функциональное состояние, сердечно-сосудистая система, биосигналы, области адекватности моделей.

APPROACH TO IMPROVING THE ADEQUACY OF MODELS FOR ASSESSING THE HUMAN FUNCTIONAL STATE

N.S. Buldakova*, T.I. Buldakova**, A.V. Opolsky*, S.I. Suyatinov**

* *Lomonosov Moscow State University, natala.s@gmail.com*

** *Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia, buldakova@bmstu.ru*

Abstract. The problem of developing adequate mathematical models for assessing the functional state of the human operator is considered. The mechanisms of regulation and the model of parametric control of the cardiovascular system, which is an indicator of the human organism adaptability to the environment, are presented. It is shown that the adequacy increases with the presence of a priori information about the psycho-physiological characteristics of a person. A model of the biosystem “heart-vessels”, based on the registered biosignals, is proposed. The geometric interpretation of the areas of adequacy of mathematical models and their features are given, an example is considered.

Keywords: functional state, cardiovascular system, biosignals, areas of model adequacy.

Оценка функционального состояния человека выполняется при решении различных задач, в том числе при проектировании систем типа «человек-машина». Известно, что деятельность человека-оператора, управляющего сложным устройством или оборудованием, характеризуется высоким психоэмоциональным напряжением, что может негативно влиять на его работоспособности. Это требует оценки функционального состояния человека-оператора не только в терминах «здоров-нездоров», но и в более тонких психофизиологических определениях типа «степень усталости, нервного напряжения» и т.п. Для выявления скрытых процессов, протекающих в организме человека, и прогнозирования их изменений создают математические модели. Однако типичным случаем при исследовании любой сложной системы, в том числе организма человека, является недостаточность данных для построения модели, и возникает проблема ее разработки (реконструкции) на основе неполной информации о внутренней динамике системы [1]. Зачастую единственная информация о сложной биосистеме содержится лишь в регистрируемых сигналах (ЭКГ, сфигмограмме, электроэнцефалограмме и др.). В свою очередь, возникает проблема оценки адекватности реконструированных моделей исходной биосистеме. Это обуславливает актуальность разработки адекватных моделей для оценки функционального состояния организма (ФСО) человека-оператора.

Любая задача анализа функционального состояния организма может быть формализована как задача классификации ФСО человека на основе выбранных информативных критериев и имеющейся шкалы состояний. Общепринятая шкала предполагает наличие двух пограничных состояний «здоров-нездоров». Поскольку деятельность человека-оператора осуществляется при непрерывном воздействии окружающей среды, то функциональные состояния его организма, который непрерывно адаптируется к условиям окружающей среды, различаются по степени напряжения регуляторных систем, степени адаптации. Поэтому для исследования ФСО человека-оператора шкала может быть расширена экспертами информативными для них промежуточными состояниями, связанными с нервным напряжением. В качестве критериев ФСО используют индивидуальные показатели, представленные результатами электрофизиологических исследований. Объективность и точность оценки ФСО непосредственно зависят от выбора наиболее информативных показателей и методики их анализа.

В настоящее время известны различные подходы к оценке функционального состояния человека-оператора, важные для определения его работоспособности: по кожно-гальванической реакции, по частотно-амплитудному спектру сигналов ЭЭГ (электроэнцефалограммы), по вариабельности сердечного ритма [2-4].

Отметим, что поскольку приспособление психофизиологических функций к рабочей деятельности человека-оператора обеспечивается свойством адаптивности организма, индикатором которой является сердечно-сосудистая система (ССС), то основную группу составляют методы оценки ФСО, использующие в качестве первичной информации вариабельность сердечного ритма, проявляющуюся в различии временных интервалов между *R*-волнами в ЭКГ [5].

Непрерывные колебания длительности интервалов *R-R* ЭКГ обусловлены постоянной коррекцией сердечно-сосудистой деятельности в соответствии с условиями функционирования организма [6]. Эта коррекция осуществляется сложными регуляторными механизмами, показанными на рис. 1 в упрощенном виде. Из рисунка видно, что нервная система регулирует работу сердца за счет нейрогуморальных воздействий, изменяющих интенсивность сокращений сердца и приспособляющих его деятельность к потребностям организма в условиях внешних и внутренних воздействий. Результатом регулирования является изменение свойств сердечно-сосудистой системы, влияющих на ФСО человека. С позиций теории управления осуществляется параметрическое управление системой (рис. 2).

Поскольку в процесс принятия решений человеком-оператором вовлечены различные мозговые структуры, выполняющие функции восприятия, отбора, фиксации и извлечения из памяти необходимой информации, то с использованием ЭЭГ проведено выявление функциональных структур мозга, принимающих участие в задачах, связанных с принятием решений [3]. Это позволило определить те разделы головного мозга, которые в наибольшей степени задействованы при выполнении человеком-оператором профессиональных обязанностей, а также определить ряд психофизиологических характеристик.

Полученная информация и зарегистрированные биосигналы позволили разработать модель биосистемы «сердце-сосуды» в форме уравнения Ван-дер-Поля–Релея и предложить критерий оценки ФСО [4]. Внешние воздействия на сосуды моделировались обученной динамической сетью Вольтерра. Диагностические возможности модели исследовались на примере идентификации двух функциональных состояний человека-оператора: спокойного и напряженного.



Рис. 1. Механизмы регулирования ССС

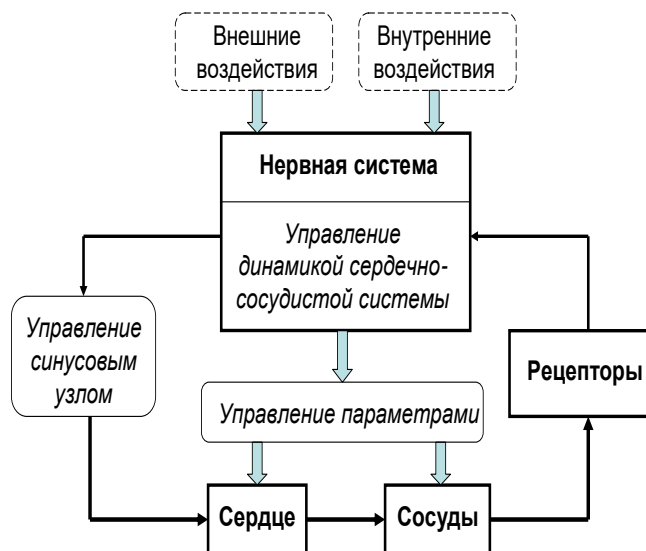


Рис. 2. Модель параметрического управления ССС

На рис. 3 и 4 показаны сигналы пульсовой активности X и электрической активности сердца E в покое (сплошная линия) и при психоэмоциональном напряжении (пунктирная линия), где видно, что помимо увеличения частоты в определенной степени изменяется форма кривых. Разработанная модель позволила различать эти состояния.

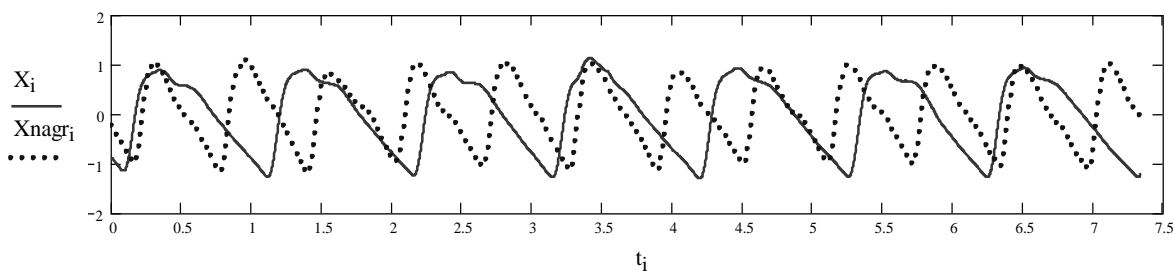


Рис. 3. Пульсовые сигналы в покое и при нагрузке

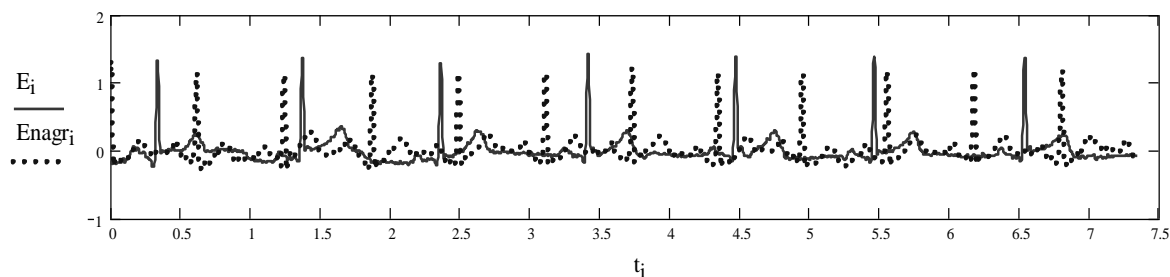


Рис. 4. Сигналы электрической активности сердца в покое и при нагрузке

Однако проведенные исследования показали, что указанная модель не всегда соответствует регистрируемым биосигналам. Поэтому в зависимости от состояния здоровья, люди разделены на группы, каждой из которых ставилась в соответствие определенная структура модельного уравнения. Таким образом, создан банк данных моделей. Например, для людей старшего возраста с неэластичными сосудами использовалась модель Ван-дер-Поля – Дуффинга.

При выборе наиболее адекватной модели из банка данных учитывалась априорная информация, доступная медицинским специалистам: содержание холестерина в крови, возраст, масса, хронические заболевания и т.д. Поскольку задача реконструкции модельных уравнений характеризуется плохой обусловленностью, то потребовалась разработка нового критерия, позволяющего оценить адекватность модельной системы. В отличие от традиционного подхода, разработанный критерий (вместо количественной оценки сходства исходной и реконструированной модельной системы)

позволяет перейти к оценке некоторой области адекватности. Предложены и исследованы различные способы построения областей адекватности (ОА) реконструированных моделей, в том числе в виде аппроксимирующих гиперфигур, вписанных в номинальную область адекватности.

Реконструированная модель считается адекватной, если отражает заданные свойства системы с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров (реакции) модели и исследуемой системы.

Пусть ε_j – относительная погрешность модели по j -му выходному параметру: $\varepsilon_j = (\tilde{y}_j - y_j) / \tilde{y}_j$, где y_j – j -ый выходной параметр, рассчитанный на основе модели; \tilde{y}_j – эталонное значение этого выходного параметра; $j \in [1:m]$. Эталонное значение определяется либо экспериментально, либо расчетами с использованием физических или математических моделей, заведомо более точных, чем испытываемая.

Погрешность модели часто отождествляют с одной из норм вектора $E = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$, m – число выходных параметров. В этом случае можно оценить точность только в одной или нескольких точках пространства QP внешних переменных при некоторых фиксированных значениях вектора Q . Однако точность модели различна при различных условиях функционирования объекта, которые характеризуются внешними параметрами Q . В результате оценка точности модели, полученная при одних внешних воздействиях, может оказаться недостоверной для других.

Поэтому предлагается оценивать точность модели с помощью ее области адекватности, поскольку оценки областей адекватности (ОА) моделей представляют большую ценность для пользователей.

В зависимости от конкретных постановок задач выделяют несколько видов областей адекватности. Наиболее общей ОА является номинальная область адекватности $ОАН$ по выходным параметрам, в которой расчет с помощью математической модели любого выходного параметра реального объекта производится с относительной погрешностью, не превышающей заданную: $ОАН = \{Q \in QP \mid |\varepsilon_j(Q)| < \delta, j \in [1:m]\}$, где $\varepsilon_j(Q)$ – относительная погрешность j -го выходного параметра; δ – максимально допустимая относительная погрешность; m – количество выходных параметров. Классификация возможных областей адекватности приведена в работе [7].

Для удобства практического использования сведения об областях адекватности моделей должны быть представлены в форме, чтобы проверка адекватности модели в любой точке внешнего пространства QP была простой и наглядной. С этой целью удобно применить аппроксимированные области адекватности, например, некоторую гиперфигуру $ОАФ$, вписанную в область $ОАН$.

В качестве гиперфигуры удобно использовать гиперпараллелепипед с ребрами, параллельными координатным осям пространства QP :

$$ГП = \{Q \in QP \mid q_{k_{\min}} \leq q_k \leq q_{k_{\max}}, k \in [1:l]\},$$

где $q_{k_{\min}}$ и $q_{k_{\max}}$ – нижняя и верхняя границы изменения k -ой внешней переменной.

Тогда имеем $ОАФ = ГП \in ОАН$ при условии, что максимизирован некоторый параметр гиперпараллелепипеда, например, длина наиболее короткого ребра.

В этом случае формирование области адекватности $ОАФ$ в виде гиперпараллелепипеда $ГП$ является решением максиминной задачи оптимизации вида

$\max_{Q \in ОАН} \min_{k \in [1:l]} (\gamma_k / q_k^*)$, где γ_k – ребро $ГП$ по k -ой координате пространства QP ; q_k^* – элемент вектора Q^* , определенного на этапе идентификации модели.

Определение $ОАФ$ в виде гиперпараллелепипеда $ГП$ дает сведения для модели о допустимых диапазонах изменения внешних переменных (рис. 5). Поэтому такую область адекватности удобно использовать на практике. Нарушение допустимого диапазона по какой-либо координате пространства QP является условием перехода к более сложной (точной) модели.

При решении практических задач могут использоваться и другие аппроксимации области $ОАН$. Возможные виды аппроксимированных областей адекватности с линейризованными границами показаны на рис. 6 и 7.

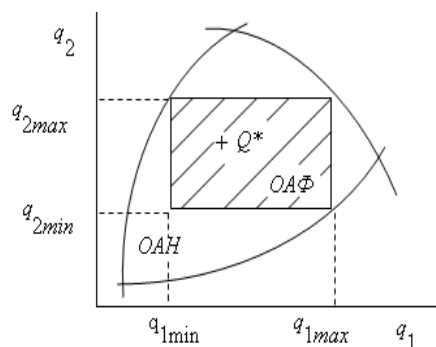


Рис. 5. Область адекватности в виде гиперпараллелепипеда $ОАФ$

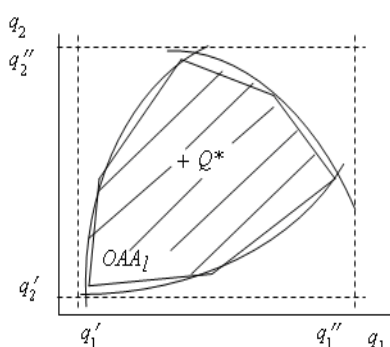


Рис. 6. Аппроксимированная область адекватности с линейризованными границами

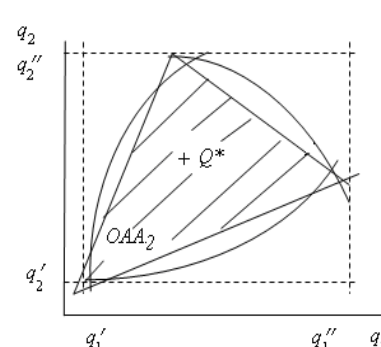


Рис. 7. Второй вид области $ОАН$ с линейризованными границами

Заметим, что при оценке адекватности моделей, описывающих ФСО человека-оператора, наиболее удобным является использование области $ОАФ$, которая задает диапазоны изменения внешних параметров.

Проведенные исследования показали, что разработанная модель в форме уравнения Ван-дер-Поля – Релея является адекватной для людей со следующими параметрами: возраст 20-40 лет; содержание холестерина в крови от 3,1 до 5,2 ммоль/л; индекс массы тела 20-23,5; сила нервных процессов – средняя; выраженность эмоционального стресса – умеренная.

Таким образом, для повышения адекватности моделей оценки ФСО человека-оператора нужно учитывать априорную психофизиологическую информацию. В этом случае аппроксимированная область адекватности в виде $ОАФ$ позволяет наглядно представить условия применимости математической модели, при которых расчеты будут выполняться с погрешностью, не превышающей заданную.

Библиографический список

1. Булдакова Т.И., Суятинов С.И. Идентификация и исследование сложных систем. Саратов: Издательство СГТУ. 2009. 108 с.
2. Булдакова Т.И., Игнатъева Е.В., Ляпина Н.С., Суятинов С.И. Оценка состояния человека и выделение групп риска развития хронических заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2011. Т. 10. № 2. С. 391-395.
3. Булдакова Н.С., Суятинов С.И. Пространственно-временное моделирование мозговой деятельности в процессе принятия решений // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2017. Т. 12. № 2. С. 76-79.
4. Суятинов С.И. Математическая модель для оценки состояния сердечно-сосудистой системы // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2017. Т. 2. С. 110-112.
5. Oweis R.J. and Al-Tabbaa B.O. QRS detection and heart rate variability analysis: A survey. // Biomedical Science and Engineering, 2014, vol. 2(1), pp. 13-34.
6. McCraty R. and Zayas M.A. Cardiac coherence, self-regulation, autonomic stability, and psychosocial well-being. // Front Psychol., 2014, vol. 5, p. 1090.
7. Булдакова Т.И. Особенности областей адекватности математических моделей объектов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 12 (94). С. 175-177.

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПЬЮ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ ФИНАНСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Т.Н. Одинцова, Ю.О. Глушкова, А.В. Пахомова

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, г. Саратов, balomasova@mail.ru

Аннотация. Сформированы рекомендации по формированию поэтапного процесса рационализации управления цепью поставок на основе использования финансовых коэффициентов как инструмента анализа предпринимателями, вступающими в цепь поставок, финансового состояния контрагентов по сделкам и более обоснованного выбора поставщиков и клиентов логистических услуг.

Ключевые слова: рационализация, управление, цепь поставок, финансовые коэффициенты, экономия, резервы, стратегия.

THE RATIONALIZATION OF THE MANAGEMENT OF THE SUPPLY CHAIN ON THE BASIS OF FINANCIAL RATIOS

T. N. Odintsova, O. Yu. Glushkova, A.V. Pakhomova

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov, balomasova@mail.ru

Annotation. The recommendations on the formation of a phased process of rationalization of supply chain management based on the use of financial ratios as a tool for analysis by entrepreneurs entering into the supply chain, the financial condition of contractors on transactions and a more reasonable choice of suppliers and customers of logistics services.

Keywords: rationalization, management, supply chain, financial ratios, savings, reserves, strategy.

Выявление резервов экономии финансовых ресурсов сокращением непроизводительных затрат и рационализации управления потоками на предприятиях, вступающих в цепь поставок, относится к актуальной, наименее исследованной проблеме цепей поставок. Между тем, решение задач увеличения производительности труда, импортозамещения, конкурентоспособности невозможно без рационального использования финансовых ресурсов – собственных или заемных. Главное – это грамотно распределить ресурсы, прежде всего, финансовые как основу эффективного стратегического управления предприятием. На этом аспекте деятельности предприятий в цепи поставок сделан акцент в статье [1]: «Потенциальные выигрыши полностью реализованной цифровой цепочки поставок включают экономию в каждой области – от ресурсов, времени и денег до снижения экологической нагрузки».

Целью исследования является разработка комплексного решения проблемы рационализации управления цепочкой поставок, основанной на применении расчета и анализа финансовых коэффициентов как инструмента успешной снабженческо-сбытовой деятельности предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить новые задачи: сформировать такой процесс рационализации управления цепочкой поставок, на основе которой можно контролировать эффективность логистических функций и операций [2].

Практика логистических предприятий и обслуживаемых ими клиентов показывает, что в настоящее время рост производства сдерживается недостатком финансовых средств и неотработанным организационно-экономическим механизмом. Устранение этого недостатка возможно с использованием метода коллективной экспертизы, который позволяет выделить три основные стратегии, наиболее часто применяемые топ-менеджерами и определяемые как базовые: экономии на издержках,

дифференциации и специализации. В контексте данной статьи нас интересует первая из названных базовых стратегий.

Стратегия экономии на издержках основывается на интенсификации производственных процессов, реализации эффекта масштаба производства и опыте предприятия. К достоинствам стратегии относится широкое использование жесткого контроля за расходами и проведение политики инвестирования в производство. Недостатком же является активное снижение сбытовых и рекламных издержек. Следствие стратегии – повышение статуса фирмы у существующих потребителей продукции, услуг и неизвестность продукции, услуг компании на новых рынках.

Для реализации стратегии предлагается поэтапный процесс рационализации управления финансовыми ресурсами предприятий в цепи поставок.

Первый этап. Сбор информации об имеющихся у предприятий ресурсах. Определяется их сущность (например, финансы-деньги-рубли-наличные), количество, стоимость покупки или продажи продукции, услуг, ресурсов сторонним организациям и т.д.

Второй этап. Изучение возможности привлечения дополнительных ресурсов. Применяются проектное финансирование, кредиты банка, эмиссия акций, лизинг оборудования и т.д.

Третий этап. Проведение исследования относительно определения порядка использования имеющихся ресурсов. Причем нас интересуют не только существующий порядок, но и альтернативные возможности.

Четвертый этап. Анализ, определение и сравнение рентабельности различных вариантов. Выбирается наиболее рентабельный вариант. Учитываются задействованные в нем ресурсы компании и определяются свободные. Если неиспользованные ресурсы существуют, то возвращаемся к этапу исследования рынков и технологических возможностей.

Пятый этап. Реализация нескольких итераций, в результате которых достигается использование всех имеющихся в доступности ресурсов с приемлемым в данный момент коэффициентом рентабельности, следовательно, получение максимально возможной прибыли.

Шестой этап. Разработка организационного сопровождения выбранной системы использования ресурсов.

Одним из значимых аспектов большинства цепей поставок является дефицит финансирования логистической деятельности, в частности, закупки, транспортировки, складирования, дистрибьюции и других.

Дефицит финансирования наступает в тех случаях, когда объем доступного финансирования меньше, чем уровень деловой активности бизнеса. Причиной является недостаточный контроль за финансовыми потоками предприятий. Например, при быстром росте спроса на продукцию или услуги динамично развивающихся предприятий не произошло адекватного увеличения финансирования. Другой причиной следует считать ошибки менеджеров при прогнозировании роста спроса и соответствующих ему растущих затрат. Падение покупательной способности денег (инфляция) могут вызвать необходимость увеличения финансирования процесса формирования запасов.

Дефицит финансирования «выводит на первый план» проблемы ликвидности, в частности, превышение лимитов кредитования, медленное возвращение долгов кредиторам. Если в результате этого поставщики начнут задерживать поставки товаров, то затрудняется долгосрочное планирование, как крайний случай, предприятие подойдет к банкротству, т.к. не может выполнить наступающие обязательства.

Таким образом, для решения проблемы дефицита финансирования необходимо обеспечить постоянное соответствие объема доступного финансирования и объема логистических операций в цепи поставок.

Для оценки уровня дефицита финансирования бизнеса предприятий в цепи поставок используется система коэффициентов, отражающих финансовое состояние предприятий. Необходимо сравнить фактические значения коэффициентов с их обычным уровнем. Попытаемся объяснить это примером при ситуации дефицита финансирования (чрезмерного финансирования) бизнеса, когда при сравнении коэффициентов с их средним значением их уровень оказывается выше или ниже обычного уровня (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение и оценка коэффициентов при дефиците финансирования

№ п/п	Название коэффициента	Интерпретация значения коэффициента
1	Коэффициент текущей ликвидности	Отношение оборотных активов к краткосрочным обязательствам будет ниже обычного. Эта мера ликвидности бизнеса, а именно недостаток ликвидности, является важным симптомом дефицита финансирования
2	Средний период оборота товарно-материальных запасов (ТМЗ)	Средний период оборота ТМЗ будет меньше обычного. Если бизнес испытывает нехватку финансирования, уровень хранимых запасов будет ниже из-за проблем, связанных с их финансированием. В течение короткого периода низкий уровень ТМЗ и производственных запасов может не сказаться отрицательно на продажах и, следовательно, запасы будут оборачиваться быстрее.
3	Средний период расчетов с дебиторами	Средний период расчетов с дебиторами может быть меньше обычного. Если предприятие страдает проблемами, связанными с ликвидностью, оно может более решительно требовать от дебиторов оплаты с тем, чтобы увеличить денежные потоки
4	Средний период расчетов с кредиторами	Средний период расчетов с кредиторами может быть больше обычного. Предприятие может попытаться отсрочить платежи с кредиторами в связи с наступающими проблемами ликвидности

На основе коэффициентов можно определить зарождающиеся тенденции (тренды), намечающиеся в компании. Источником для определения коэффициентов могут быть данные опубликованных отчетов предприятий, включаемых в цепочки поставок. Таким образом, коэффициенты используются как полезный инструмент выявления тенденций конкретного бизнеса, сравнения предприятий-контрагентов по сделкам в цепях поставок и степени, в которой эти тенденции совпадают с тенденциями в отрасли в целом, что связано с выбором и деятельностью предприятий в цепочке, в том числе выполняющих логистические функции и операции. Кроме того, финансовые коэффициенты могут быть использованы и для предсказания будущих финансовых затруднений. Приведем пример трендового анализа условной компании (рис. 1-3.).

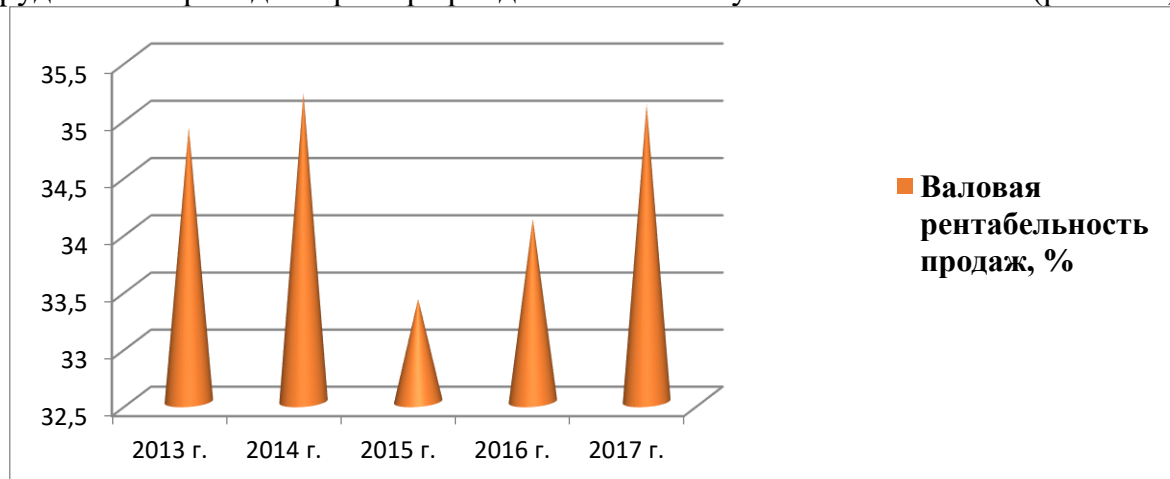


Рис. 1. Валовая рентабельность продаж, %

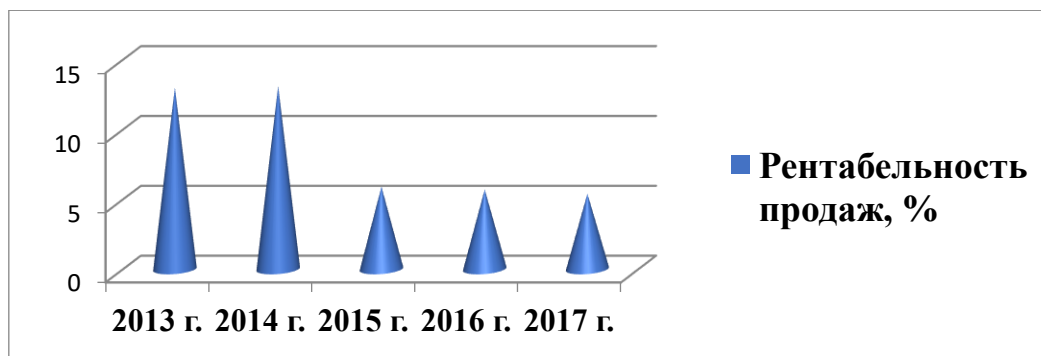


Рис. 2. Рентабельность продаж, %

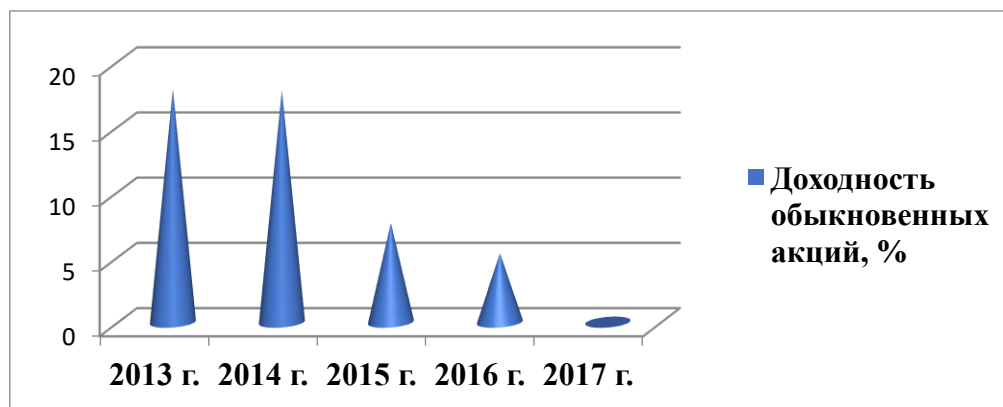


Рис. 3. Доходность обыкновенных акций, %

На основе анализа данных таблицы можно сделать вывод, что происходит заметное снижение благосостояния предприятия. Такой анализ можно выполнять по каждому предприятию, вступающему в цепь поставок, и учитывать это при заключении сделок, например, при поиске и оценке поставщика, аутсорсинге и т.д.

Управление денежными средствами связано с определенными издержками (как для слишком большой, так и слишком маленькой суммы).

Поэтому возникает необходимость постоянного планирования и мониторинга величины денежных средств, особенно координации денежных потоков снабжения и сбыта. Важность аспекта рационализации управления подчеркивается в статье [3]: «Сбыт есть основной канал поступления на предприятие денежных средств, предназначенных на закупку материальных ресурсов, отсюда возникает необходимость коммерческой координации снабжения и сбыта».

Таким образом, выстраивание новых, более эффективных транспортных и логистических цепочек, а также совершенствование действующих цепочек требует важнейших решений по рационализации управления потоками ресурсов, прежде всего, финансовых, включает вопросы согласования снабжения и сбыта каждого участника товародвижения. Целью рационализации должны стать снижение транспортных затрат, готовность поставки, сокращение времени поставки клиенту.

Библиографический список

1. Дыбская В.В., Сергеев В.И. Цифровая логистика и управление цепями поставок: перспективы развития / Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. 12, 13 апреля 2018 г.: Ч. 1: мат. докл. / ред. кол.: В.С. Лукинский (отв. ред.) и др. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. – 356 с. С. 5-11.
2. Глушкова Ю.О., Гордашникова О.Ю., Пахомова А.В. Влияние фактора времени на транспортное обслуживание международной цепи поставки // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2017. № 6 (58). С. 23-30.
3. Плоткин Б.К. От материально-технического снабжения к логистике и обратно // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. 12, 13 апреля 2018 г.: Ч. 2: мат. докл. / ред. кол.: В.С. Лукинский (отв. ред.) и др. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. С. 24-28.

УДК 004.853

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРСОНАЛА ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Т.Б. Чистякова*, А.С. Дудырев**

** Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
кафедра систем автоматизированного проектирования и управления,
Россия, Санкт-Петербург, nov@technolog.edu.ru*

*** Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
кафедра высокоэнергетических процессов,
Россия, Санкт-Петербург, hprocess@technolog.edu.ru*

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки компьютерных тренажеров, позволяющих осуществлять изучение современного промышленного оборудования и обучение управлению потенциально-опасными технологическими процессами на базе имитационных математических моделей. Преимущества использования компьютерных тренажеров при подготовке управленческого производственного персонала заключаются в приобретении опыта и навыков поведения в аварийных ситуациях, глубокого понимания причинно-следственных связей в объекте, быстрой реакции на неполадки, снижения психологической перегрузки, увеличения уверенности и самостоятельного решения задач управления. Повышение профессионального уровня управленческого производственного персонала позволяет улучшить качество продукции, снизить брак, уменьшить простои оборудования, а также повысить уровень безопасности потенциально-опасных производств.

Ключевые слова: компьютерные тренажеры, математическое моделирование, системы управления, аварийные ситуации.

COMPUTER SIMULATORS FOR TRAINING MANAGEMENT MANUFACTURING PERSONNEL OF POTENTIALLY DANGEROUS CHEMICAL PRODUCTION

T.B. Chistyakova*, A.S. Dudyrev**

** St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
Computer design and control Department,
St. Petersburg, Russia, nov@technolog.edu.ru*

*** St. Petersburg State Technological Institute (Technical University),
Department of high-energy processes,
St. Petersburg, Russia, hprocess@technolog.edu.ru*

Abstract. The article describes the questions of the development of computer simulators that allow the study of modern industrial equipment and training in the management of potentially dangerous technological processes on the basis of simulation mathematical models. The advantages of using computer simulators in the preparation of managerial production personnel are to gain experience and skills in emergency situations, a deep understanding of cause-effect relationships in an object, a quick response to problems, a reduction in psychological overload, increased confidence and self-management of tasks. Improving the professional level of managerial production personnel can improve product quality, reduce scrap, reduce equipment downtime, and increase the level of safety of potentially hazardous industries.

Keywords: computer simulators, mathematical modeling, control systems, emergency situations.

Тенденции развития современной химической промышленности показывают, что большинство из них становятся потенциально-опасными производствами, в которых возможно возникновение аварий, приводящих к процессу разрушительного высвобождения собственного энергозапаса, при котором все компоненты производства (сырье, оборудование, продукты) создают поражающие факторы для населения, окружающей среды и предприятия. Наиболее приоритетной задачей управления потенциально-опасными производствами является предотвращение, прогноз

нештатных ситуаций, вероятность возникновения которых в связи с интенсификацией производства возрастает.

Анализ тенденций развития химических производств показывает, что управленческому производственному персоналу приходится работать в условиях информационной и психологической перегрузки, поэтому неминуемо возникают ошибки персонала при управлении, приводящие к ухудшению качества продукции, уменьшению прибыли, безопасности, а главное – к возникновению аварий. Анализ статистики аварий крупнейших химических заводов показал, что 26% аварий происходит из-за ошибок оператора (38% – механические поломки, 10% – процессные неполадки). Для безаварийного и эффективного управления потенциально-опасными химическими производствами персоналу необходимо знать все конкретные особенности производства: модели установок и процессов, текущие возмущения, ограничения на управления, причинно-следственные связи в объекте управления, владеть передовым опытом управления в виде неформализованных знаний, уметь своевременно анализировать контролируруемую информацию о ходе производства [1-5].

В связи с этим, задача повышения квалификации и подготовки управленческого производственного персонала является задачей повышения надежности, безопасности и эффективности современных систем управления потенциально-опасными химическими производствами. Для эффективного решения задач обучения необходимо создание таких систем обучения, которые бы интегрировались в современные автоматизированные системы управления, содержали бы многовариантную систему моделирования объекта управления, настраиваемую на верхние уровни управления, позволяющую обучать различные категории управленческого персонала. Разработка таких автоматизированных интеллектуальных обучающих комплексов невозможна без разработки методологии их создания. В этой связи разработка методологии создания автоматизированных систем обучения персонала управлению потенциально-опасными химическими производствами является актуальной, научной и экономически значимой задачей [6].

Наиболее перспективными направлениями развития практико-ориентированных обучающих систем (компьютерных тренажеров) являются:

- создание тренажерных технологий (технологий автоматизированного синтеза тренажерно-обучающих комплексов для проектирования и управления);
- интеграция тренажерных комплексов для обучения управлению в автоматизированные системы управления технологическими процессами и производствами с использованием единой БД промышленных процессов;
- интеграция тренажерных комплексов для обучения проектированию производственных процессов и тренажеров для обучения управлению, построенных на базе имитационных математических моделей (ММ) объектов управления;
- построение распределенных интеллектуальных компьютерных систем для дистанционного обучения проектированию и управлению удаленными установками.

Решение поставленных задач позволило выработать единую методологию и разработать технологии автоматизированного синтеза интеллектуальных практико-ориентированных обучающих комплексов для потенциально-опасных химических производств с использованием современных информационных и сетевых технологий.

Первым этапом реализации указанных направлений является разработка формализованного описания производства как объекта изучения (ОИ) на базе структурно-лингвистической модели представления знаний об объекте, описываемой в виде фрейма-прототипа (рис. 1), компонентами которого являются списки атрибутов

Q и их характеристик A : $Fr ::= \langle \text{ОИ}, Q, A \rangle$, $Q = \{q_1, \dots, q_9\}$, $A = \{a_{1.1}, \dots, a_{9.2}\}$, где q_1 – иерархический уровень (аппарат, поток, стадия, процесс в целом); q_2 – особенности аппаратно-технологического оформления (характер протекания процесса во времени, особенности структуры потоков, типы оборудования); q_3 – режимы функционирования (аварийные, предаварийные, эксплуатационные, оптимальные); q_4 – характеристика режимов функционирования в зависимости от производительности; q_5 – характеристика режимов функционирования в зависимости от состава сырья; q_6 – характеристика качества целевой продукции; q_7 – характеристика контролируемых и неконтролируемых возмущающих воздействий; q_8 – характеристика технологических параметров объекта; q_9 – характеристика системы отображения информации.



Рис.1. Информационная структура фрейма-прототипа объекта изучения

Задача построения формализованного описания конкретного производства как объекта изучения состоит в переходе от фрейма-прототипа к фрейму-объекту, то есть к разработке конкретных описаний характеристик атрибутов фрейма Fr . Синтез такого описания позволяет реализовать весь жизненный цикл практико-ориентированных обучающих систем для проектирования и управления потенциально-опасными химическими производствами на базе производственно-фреймовых технологий. По этой методике [6] разработаны фреймы-объекты описания процессов нитрования, полимеризации, каталитического риформинга, коксования, производств субстанций лекарственных препаратов, сорбентов и катализаторов, полимерных пленок, фуллеренов, высокотемпературных материалов и изделий, подтвердившие адекватность и универсальность структурно-классифицированного описания, возможность адаптации систем в зависимости от отличительных признаков объектов изучения [7, 8].

В соответствии с разработанной методологией сквозного проектирования практико-ориентированных обучающих систем формализованное описание объекта изучения является основой для автоматизированного синтеза с использованием современных информационных технологий ядра компьютерных тренажерно-обучающих комплексов (рис. 2), которое включает многовариантные, адаптивные к переменным характеристикам объекта изучения модели описания объекта и стратегии обучения.

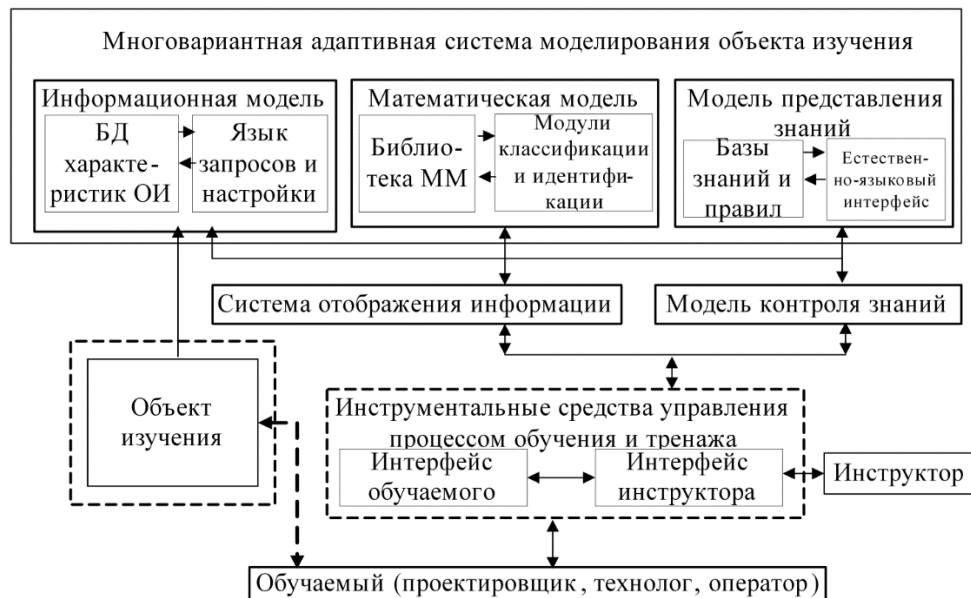


Рис. 2. Функциональная структура тренажерно-обучающего комплекса

Для обучения проектированию и управлению высокотехнологичными производствами используются информационные модели, имитационные ММ и модели представления знаний (МПЗ).

Информационные модели реализуются в виде БД геометрических моделей и конструктивных характеристик производственных агрегатов, технологических параметров процессов, характеристик сырьевых материалов и целевой продукции. БД настраиваются на различные структуры объекта изучения, режимы его функционирования, производительность, состав сырья и качество продукции на основе динамического изменения диапазонов соответствующих параметров. Это обеспечивает адаптацию разрабатываемых тренажерно-обучающих комплексов на различные модификации объектов изучения, что позволяет интегрировать их в автоматизированные системы проектирования и управления технологическими производствами.

Имитационные ММ обеспечивают возможности активного обучения при решении различных задач обучения: обучение управлению в нештатных ситуациях, при перенастройке производства на новое задание по сырью и производительности, изучение способов и задач оптимального управления, изучение причинно-следственных связей в объекте, обучение структурному и параметрическому синтезу объекта изучения и осуществление поверочных расчетов спроектированных объектов. Для разработки системы имитационного моделирования объекта изучения необходимы распознавание и обработка событий. При моделировании события S описываются место возникновения события, момент системного времени, при котором возникает событие t , параметр объекта V , определяющий событие и его пороговое ограничения L .

$$C^j = \{t\} \Big|_{V_j \leq v_j^t},$$

где $V = \{X, U, Y\}$ – вектор технологических параметров объекта, соответственно: X – входных, U – управляющих, Y – выходных; j – индекс принадлежности к месту возникновения события (иерархическому уровню – потоку, аппарату, стадии, процессу). События (ситуации) могут быть смоделированы двумя способами:

- на основе множества параметров информационной модели:

$$\bullet M^I C = \{V, t\} \Big|_{V_j \leq v_j^t};$$

- с использованием решения имитационных моделей:

$$M^C = F(V, K, t) \Big|_{V_j \leq V_j^L},$$

где K – вектор коэффициентов имитационной модели.

Число событий в объекте изучения заданного иерархического уровня определяется числом сочетаний пороговых ограничений технологических параметров объекта управления и числом параметров, для которых установлены ограничения:

$$N_C = N_V^{\sum_{j=1}^K N_{Lj}},$$

где N_C – число событий, N_V – число параметров, N_{Lj} – число пороговых ограничений j -ого параметра объекта.

Для решения задачи синтеза тренажерных ММ разработаны: библиотеки базовых ММ, описывающих функционирование объектов изучения в номинальном режиме (допустимом по регламенту), библиотеки настраиваемых модулей типовых нарушений объекта в эксплуатационных и аварийных ситуациях, библиотеки методов решения при реализации различных стратегий обучения. Разработаны библиотеки ММ для различных объектов изучения: процесса нитрования, каталитического риформинга, эмульсионной полимеризации, получения синтетического каучука изопренового, экструзии и каландрования полимерных материалов, производства карбида кальция, фосфора, сорбционно-каталитических материалов, высокотемпературных огнеупорных материалов, твердых сплавов [9-11].

Для изучения экспертных знаний, способов устранения нештатных ситуаций, передового опыта по способам безаварийного и эффективного управления и формирования интеллектуальных советов по проектированию и управлению потенциально-опасными химическими производствами в процессе обучения в структуру тренажеров интегрируются модели представления неформализованных знаний об объекте изучения. Для синтеза автоматизированных подсистем представления декларативных и процедурных знаний использованы инструментальные средства объектно-ориентированного программирования, оболочки экспертных систем, языки представления знаний. На основании анализа нештатных ситуаций, аварий потенциально-опасных производств процессов нитрования, коксования, полимеризации, риформинга (более 100 ситуаций, 300 причин) предложена классификация ситуаций, причин их возникновения, являющаяся основой продукционно-фреймовой процедуры синтеза тренажерных моделей для обучения персонала управлению в нештатных ситуациях, заключающаяся с сопоставлении классификационных признаков причин типовых нарушений и типов моделей и на основе этого выбора структуры и параметров модели.

Внедрение разработанных систем обучения в учебные центры и производство (ПАО «Северсталь», ООО «Клекнер Пентапласт Рус», ОАО «СК-Премьер», ПАО «Нижекамскнефтехим») показало, что повышение эффективности потенциально-опасных производств химической технологии (нитрования, коксования, полимеризации, каталитического риформинга и др.) достигнуто за счет улучшения характеристик функционирования объекта (повышение уровня безопасности, уменьшение простоев оборудования, повышение качества продукции, повышение выпуска продукции, сохранение окружающей среды) совершенствование системы управления (создание интегрированных систем управления и обучения, интеллектуальных советчиков по управлению, применения и изучения методов поиска оптимальных управлений), повышение профессионального уровня производственного

персонала (приобретения опыта и навыков поведения в аварийных ситуациях, глубокого понимания причинно-следственных связей в объекте, быстрой реакции на неполадки, снижения психологической перегрузки, увеличения уверенности, самостоятельного решения задач управления).

Библиографический список

1. Chistyakova T. B. Intelligence computer simulators for elearning of specialists of innovative industrial enterprises / T. B. Chistyakova, I. V. Novozhilova // Proceedings of the XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2016). – SPb. : SPb Electrotechn. Univ., 2016. P. 329-332.
2. Burkov E. A., Lyubkin P. L. and Paderno P. I., “Intellectual systems - the future of expert assessment,” 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg. 2017. pp. 34-36. doi: 10.1109/SCM.2017.7970487
3. Дозорцев В.М. Мировой рынок компьютерных тренажеров для обучения операторов: тенденции, вызовы, прогнозы // Автоматизация в промышленности. 2016. № 2. С. 47-50.
4. Аракелян Э.К., Андрушин А.В., Бурцев С.Ю. Использование компьютерных тренажеров для проведения модельных исследований в энергетике // Вестник Московского энергетического института. 2015. № 2. С. 50-55.
5. Чистякова Т. Б. Об опыте обучения производственного персонала инновационных промышленных предприятий. Портал машиностроения. URL: <http://mashportal.ru/career-26813.aspx> (дата обращения 16.10.2012).
6. Чистякова Т. Б. Информационные технологии синтеза компьютерных тренажеров для химических производств // Изв. С.-Петерб. гос. технол. ин-та (техн. ун-та). 2007. № 1. С. 90–95.
7. Чистякова Т. Б., Полосин А. Н., Гольцева Л. В. Математическое моделирование химико-технологических объектов с распределенными параметрами : учеб. пособие для вузов. СПб. : ЦОП «Профессия». 2010. 240 с.
8. Чистякова Т. Б., Бойкова О. Г., Чистяков Н. А. Интеллектуальное управление многоассортиментным коксохимическим производством. СПб. : ЦОП «Профессия». 2010. 187 с.
9. Бойкова О.Г., Коломьцев А.Д., Полонина К.В., Чистякова Т.Б. Синтез виртуального тренажера для обучения управлению коксовой батареей // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2017. Т. 10. С. 138-142.
10. Ершова О.В., Полякова А.М., Чистякова Т.Б. Компьютерные тренажерные комплексы для обучения персонала управлению процессами электрохимических производств // Автоматизация в промышленности, 2013. № 12. С. 40-46.
11. Коваленко Е.П., Дудырев А.С., Сусла А.П. Получение новых тугоплавких керамических материалов в режиме терморегулируемого высокотемпературного синтеза // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2013. № 20 (46). С. 019-021.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ТРЕНДОВ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. Полосин, В.Р. Локтев

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Россия, Санкт-Петербург, polosin-1976@mail.ru*

Аннотация. Описан программный комплекс, который позволяет рассчитать производительность и энергопотребление экструдера, показатели качества экструдированного полимерного материала в зависимости от управляющих воздействий, изменяющихся во времени, и построить тренды характеристик процесса экструзии для заданного временного периода. Комплекс включает подсистему моделирования экструзии, банк данных параметров экструдеров и полимеров, модуль построения трендов характеристик процесса, интерфейс оператора. Он настраивается на конфигурацию и геометрические параметры экструдера, тип материала. Применение комплекса в системе управления качеством продукции позволяет повысить информационную мощность объекта управления и определить параметры процесса, изменение которых приводит к отклонению показателей качества от задания.

Ключевые слова: программный комплекс, математическое моделирование, базы данных, тренды, качество экструдата, осциллирующие экструдеры, полимерные материалы.

SOFTWARE SOLUTION FOR CALCULATION AND CREATION OF TRENDS FOR CHARACTERISTICS OF POLYMERIC MATERIAL EXTRUSION

A.N. Polosin, V.R. Loktev

*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University),
Russia, Saint-Petersburg, polosin-1976@mail.ru*

Abstract. Software solution has been described that allows us to calculate throughput and energy consumption of an extruder, the quality indices of extruded polymeric material depending on controlling actions that vary over time, and to create trends of extrusion characteristics for a given time period. The software solution includes extrusion modeling subsystem, data bank of extruders and polymer parameters, module for creation of the process characteristic trends, extruder operator interface. It is adjusted according to configuration and geometrical parameters of the extruder, type of polymeric material. Using the software solution in the product quality control system enables increasing information capacity of the control object and determining process parameters, change of which leads to deviation of the quality indices from production task.

Keywords: software solution, mathematical modeling, data bases, trends, extrudate quality, reciprocating extruders, polymeric materials.

Производства полимерных пленок (ПП) на экструзионных и экструзионно-каландровых линиях характеризуются многостадийностью, многотоннажностью (производительность составляет 1000 кг/ч и более), широким ассортиментом продукции, гибкостью аппаратурно-технологического оформления, сложностью протекающих физических процессов, большим числом (более 200) контролируемых технологических параметров, показателей качества ПП и сложными связями между ними, высокой энергоемкостью. Частые переходы линий на новые типы ПП и производительность, неполнота информации, вызванная отсутствием системы мониторинга показателей качества полимерного материала (ПМ) на всех стадиях производства (в частности, показателей качества экструдата, из которого изготавливается ПП), недостаточный производственный опыт операторов приводят к принятию ошибочных решений по перенастройке линий и управлению качеством ПП. В результате увеличивается доля бракованной ПП, характеризующейся наличием дефектов, основными из которых являются черные точки, деструкционные полосы, включения нерасплавленного ПМ, гелики, отклонения цвета от эталона. Невозвратные отходы являются причиной значительных экономических потерь и снижения конкурентоспособности производства.

При изготовлении ПП на экструзионно-каландровых линиях для компенсации возмущения, связанного с колебаниями запаса экструдата в питающем зазоре каландра, путем изменения частоты вращения шнека постоянно корректируется производительность

экструдера. В производстве цветных ПП это приводит к отклонению цветовых характеристик экструдата (а значит, и ПП) от эталонных значений и требует постоянной коррекции управляющих воздействий (расходов жидких красителей, подаваемых в экструдер) в зависимости от производительности, которая не измеряется.

Получение недостающей информации о состоянии объекта управления, необходимой для управления качеством ПП, возможно при использовании физически обоснованных математических моделей (ММ), которые описывают процессы, протекающие на стадиях производства, и выступают в роли виртуальных датчиков, позволяя рассчитать характеристики производства, информация о которых отсутствует. Такой подход наряду с применением методов интеллектуального анализа производственных данных обеспечивает комплексную оценку качества ПП, что повышает эффективность управления качеством [1]. Поэтому актуальна разработка программного комплекса (ПК), позволяющего на базе ММ ключевой стадии производства ПП – стадии подготовки экструдата – рассчитывать характеристики процесса экструзии в зависимости от управляющих воздействий, изменяющихся во времени, и строить их тренды для заданных периодов времени с целью анализа причинно-следственных связей.

Анализ стадии экструзии в современных производствах многоассортиментных ПП показал, что переработка ПМ типа T_{polym} , характеризующегося свойствами P_{polym} , реализуется в экструдерах различных типов T_{extrud} , отличающихся числом и характером движения шнеков (одношнековые, осциллирующие, двухшнековые) и взаимодействующих с формующими головками различных типов T_{die} . На рис. 1 представлено информационное описание процесса экструзии как объекта управления.

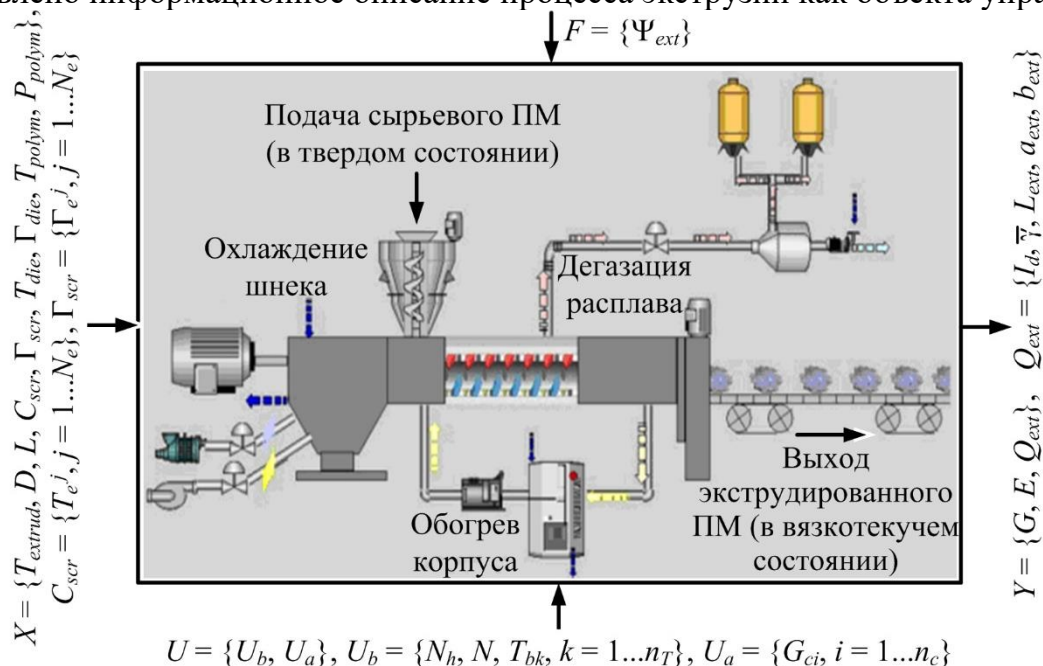


Рис. 1. Информационное описание процесса экструзии как объекта управления

Шнек экструдера диаметром D и длиной L имеет модульную конфигурацию $C_{scr} = \{T_e^j, j = 1 \dots N_e\}$ и набирается из элементов различных типов T_e (N_e – число элементов). Каждый j -ый элемент шнека характеризуется геометрическими параметрами Γ_e^j . Формующая зона головки имеет геометрические параметры Γ_{die} . Основными управляющими воздействиями на процесс U_b являются частоты вращения шнека загрузочного устройства N_h и шнека экструдера N , температуры тепловых зон корпуса $T_{bk}, k = 1 \dots n_T$ (n_T – число тепловых зон). В случае производства цветной ПП требуются дополнительные управляющие воздействия U_a – расходы жидких красителей $G_{ci}, i = 1 \dots n_c$ (n_c – число красителей различных цветов). Основным возмущением процесса F являются колебания запаса экструдата Ψ_{ext} , приводящие к

отклонению цвета экструдата от эталона. Выходные параметры Y – производительность G и удельное энергопотребление E экструдера, качество экструдата Q_{ext} – на производстве не измеряются. Оператором осуществляется лишь субъективная визуальная оценка внешнего вида экструдата, зачастую приводящая к неправильным управленческим решениям. Для количественной оценки качества экструдата предложены индекс термической деструкции I_d , средняя степень смешения $\bar{\gamma}$, цветовые координаты (в пространстве CIE Lab) L_{ext} , a_{ext} , b_{ext} и отклонение цвета ΔE_{ext} от эталонного, характеризуемого координатами L_{ext}^* , a_{ext}^* , b_{ext}^* .

Задача заключается в разработке ПК, который позволяет для заданной оператором экструдера марки $M_{extrud} = \{T_{extrud}, D, L, T_{die}\}$ и конфигурации шнека C_{scr} экструдера, типа ПМ T_{polym} , требований к выходным параметрам процесса $Y_0 = \{G_0, E^{max}, I_d^{max}, \gamma^{min}, L_{ext}^*, a_{ext}^*, b_{ext}^*, \Delta E_{ext}^{max}\}$ и периода времени $[t_0; t_{max}]$:

- на основе базы данных (БД) контролируемых технологических параметров процесса построить тренды управляющих воздействий $U = FU(t)$, $t \in [t_0; t_{max}]$;

- рассчитать по ММ экструзии и построить тренды производительности $G = f_G(t + \bar{t})$, энергопотребления $E = f_E(t + \bar{t})$, показателей качества экструдата $Q_{ext} = F_{Q_{ext}}(t + \bar{t})$, $t \in [t_0; t_{max}]$ в зависимости от управляющих воздействий $U = FU(t)$;

- отобразить на трендах предельно допустимые значения выходных параметров, где \bar{t} – среднее время пребывания ПМ в экструдере, с.

Созданный ПК включает подсистему моделирования экструзии, информационную подсистему, модуль построения трендов, интерфейс оператора (рис. 2).

Сложность процесса экструзии и зависимость части показателей качества экструдата от времени пребывания ПМ в экструдере требуют применения комплексного подхода к моделированию процесса. Он основан на использовании статической ММ для расчета распределений параметров состояния твердой фазы и расплава ПМ по каналу шнека, производительности и энергопотребления экструдера, индекса деструкции и степени смешения экструдата и динамической ММ для расчета среднего времени пребывания ПМ в экструдере [2]. Множество типов и аппаратная гибкость (перенастраиваемая, модульная конфигурация шнеков) промышленных экструдеров приводят к необходимости реализации процедуры структурного синтеза статической и динамической ММ. Структурный синтез статической ММ заключается в компоновке ММ движения, плавления и перемешивания ПМ в каналах элементов шнека экструдера за данного типа в соответствии с заданной конфигурацией шнека и компоновкой, построенной ММ движения, плавления и перемешивания ПМ в канале шнека с ММ течения расплава ПМ в формирующей зоне экструзионной головки заданного типа. При компоновке обеспечивается выполнение условий сопряжения ММ, заключающихся в равенстве параметров состояния фаз ПМ на выходе из канала j -ого элемента соответствующим параметрам состояния на входе в канал $(j+1)$ -ого элемента. Библиотека ММ движения, плавления и перемешивания ПМ в каналах элементов шнеков включает ММ для элементов шнеков одношнековых, осциллирующих и двухшнековых (с односторонним и встречным вращением шнеков) экструдеров. Библиотека ММ экструзионных головок включает ММ плоскощелевых, кольцевых головок и фильер. Параметрическая настройка ММ осуществляется определением параметров, входящих в векторы scr , die , P_{polym} (из БД геометрических параметров экструдеров и параметров свойств ПМ), а также коэффициентов реологической модели ПМ и коэффициентов тепловой модели процесса (из библиотеки настраиваемых коэффициентов ММ).

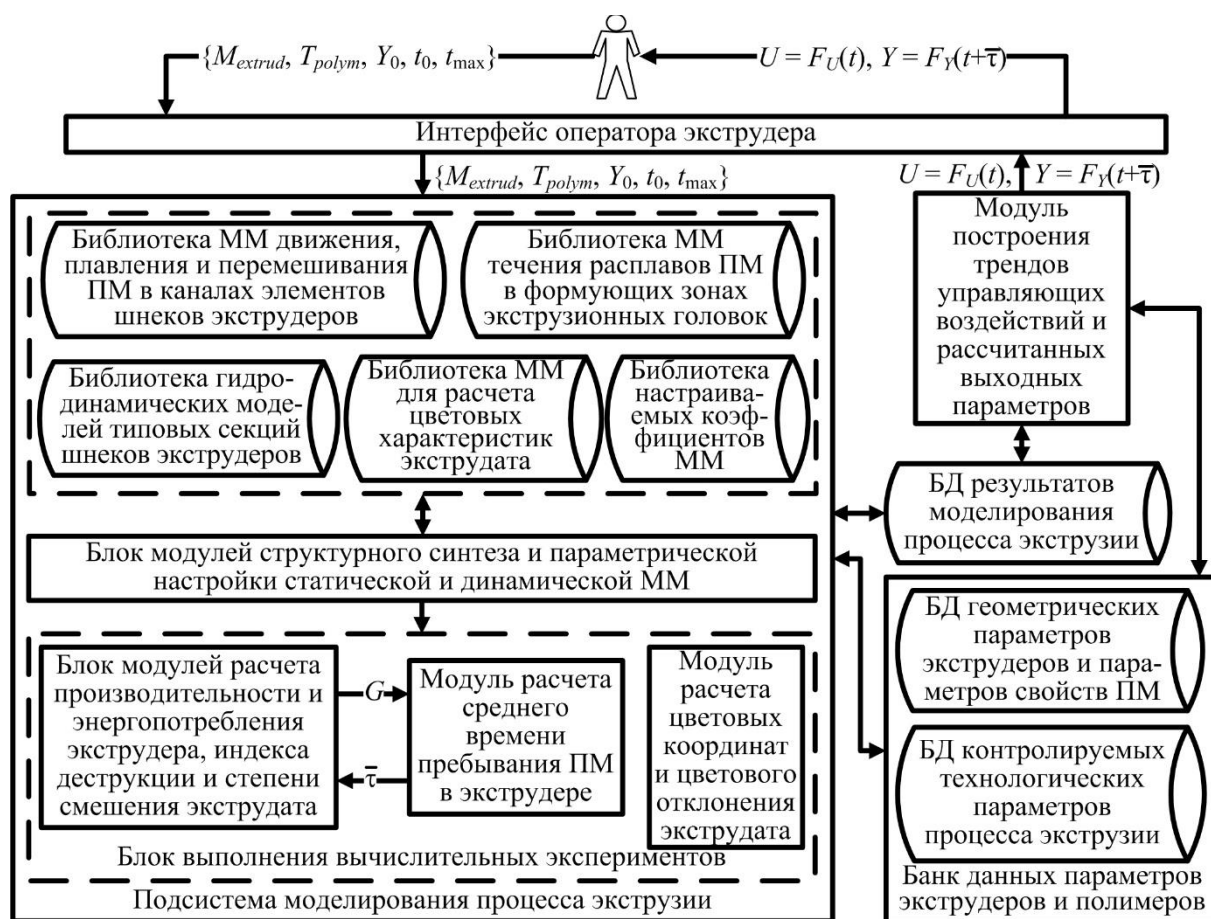


Рис. 2. Функциональная структура ПК для расчета и построения трендов характеристик процесса экструзии ПМ

Из БД контролируемых технологических параметров процесса для заданного периода времени $[t_0; t_{max}]$ формируется массив значений каждого из управляющих воздействий U . В каждый момент времени в зависимости от текущих значений управляющих воздействий по синтезированной ММ рассчитываются распределения параметров состояния твердой фазы (объемная доля, давление, температура) и расплава (скорости потоков, давление, температура, вязкость) ПМ, производительность и энергопотребление экструдера. Расчет распределений параметров состояния осуществляется с использованием методов теории плоских несимметричных потоков и конечных разностей [3]. Для расчета производительности реализована итерационная процедура, которая заключается в варьировании расхода потока ПМ через экструдер до выполнения условия сопряжения шнека и головки, определяющего равенство (в пределах допустимой погрешности) давления расплава ПМ на выходе из канала шнека его давлению на входе в формующую зону головки. Значение расхода, при котором выполняется условие сопряжения, определяет производительность экструдера $G = \psi_1(D, L, \Gamma_{scr}, \Gamma_{die}, P_{polym}, N, T_{bk}, k = 1 \dots nT)$. Расчет среднего времени пребывания $\bar{\tau} = \psi_2(D, L, \Gamma_{scr}, P_{polym}, N_h, N, G)$, от которого зависят индекс деструкции I_d и степень смешения $\bar{\gamma}$, осуществляется по динамической модели, синтезируемой из гидродинамических моделей, описывающих движение ПМ в секциях шнека, составленных из элементов одного типа. Библиотека гидродинамических моделей включает модель идеального вытеснения (для описания секций из элементов с непрерывной нарезкой), модель идеального смешения (для описания секций из смесительных элементов), ячеечную модель (для описания секций из транспортных элементов). Для учета осевого перемешивания, вызываемого утечками, модели секций охватываются рециклами.

На основе времени пребывания, параметров состояния, производительности вычисляются текущие (для заданного момента времени) значения показателей качества:

$$I_d = (\bar{\tau}/\tau_{eq}) \cdot \exp \left\{ E_d \cdot (T_{ext} - T_{eq}) / \left[8,31 \cdot (T_{ext} + 273,15) \cdot (T_{eq} + 273,15) \right] \right\} \cdot 100 ;$$

$$\bar{\gamma} = \bar{\tau} \cdot \sum_{j=1}^{N_e} \left\{ (1/Z^j) \cdot \int_{z^{j-1}}^{z^j} \left[\frac{1}{(H^j \cdot W^j)} \right] \cdot \int_0^{H^j} \int_0^{W^j} \sqrt{(\partial v_{mx}^j / \partial y)^2 + (q-1) \cdot (\partial v_{mz}^j / \partial x)^2 + (\partial v_{mz}^j / \partial y)^2} dx dy \right\} dz$$

$$L_{ext} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_i \cdot k_i + \sum_{i,l=1,i \neq l}^{n_c} \alpha_{il} \cdot k_i \cdot k_l + \sum_{i=1}^{n_c} \alpha_{ii} \cdot k_i^2, a_{ext} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n_c} \beta_i \cdot k_i + \sum_{i,l=1,i \neq l}^{n_c} \beta_{il} \cdot k_i \cdot k_l + \sum_{i=1}^{n_c} \beta_{ii} \cdot k_i^2,$$

$$b_{ext} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n_c} \lambda_i \cdot k_i + \sum_{i,l=1,i \neq l}^{n_c} \lambda_{il} \cdot k_i \cdot k_l + \sum_{i=1}^{n_c} \lambda_{ii} \cdot k_i^2, \Delta E_{ext} = \sqrt{(L_{ext}^* - L_{ext})^2 + (a_{ext}^* - a_{ext})^2 + (b_{ext}^* - b_{ext})^2},$$

где τ_{eq} , T_{eq} – время (с) и температура (°C) начала изменения цвета ПМ вследствие его деструкции; E_d – энергия активации деструкции, Дж/моль; T_{ext} – температура экструдата (температура ПМ на выходе из канала шнека), °C; Z^j – длина канала j -ого элемента, м; z^{j-1} , z^j – координаты входа и выхода из канала, м; H^j , W^j – глубина и ширина канала, м; v_{mx}^j , v_{mz}^j – скорости циркуляционного и поступательного потоков расплава ПМ, м/с; x , y , z – координаты по ширине, глубине и длине канала шнека, м; α_0 , α_i , α_{jl} , α_{ji} , β_0 , β_i , β_{jl} , β_{ji} , λ_0 , λ_i , λ_{jl} , λ_{ji} – коэффициенты, полученные обработкой результатов активных производственных экспериментов методом наименьших квадратов и зависящие от типа ПМ; $k_i = G_{ci}/G$ – доля расхода i -ого красителя в производительности.

Массивы рассчитанных для периода времени $[t_0; t_{max}]$ значений выходных параметров Y сохраняются в БД результатов моделирования, из которой передаются в модуль построения трендов и визуализируются на интерфейсе в виде графиков зависимостей выходных параметров от времени с отображением их предельно допустимых значений Y_0 (рис. 3). При этом осуществляется сдвиг вперед по времени (на величину $\bar{\tau}$) трендов выходных параметров относительно трендов управляющих воздействий.

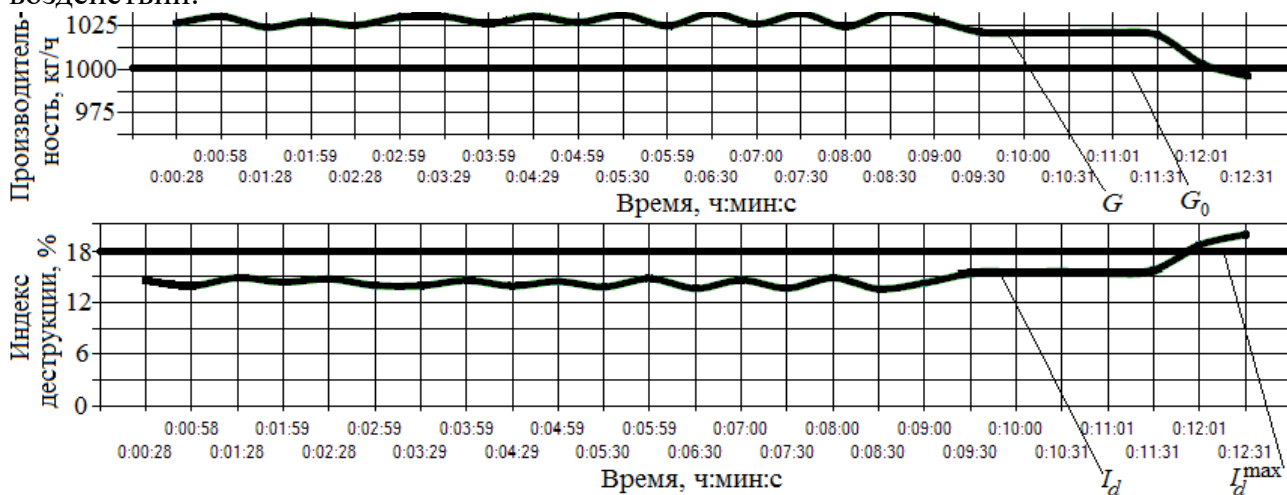


Рис. 3. Тренды выходных параметров процесса переработки поливинилхлорида в осциллирующем экструдере
Тестирование ПК по данным одношнековых, осциллирующих экструдеров в производствах полиэтиленовых, поливинилхлоридных пленок подтвердило его работоспособность. Результаты, формируемые ПК, позволяют проводить анализ причинно-следственных связей в объекте, выявлять причины нарушения качества экструдата.

Таким образом, созданный ПК является гибким, эффективным инструментом трендового анализа процессов экструзии в производствах многоассортиментных ПП.

Библиографический список

1. Чистякова Т. Б., Тетерин М. А. Алгоритм интеллектуального анализа больших данных и управления качеством полимерных материалов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2017. № 40. С. 94-101.
2. Polosin A. N., Chistyakova T. B. Mathematical modeling for resource and energy saving control of extruders in multi-assortment productions of polymeric films [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, iss. 3. 032104. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032104/pdf>.
3. Чистякова Т. Б., Полосин А. Н., Гольцева Л. В. Математическое моделирование химико-технологических объектов с распределенными параметрами. СПб. : ЦОП «Профессия», 2010. 239 с.

ОБ ОДНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНОЙ АНИМАЦИИ ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО САЙТА С ПРИМЕНЕНИЕМ CREATEJS

И.Р. Лукьянович¹, А.А. Холод², А.С. Петерсон¹

¹Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, mechani@rambler.ru

²Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, kramzolya@tut.by

³Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, alexkwon@tut.by

Аннотация. Рассмотрены возможности и особенности рефакторинга образовательного веб-сайта по начертательной геометрии, который использует программную анимацию на фронтенде. Смена программного обеспечения и технологий разработки анимации предполагает существенную переработку ресурса, как на клиентской стороне, так и на программно-аппаратной части сервиса. Результатом работы является адаптивный, администрируемый online ресурс по начертательной геометрии.

Ключевые слова: веб-дизайн, программная анимация, образовательный сайт, начертательная геометрия.

ONE IMPLEMENTATION OF PROGRAM ANIMATION FOR EDUCATIONAL SITE WITH THE USE OF CREATEJ

I.R. Lukyanovich¹, A.A. Kholod², A.S. Peterson¹

¹Belarusian state university, Belarus, Minsk, mechani@rambler.ru

²Belarusian state university, Belarus, Minsk, kramzolya@tut.by

³Belarusian state university, Belarus, Minsk, alexkwon@tut.by

Abstract. The possibilities and features of the refactoring of the educational website for descriptive geometry, which uses software animation on the frontend, are considered. The change of software and animation development technologies implies a substantial processing of the resource, both on the client side and on backend. The result of the work is an adaptive, administered online resource on descriptive geometry.

Keywords: web design, software animation, educational site, descriptive geometry.

«Начертательная геометрия» – это образовательный Интернет-ресурс [1], который разрабатывался для сопровождения лекционных занятий и самостоятельной работы в помощь студентам инженерных и технических специальностей, где изучается начертательная геометрия. Данный ресурс многократно перерабатывался, однако требуется его кардинальный рефакторинг в связи с обсуждаемыми недостатками Flash-технологии [2], которая содержится в основе разработки. Современная политика компаний, связанных с разработкой браузеров, ограничивает использование Flash-технологии, что, в свою очередь, затрудняет доступ к сайту. Кроме этого, сайты, разработанные с использованием Flash, имеют плохое индексирование в поисковых машинах, что не позволяет в полной мере применять возможности для их оптимизации. В связи с этими недостатками принято решение провести полный рефакторинг сайта.

Рефакторинг сайта по начертательной геометрии предполагает решение следующих задач: разработать ролики, иллюстрирующие решение типовых задач из курса начертательной геометрии на основе , библиотеки CreateJS; создать плеер, реализующий прямую и обратную «пошаговую» перематку содержимого этих роликов; обновить дизайн в соответствии с современными тенденциями; сверстать веб-страницы в соответствии с новым дизайном; спроектировать базу данных на основе анализа редактируемого контента; обеспечить генерирование страниц сайта; реализовать панель администрирования.

Для разработки использованы следующие программные средства: Animate – предназначен для создания анимационных роликов; Photoshop – для прототипирования и дизайна страниц сайта; язык гипертекстовой разметки HTML и каскадные таблицы стилей CSS; прототипно-ориентированный язык программирования JavaScript с набором модульных библиотек и инструментов CreateJS; объектно-ориентированный

язык программирования PHP с расширением для доступа к базам данных PHP Data Objects (PDO).

Причем, Adobe Animate, разработанная Adobe Systems [3], используется для создания векторной графики и анимации с последующей публикацией в телевизионных программах, онлайн-видео, на веб-сайтах, в веб-приложениях и видеоиграх. Программа также позволяет экспортировать в растровые форматы, форматировать текст, встраивать аудио и видео, создавать программы на ActionScript. Анимации могут быть опубликованы в HTML5, WebGL, SVG, а также в устаревших форматах Flash Player (SWF) и Adobe AIR [4]. Программа поддерживает несколько типов анимации: анимация движения, классическая анимация, анимация формы, покадровая анимация. Для разработки роликов типовых задач наибольший интерес представляет покадровая анимации и анимация движения. Полезным свойством программы Adobe Animate является возможность создания типовых графических элементов, которые можно использовать для проекта или всего каталога. Особенно важным для проекта является возможность экспорта в форматы html и js, что позволяет предотвратить использование формата swf.

При этом, HTML и CSS [5] используются в рамках популярной сегодня методологии БЭМ (Блок, Элемент, Модификатор) — компонентного подхода к веб-разработке, в основе которого лежит принцип разделения интерфейса на независимые блоки [6]. Основные возможности методологии БЭМ: повторное использование кода; простая поддержка и изменение кода при расширении проекта. Элементами блока являются те части, которые не имеют смысла без блока. Элементы по методологии связаны с блоком названием класса. Именования классов элементов отделяются от названия блоков, которым принадлежат, двумя нижними подчеркиваниями. Благодаря БЭМ, не используем идентификаторы, а также избавляемся от необходимости применения селекторов тегов при написании стилей. Стили, имеющие небольшие различия, задаются с использованием модификаторов, которые отделяются от блока или элемента, которому они принадлежат, либо двумя дефисами, либо одним нижним подчеркиванием. Такая система именования позволяет минимизировать вероятность случайного повреждения интерфейса сайта при изменении какого-либо элемента.

Далее, CreateJS – набор модульных библиотек и инструментов, которые работают вместе или независимо, для того, чтобы обеспечить разнообразный интерактивный контент на открытых веб-технологиях через HTML5 [7]. Этот набор библиотек включает в себя: EaselJS – упрощает работу с элементом «canvas» HTML5 и полезна для создания игр, анимационных роликов и других графических элементов; TweenJS – используется для анимации свойств HTML5, JavaScript и интегрируется с EaselJS; SoundJS – предоставляет простой API и функции, для работы со звуком, в частности, в связке с PreloadJS, загружая аудиофайл при предварительной загрузке данных.

Радикальные изменения претерпел дизайн сайта. Для главной страницы ресурса разработана иллюстрация с демонстрацией материалов по начертательной геометрии. Эта иллюстрация является фоновым изображением на главной странице сайта (рис. 1). Главное меню сайта находится в верхнем правом углу. Оно выдержано в черно-белом тоне, справа от каждого пункта меню располагается стрелка в виде треугольника, направленного острым углом вниз. При наведении появляется серый фон пункта меню, ссылка окрашивается в синий цвет. Выпадает список, по краям которого имеется тень (см. рис. 2).

В мобильной версии сайта меню «прячется» под иконкой гамбургера, что на является общепринятым обозначением меню.

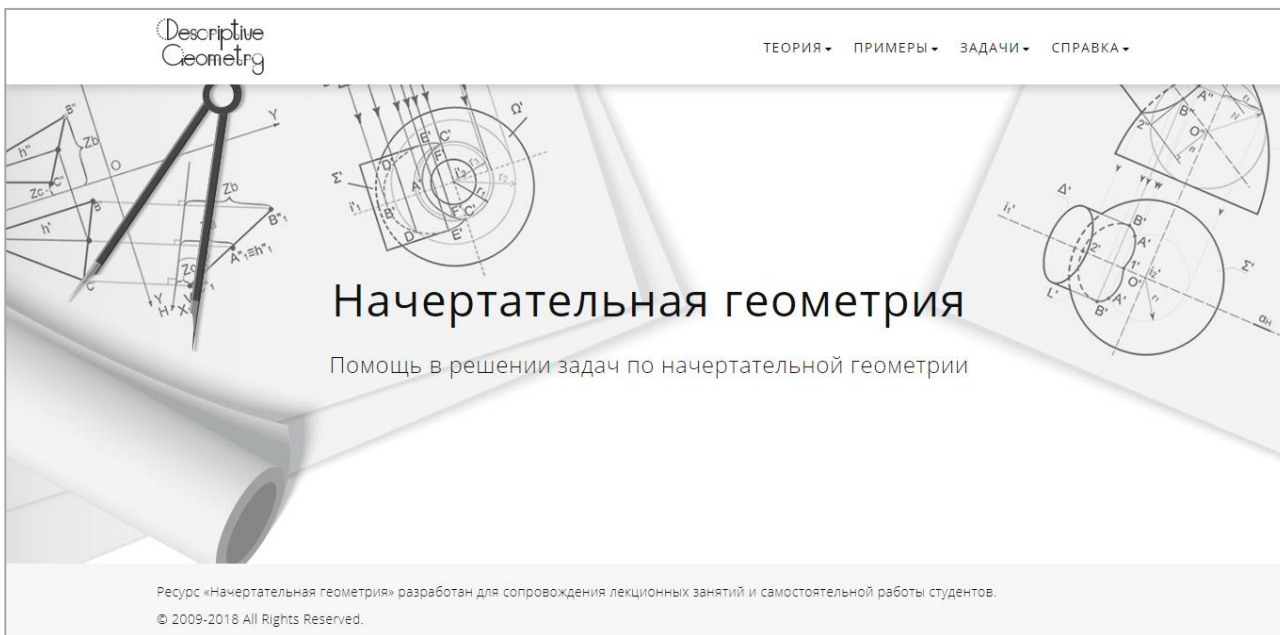


Рис. 1. Главная страница сайта по начертательной геометрии

Пункты меню сделаны вертикальными, поэтому их удобнее пролистывать на мобильном устройстве.

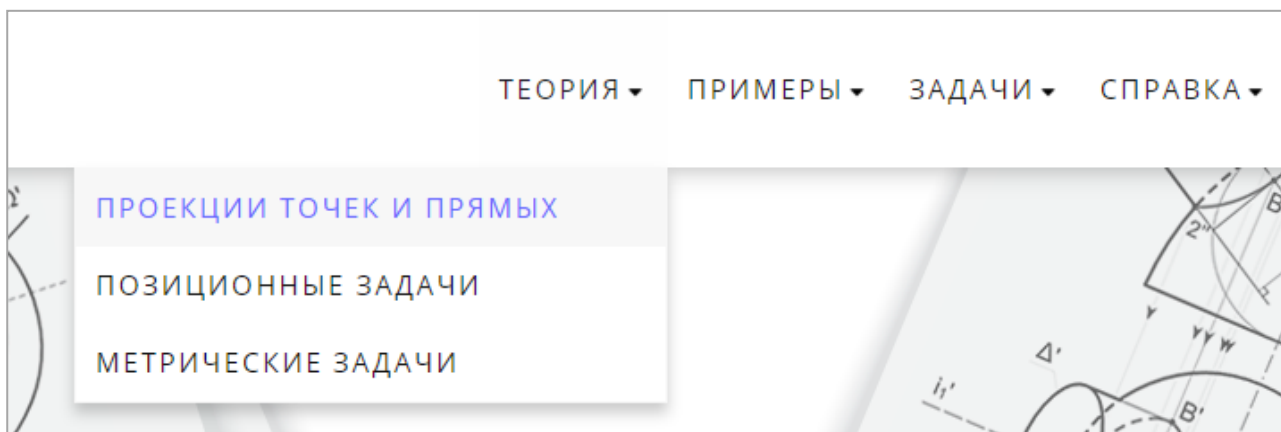


Рис. 2. Выпадающее меню

В программной части проекта наибольший интерес представляют 15 интерактивных анимационных роликов, реализованных с использованием Adobe Animate. Эти ролики разработаны для раздела «Примеры». Каждый из них содержит пошаговую отрисовку построения условия и решения задачи по начертательной геометрии, текстовое описание задачи и решения, а также плеер с паузой и кнопками, которые позволяют перемещаться между отдельными шагами решения задачи в прямом и обратном направлении. Избавление от swf-формата, а также достижение адаптивности, потребовало решения следующих задач: исключение текстового описания из самого ролика; разработка плеера для пошагового воспроизведения ролика с возможностью отката на основе применения JavaScript и CreateJS. Работа со встроенной в Adobe Animate библиотекой CreateJS позволила произвести экспорт роликов в файлы .html и .js. В результате анимация в текущей версии проекта находится в html-элементе <canvas>. Текстовое описание находится в отдельном блоке, что позволяет делать страницу адаптивной.

Для обеспечения работоспособности ресурса и его удобного администрирования разработана база данных проекта, ER-диаграмма которой представлена на рис. 3. Все разделы сайта динамически связаны с базой данных и генерируются на основании ее содержимого.

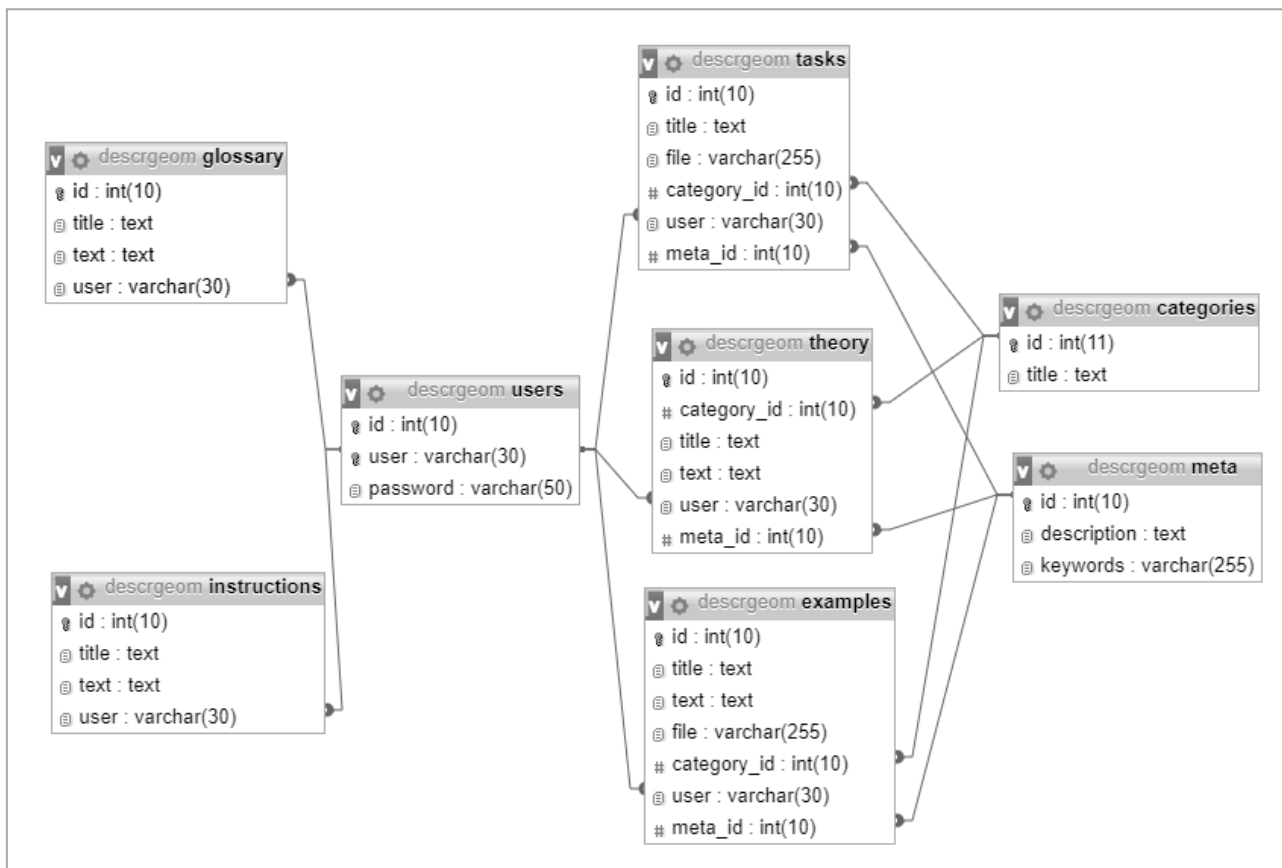


Рис. 3. ER-диаграмма базы данных обучающего сайта по начертательной геометрии

Для того, чтобы отделить логику сайта от представления, использована архитектура MVC (Model, View, Controller).

Переработка раздела «Задачи», который реализован на ActionScript 3, средствами CreateJS в настоящее время не реализована. Для ее работы требуется FlashPleer и она наиболее эффективна для десктопного применения.

Библиографический список

1. Начертательная геометрия. URL: <http://descrgeometry.org/> (дата обращения: 20.10.2018).
2. Google plans to start blocking Flash in Chrome this year. URL: <https://www.theverge.com/2016/5/15/11679394/chrome-to-block-flash-later-2016>. дата обращения: 20.10.2018).
3. Adobe – производитель программного обеспечения. URL: https://www.adobe.com/cis_ru/. (дата обращения: 20.10.2018)/
4. Flash is dead, long live Adobe Animate CC. URL: <https://www.webdesignerdepot.com/2015/12/flash-is-dead-long-live-adobe-animate-cc/> (дата обращения: 20.10.2018).
5. Справочник CSS WebReference. URL: <https://webref.ru/css>. (дата обращения: 20.10.2018).
6. Методология / БЭМ. URL: <https://ru.bem.info/methodology/> (дата обращения: 20.10.2018).
- 7 Create J.S. A suite of JavaScript libraries and tools designed for working with HTML5. URL: <https://createjs.com> (дата обращения: 20.10.2018).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКОВ ВЫСШЕГО УРОВНЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Р.А. Романенко*, **А.Л. Стухальский****, **А.А. Прихожий*****

* *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, romu4444@gmail.com*

** *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, styxalski98@gmail.com*

*** *Белорусский национальный технический университет,
Беларусь, Минск, prihozhy@bntu.by*

Аннотация. Рассмотрены некоторые парадигмы функционального программирования: лямбда-функции, алгебраические типы данных и монады. Показаны преимущества асинхронной модели и использования предметно-ориентированных языков программирования. Проведен анализ и сравнение производительности классического полиморфизма и полиморфизма, основанного на алгебраическом типе данных.

Ключевые слова: императивное программирование, декларативное программирование, лямбда-функция, алгебраические типы данных, полиморфизм, монада, предметно-ориентированные языки программирования.

USING HIGHEST-LEVEL PROGRAMMING LANGUAGE TO SOLVE APPLIED TASKS

R.A. Romanenko*, **A.L. Stuhalsky****, **A.A. Prihozhy*****

* *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, romu4444@gmail.com*

** *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, styxalski98@gmail.com*

*** *Belarusian national technical university,
Belarus, Minsk, prihozhy@bntu.by*

Abstract. Consider using functional programming paradigms: lambda functions, algebraic data types and monads. Analyzed advantages of asynchronous programming model and domain-specific languages. Conducted research on performance differences between classic polymorphism and algebraic data type-based polymorphism.

Keywords: imperative programming, declarative programming, lambda function, algebraic data types, polymorphism, monad, domain programming languages.

Технологии разработки программного обеспечения можно условно разделить на два подхода: императивное программирование и декларативное программирование. Императивный подход использует описание способа достижения результата (совокупность команд), а декларативный подход, напротив, описывает то, что необходимо найти, без явного указания пути достижения цели (совокупность фактов).

Первоначальный подход к разработке программ для ЭВМ требовал максимально эффективного использования вычислительных мощностей. Это связано с низкой производительностью первых компьютеров. Естественным образом программирование свелось к императивному подходу. Однако впоследствии наблюдалось удвоение вычислительной мощности ЭВМ каждые два года, что позволило использовать более абстрактные методы программирования. Вместе с появлением методов автоматического управления памятью созданы первые объектно-ориентированные языки программирования, а также первые полностью функциональные языки программирования [1], использовавшие декларативный подход.

Со временем в императивных языках программирования появились аспекты декларативного подхода. Например, на высоком уровне абстракции, объектно-ориентированное программирование (ООП) позволяет реализовать монады [2],

используя методы объекта. При этом реализация методов может использовать императивные парадигмы программирования.

Возможность создания монад с использованием ООП привела к быстрому распространению объектно-ориентированного подхода. Вместе с популяризацией ООП прошла волна разочарования. Оказалось, что использование только объектно-ориентированного подхода недостаточно для быстрой разработки надёжных приложений. Существует ряд методов функционального программирования, которые позволяют создавать приложения с большей эффективностью.

Работа посвящена изложению некоторых методов по оптимальному проектированию программного обеспечения с использованием парадигм функционального программирования и предметно-ориентированных языков [3], сравнению эффективности предложенных методов с более известными аналогами.

Разрабатываемое программное обеспечение – парсер для нового языка программирования реализуется с использованием предметно-ориентированного языка программирования в C++.

Примечание: при дальнейшем рассмотрении будем использовать C++17.

Лямбда-функции. Лямбда-функции представляют анонимные функции. Их синтаксис и функциональность незначительно отличаются от классических функций языка C++. В сравнении с процедурой взятия указателя на функцию, лямбда-функции имеют преимущество – захват аргументов, т.е. лямбда-функция может использовать переменные объявленные во внешнем пространстве переменных.

Обычно лямбда-функции используются в классах-контейнерах, когда необходимо выполнить действие над множеством элементов коллекции (перебор, сортировка, обновление данных).

Другим не менее важным подходом является асинхронная модель программирования. В отличие от классического «последовательного» выполнения программы, в асинхронной модели создаётся ряд процессов. Не дожидаясь завершения процесса, программа выполняется далее. Обработка результата производится после завершения процесса обработчиком события. Обработчик события представляет лямбда-функцию.

Преимущество асинхронной модели по сравнению с последовательным выполнением колоссально. Например, в случаях работы с базой данных, когда запрос может выполняться несколько сотен миллисекунд, в синхронной реализации программа будет дожидаться выполнения каждого запроса. Время, потраченное в ожидании результата, можно использовать для выполнения полезной работы только в асинхронной модели.

Еще больший эффект при использовании асинхронной модели достигается в случаях, когда необходимо использовать несколько асинхронных запросов. В таком случае запросы выполняются параллельно.

Алгебраические типы данных. Алгебраический тип данных – тип, который может содержать любое значение из заданного множества типов. Приведём пример алгебраического типа, содержащего значение типа `short`, `int` или `double`:

```
std::variant<short, int, double>
```

Такой тип данных может быть использован для реализации полиморфизма. Полиморфизмом называется способность функции обрабатывать данные разных типов. Механизм обычно реализуется наследованием и динамическим связыванием. Преимущество алгебраического типа заключается в отсутствии динамического связывания.

Рассмотрим ситуацию, когда необходимо обработать большое число элементов. При использовании классического (иерархического) полиморфизма контейнер с элементами представляет набор указателей на объекты. Внутри каждого объекта имеется ссылка на таблицу методов. Вызов любого метода в случае иерархического полиморфизма происходит через два перехода по указателю. Использование алгебраического типа данных позволяет закодировать информацию о содержащемся типе данных внутри объекта, например, в виде индекса. Таким образом отсутствует необходимость в использовании указателей, что положительно сказывается на кэшировании данных процессором.

Произведём сравнение производительности различных типов полиморфизма. Создадим вектора, содержащие один миллион элементов. Каждый элемент может содержать один из трёх типов данных. Измерим время обработки «иерархически» построенных объектов и примем его за 1. Рассчитаем относительное значение времени обработки объектов, построенных «алгебраически». Результаты измерений приведены на рис. 1.

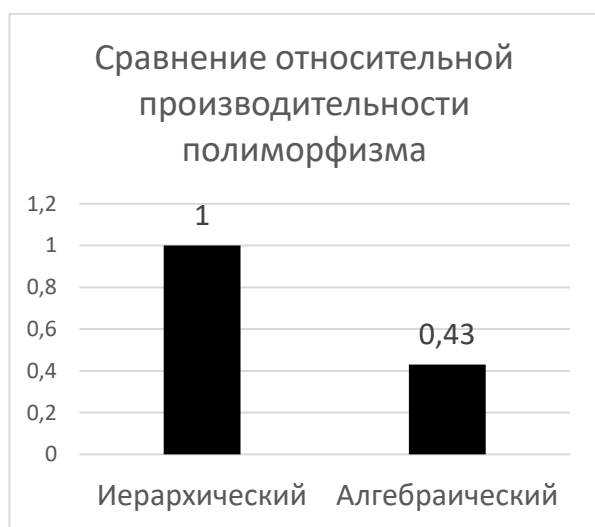


Рис. 1. Сравнение производительности иерархического полиморфизма и полиморфизма основанного на алгебраическом типе

Как видно из рисунка, относительное ускорение составляет $1/0,43 = 2,32$ раза.

Примечание: измерения проводились на операционной системе Arch Linux, процессор Ryzen 5 1600 @ 3.6 ГГц, ОЗУ DDR4 @ 3.066 ГГц.

Монады. Часто встречаются случаи, когда методы возвращают ссылку на объект. В таких случаях можно вызвать следующий метод, используя результат выполнения предыдущего. Такие конструкции выглядят как последовательность действий и легко воспринимаются человеком. Концепция соединения последовательных операций в функциональных языках

программирования называется монадой. Монада – это абстракция линейной цепочки связанных вычислений. Одно из применений монад – использование их в обработке асинхронных запросов. Например:

```
asyncCall().then().then().then()....
```

Предметно-ориентированные языки программирования – это языки программирования, которые применяются для решения конкретных прикладных проблем (HTML для разметки страниц, CSS для стилизации страниц). Перегрузка операций и рекурсивная композиция типов позволяют создавать и использовать предметно-ориентированные языки программирования «внутри программ» на языке C++.

Например, для решения задач математического моделирования требуется задать уравнение и найти для него частные производные первого и второго порядка. Для этого можно описать математическое выражение в виде дерева операций и произвести его модификацию с целью получить первую частную производную, а затем и остальные частные производные. Затем можно выполнить любое из выражений, задав значения для переменных выражения:

```
auto x = terminal<int>;
auto y = terminal<int>;
auto f = x * x + 2 * y / x;
auto dfdx = derive(f, x);
auto dfdy = derive(f, y);
return f(1,4);
```

Сфера применения предметно-ориентированных языков довольно обширна. Например, для вычислений методом конечных элементов или для молекулярного моделирования. В частности, авторы статьи разрабатывают парсер для нового языка программирования.

В разрабатываемом программном обеспечении используются все вышеописанные методы. Для создания парсеров исходного, кода используется перегрузка операторов языка C++ и рекурсивная композиция типов.

По итогам проведенной работы получили результаты, которые иллюстрируют преимущество применения алгебраических типов данных. Эффективность использования парадигм функционального программирования подтверждается другими исследованиями [4]. Описанные методологии активно применяются авторами при разработке парсера. В будущем парсер будет завершен и авторы проведут анализ его эффективности.

Библиографический список

1. Пол Хадак, Саймон Пейтон-Джонс, Филип Вадлер [и др.] Report on the programming language Haskell: a non-strict, purely functional language // ACM SIGPLAN Notices - Haskell special issue. 1992. №5. С. 1-164.
2. Филип Вадлер Monads for Functional Programming // Advanced Functional Programming. 1995. С. 24-52.
3. Domain-Specific Program Generation / Кшиштоф Чарнецкий, Джон Т. О'Доннел, Йорг Штрайниц, Валид Таха, Под ред. Кристиан Ленгауэр, Дон Батори, Чарльз Консел, Мартин Одерски. Берлин: Springer, 2003. 3016 с.
4. Байшахи Рэй, Дэрил Познета, Премкумар Диванбу, Владимир Филков A Large-Scale Study of Programming Languages and Code Quality in Github // Communications of the ACM. 2017. №10. С. 91-100.

СОДЕРЖАНИЕ

Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений

- Яроцкая Л.Д., Пыжкова О.Н., Пономарёва С.В.* Об интегральном уравнении с двумя композиционными свертками для преобразования Конторовича-Лебедева 3
- Метельский А.В.* Полная стабилизация дифференциальной системы запаздывающего типа обратной связью по состоянию 7
- Морозова И.М., Кемеш О.Н.* Оценка p -адической нормы целочисленного многочлена на цилиндры Q_p 12

Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами

- Пролиско Е.Е., Шуть В.Н.* Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта 16
- Хорунжий И.А., Мартинович В.А., Казючиц В.Н., Русецкий М.С., Казючиц Н.М.* Экспериментальная верификация математической модели алмазного датчика расхода воздуха 24
- Авцинов И.А., Суханова Н.В., Кожевников Ю.Е.* Метод определения коэффициентов модели кинетики и оптимального значения отбора биомассы 28

Математическое моделирование технологических и социальных процессов

- Гацкевич Е.И., Гундина М.А., Князев М.А.* Моделирование процессов импульсной лазерной обработки полупроводниковых гетеросистем 32
- Багомедов М. Г.-Г., Беренгартен М. Г., Пушнов А. С.* Влияние высоты миникольцевых насадок на гидравлическое сопротивление 36
- Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Токарев С.А., Алексеев* Определение потерь энергии рабочей среды в регулирующем клапане паровой турбины ОК-12А 40
- Асламова В.С., Фролова Е.Ю.* Системный и регрессионный анализы пожаров на локомотивах 44

Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства

- Березовский Н.И., Воронова Н.П.* Совершенствование промышленных процессов тепломассопереноса на основе системы экспертных оценок 48
- Полозков Ю.В., Волков Д.А., Шульга Т.Э.* Поиск кратчайшей траектории формообразования четырехгранных ячеистых структур на основе алгоритма Флойда-Уоршелла 52
- Игнатюк В.С., Попова Ю.Б.* О реализации модуля Tin Can Api в Learning Management System 57
- Довнар С.С., Гурский Н.Н., Скудняков Ю.А.* Программное обеспечение реконструкции трехмерного объекта 61

Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики

- Крук Ю.С., Летунович Ю.Е., Марченко Л.Н.* Инвариантность стационарного распределения замкнутых сетей с неактивными заявками 64
- Лопухов А.В.* Конструирование регулятора для синергетической теории управления зенитной управляемой ракетой 69

Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии	
<i>Булдакова Н.С., Булдакова Т.И., Опольский А.В., Суятинов С.И.</i> Подход к повышению адекватности моделей для оценки функционального состояния человека.....	73
Математические методы в экономике и гуманитарных науках	
<i>Одинцова Т.Н., Глушкова Ю.О., Пахомова А.В.</i> Рационализация управления цепью поставок на основе финансовых коэффициентов.....	78
Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании	
<i>Чистякова Т.Б., Дудырев А.С.</i> Компьютерные тренажеры для обучения управленческого производственного персонала потенциально-опасных химических производств.....	82
<i>Полосин А.Н., Локтев В.Р.</i> Программный комплекс для расчета и построения трендов характеристик процесса экструзии полимерных материалов	88
<i>Лукьянович И.Р., Холод А.А., Петерсон А.С.</i> Об одной реализации программной анимации для образовательного сайта с применением Createjs	93
ШМУ-2 Информатизация технических систем и процессов	
<i>Романенко Р.А., Стухальский А.Л., Прихожий А.А.</i> Использование языков высшего уровня для решения прикладных задач.....	97

Научное издание

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

**СБОРНИК ТРУДОВ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том 9

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

Подписано в печать __.__.2018. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л.10,0. Тираж 150. Заказ 15599б.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного редколлегией,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.