

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Динамическое управление трехкоординатным манипулятором, работающим в угловой системе координат	
В.А. Медведев	7
Программный комплекс для исследования алгоритмов стохастической оптимизации неявно заданных функций	
А.М. Корнеев, А.В. Суханов	14
Применение генетических алгоритмов в оптимизации планировочных решений производственных подразделений машиностроительных предприятий	
П.Ю. Гусев, К.Ю. Гусев, С.Ю. Вахмин	22
Моделирование растворения и роста сахарных кристаллов	
Д.В. Арапов, С.Л. Подвальный, С.Г. Тихомиров	29
Численное моделирование конденсации теплоносителя в горизонтальном трубопроводе	
А.Е. Кишалов, А.А. Зиннатуллин	42
О задаче управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара	
А.С. Канюгина	51
Решение обратной задачи интервального нейромоделирования при управлении качеством литых слябов	
Ю.Е. Полозова	64
Идентификация слабосвязанных окрестностных систем	
В.В. Сёмина	69
Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки	
В.Н. Крысанов, Ю.В. Нефедов, А.В. Романов	77
Моделирование и оптимизация процесса получения пластичных смазок для тяжело нагруженных механизмов	
Д.В. Арапов	82
Компьютерная модель продольного перемешивания в газовом потоке при ограничениях на время вычислений	
С.Ю. Алексеев	90

Радиотехника и связь

Обнаружение неизвестного скачкообразного изменения ширины полосы частот гауссовского процесса	
Б.В. Матвеев, Л.А. Голпайегани, М.М. Шахморadian	98
Исследование особенностей фазоманипулированных сигналов с позиций решения задач анализа и обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств	
И.В. Остроумов, Д.В. Журавлев, И.С. Анисимов	108
Генерация оптимальных исходных данных для учебных радиотехнических задач	
И.А. Кирпичева, А.В. Останков	115
Разработка методики оценки необходимой ширины полосы частот фазоманипулированных сигналов в радиопередающем устройстве	
И.В. Свиридова, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов, И.А. Сафонов	122
Современные методы и задачи спектрального анализа сигналов: краткий обзор и сравнение	
О.Е. Журилова, А.В. Башкиров, С.Ю. Белецкая, С.Н. Панычев, А.С. Костюков	128
Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи	
А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин, О.Ю. Макаров	132

Использование нейронных сетей для оптимизации декодирования LDPC-кодов для 5G беспроводной сети И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова.....	139
---	------------

Машиностроение и машиноведение

Погрешности балансировки роторов газотурбинных двигателей В.М. Рыженков, В.В. Тихомиров	145
Экспериментальная установка контроля вибрации при обработке на станках с ЧПУ А.В. Анцев, Ч.Х. Данг, Е.С. Янов, М.В. Полев.....	151
Производительность и качество алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния С.Г. Бишутин, С.С. Алехин.....	159
Взаимодействие магнитного поля с реологической жидкостью при маркировании А.А. Козлов, А.М. Козлов.....	165

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Dynamic control of three-coordinate manipulator, operating in the angular coordinate system V.A. Medvedev	7
Software complex for researching algorithms of stochastic optimization of implicit functions A.M. Korneev, A.V. Sukhanov	14
Application of genetic algorithms in optimization of planning decisions of industrial divisions of machine-building enterprises P.Yu. Gusev, K.Yu. Gusev, S.Yu. Vahmin	22
Modeling of the dissolution and growth of sugar crystals D.V. Arapov, S.L. Podvalny, S.G. Tikhomirov	29
Computational modelling of heat-transfer agent condensation in horizontal pipeline A.E. Kishalov, A.A. Zinnatullin	42
On the task of controlling the temperature mode of the diffusion stage of sugar production A.S. Kanyugina	51
Solving the interval inverse neuromodeling problem In the cast slabs quality control Yu.E. Polozova	64
Identification of weakly connected neighborhood systems V.V. Semina	69
EMC parameters control of modernized equipment of autoclave installation V.N. Krysanov, Yu.V. Nefedov, A.V. Romanov	77
Modeling and optimization of the process of obtaining viscous lubricants for heavy-loaded mechanisms D.V. Arapov	82
Computer model of longitudinal mixing in a gas flow at restrictions for calculation times S.Yu. Alekseev	90

Radio engineering and communication

Detecting the unknown stepwise change of the gaussian process bandwidth B.V. Matveev, L.A. Golpaiegani, M.M. Shahmoradian	98
Study of the features of phase-shift keyed signals in terms of solving the tasks of analysis and ensuring electromagnetic compatibility of radio electronic devices I.V. Ostroumov, D.V. Zhuravlev, I.S. Anisimov	108
Generation of the optimal initial data for educational radio engineering tasks I.A. Kirpicheva, A.V. Ostankov	115
Development of the methodology for estimating the necessary bandwidth of phase-shift keyed signals in a radio transmitting device I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov, I.A. Safonov	122
Modern methods and problems of spectral analysis of signals: brief discussion and comparison O.E. Zhurilova, A.V. Bashkirov, S.Y. Beletskaya, S.N. Panychev, A.S. Kostyukov	128
Anti-interference coding in modern communication formats A.S. Kostyukov, A.V. Bashkirov, L.N. Nikitin, I.S. Bobylkin, O.Yu. Makarov	132
Using neural networks to optimize decoding LDPC codes for 5G wireless network I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova	139

Mechanical engineering and science of machines

Errors for balancing rotors of gas turbine engines V.M. Ryzhenkov, V.V. Tikhomirov	145
Experimental unit for vibration control during processing on NPC machines A.V. Antsev, T.H. Dang, E.S. Yanov, M.V. Polev	151

Productivity and quality of diamond-abrasive processing of plates from silicon carbide S.G. Bishutin, S.S. Alekhin	159
Interaction of the magnetic field with the rheological fluid when marking A.A. Kozlov, A.M. Kozlov	165

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.2.001

УДК 621.865(075.8)

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХКООРДИНАТНЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ, РАБОТАЮЩИМ В УГЛОВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В.А. Медведев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: определены теоретические задачи, которые необходимо решить для управления современным быстродействующим роботом с малым энергопотреблением. Разработана расчетная схема трехкоординатного манипулятора с угловой системой координат. Проведен анализ методов формирования динамических моделей манипуляционных механизмов роботов. Получены выражения для кинетической и потенциальной энергии в соответствии с расчетной схемой трехкоординатного манипулятора, работающего в угловой системе координат. На основе аппарата Лагранжа проведен вывод уравнений движения трехкоординатного манипулятора с угловой системой координат в дифференциальной и векторной формах записи. Получено решение прямой и обратной задачи кинематики для рассматриваемого трехкоординатного манипулятора, которое может быть использовано при кинематическом управлении манипулятором в декартовой системе координат. Рассмотрен теоретический подход, предусматривающий формирование полной динамической модели манипуляционного механизма робота в процессе управления. Определена схема формирования управляющих воздействий на исполнительный механизм при динамическом управлении манипулятором. Разработана структура микропроцессорной системы динамического управления трехзвенным манипулятором с угловой системой координат

Ключевые слова: робот, трехкоординатный манипулятор, динамическая модель, динамическое управление, угловая система координат

Введение

Промышленные роботы являются неотъемлемой частью современных гибких производственных систем и робототехнических комплексов, выполняя как вспомогательные, так и основные технологические операции.

Характеристики и параметры промышленных роботов определяются как исполнением механической части (манипулятора), так и конкретной реализацией систем управления роботами.

Микропроцессорная реализация системы управления робота позволяет более чем в два раза снизить энергопотребление относительно системы, построенной на микросхемах малой и средней степени интеграции [1].

Повышение производительности роботизированного производства напрямую зависит от увеличения быстродействия применяемых роботов. При высоких скоростях движения звеньев манипулятора необходимо в полной мере учитывать и использовать в составе управляющей структуры динамическую модель манипуляционного механизма, что определяет необходимость ее разработки.

При планировании движения рабочего органа манипулятора в декартовом пространстве и его отработке возникает также необходимость в решении прямой и обратной задач кинематики.

Постановка задачи

Расчетная схема манипулятора с угловой системой координат приведена на рис. 1. Звено 1 имеет массу m_1 и момент инерции J_1 относительно оси вращения Ox_2 . Через m_2 , m_3 и m обозначены, соответственно, массы звеньев 2, 3 и рабочего органа. Длины звеньев обозначены l_1 , l_2 , l_3 , расстояния от центров масс m_1 , m_2 , m_3 до центров сочленений – l_{01} , l_{02} , l_{03} .

Рассматриваемый манипулятор имеет три вращательные кинематические пары. Вектор обобщенных координат манипулятора состоит из углов поворота в сочленениях звеньев 1, 2, 3: $q = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]$.

Задача состоит в получении динамической модели трехкоординатного манипулятора с угловой системой координат, решении прямой и обратной задач кинематики для трехкоординатного манипулятора, разработке структуры системы динамического управления трехзвенным манипулятором.

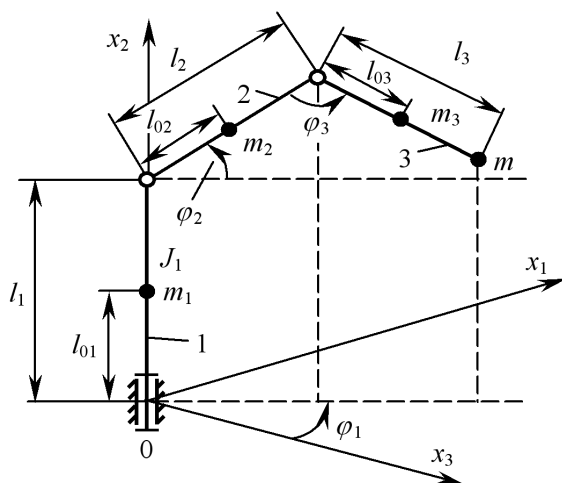


Рис. 1

Методы исследования

В работе [2] рассмотрены динамическая модель манипулятора “PUMA-560”, построенная на основе метода Ньютона-Эйлера, динамическая модель исполнительного привода постоянного тока и моделирование робота в среде MATLAB.

Метод Ньютона-Эйлера позволяет автоматически сформировать динамическую модель манипулятора с произвольной системой координат [3], т.е. является универсальным. В то же время необходимость в преобразовании координат для определения кинематических параметров звеньев манипулятора на каждом интервале дискретности является недостатком метода Ньютона-Эйлера при расчете управляющих воздействий в реальном масштабе времени.

При управлении манипулятором динамическую и кинематическую модели целесообразно формировать на основе его конкретной расчетной схемы, используя аппарат Лагранжа. Это позволяет избежать преобразования координат при расчетах, существенно сокращая время вычислительного цикла.

Вывод уравнений движения манипулятора с угловой системой координат

Уравнения Лагранжа для рассматриваемого трехкоординатного манипулятора имеют вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W}{\partial \dot{\phi}_j} \right) - \left(\frac{\partial W}{\partial \phi_j} \right) + \left(\frac{\partial \Pi}{\partial \phi_j} \right) = M_{\phi_j}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где W – кинетическая энергия манипулятора;
 Π – потенциальная энергия манипулятора;

M_{ϕ_j} – моменты, развиваемые электроприводами в сочленениях вращательного типа.

Звено 1 участвует только во вращательном движении по координате ϕ_1 , поэтому его кинетическая энергия определяется из выражения

$$W_1(\dot{\phi}_1) = J_1 \dot{\phi}_1^2 / 2. \quad (2)$$

Звенья 2 и 3 совершают сложные движения. Обозначим через V_2 , V_3 и V значения линейных скоростей точек, в которых сосредоточены массы m_2 , m_3 и m . Тогда для определения кинетической энергии звеньев 2, 3 и груза m запишем следующие выражения:

$$W_2 = m_2 V_2^2 / 2 = m_2 \sum_{s=1}^3 x_{s2}^2 / 2,$$

$$W_3 = m_3 V_3^2 / 2 = m_3 \sum_{s=1}^3 x_{s3}^2 / 2, \quad (3)$$

$$W_m = m V^2 / 2 = m \sum_{s=1}^3 x_s^2 / 2, \quad s = 1, 2, 3.$$

Квадрат скорости точки m_2 определяется из уравнения:

$$V_2^2 = l_{02}^2 (\dot{\phi}_1^2 \cos^2 \phi_2 + \dot{\phi}_2^2). \quad (4)$$

Декартовы координаты x_{s3} точки m_3 определяются из выражения:

$$x_{13} = [l_2 \cdot \cos \phi_2 - l_{03} \cdot \cos(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \sin \phi_1,$$

$$x_{23} = l_2 \cdot \sin \phi_2 - l_{03} \cdot \sin(\phi_2 + \phi_3) + l_1,$$

$$x_{33} = [l_2 \cdot \cos \phi_2 - l_{03} \cdot \cos(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \cos \phi_1. \quad (5)$$

Дифференцируя x_{s3} по времени, получим:

$$\dot{x}_{13} = [-l_2 \dot{\phi}_2 \cdot \sin \phi_2 + l_{03} (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) \cdot \sin(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \sin \phi_1 +$$

$$+ [l_2 \cdot \cos \phi_2 - l_{03} \cdot \cos(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \cos \phi_1 \dot{\phi}_1,$$

$$\dot{x}_{23} = l_2 \dot{\phi}_2 \cdot \cos \phi_2 - l_{03} (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) \cdot \cos(\phi_2 + \phi_3), \quad (6)$$

$$\dot{x}_{33} = [-l_2 \dot{\phi}_2 \cdot \sin \phi_2 + l_{03} (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) \cdot \sin(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \cos \phi_1 -$$

$$- [l_2 \cdot \cos \phi_2 - l_{03} \cdot \cos(\phi_2 + \phi_3)] \cdot \sin \phi_1 \dot{\phi}_1.$$

Квадрат скорости точки m_3

$$V_3^2 = \dot{x}_{13}^2 + \dot{x}_{23}^2 + \dot{x}_{33}^2. \quad (7)$$

Подставляя в (7) выражения для определения скоростей \dot{x}_{13} , \dot{x}_{23} и \dot{x}_{33} из (6), после ряда тригонометрических преобразований получим следующее уравнение:

$$V_3^2 = l_2^2 [\dot{\phi}_2^2 + \cos^2 \phi_2 \dot{\phi}_1^2] + l_{03}^2 [(\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3)^2 + \cos^2(\phi_2 + \phi_3) \dot{\phi}_1^2] - 2l_2 l_{03} [\cos \phi_3 \dot{\phi}_2 (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) + \cos \phi_2 \cos(\phi_2 + \phi_3) \dot{\phi}_1^2]. \quad (8)$$

Аналогичным образом выводится выражение для квадрата скорости точки m , имеющее следующий вид:

$$V^2 = l_2^2 [\dot{\phi}_2^2 + \cos^2 \phi_2 \dot{\phi}_1^2] + l_3^2 [(\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3)^2 + \cos^2(\phi_2 + \phi_3) \dot{\phi}_1^2] - 2l_2 l_3 [\cos \phi_3 \dot{\phi}_2 (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) + \cos \phi_2 \cos(\phi_2 + \phi_3) \dot{\phi}_1^2]. \quad (9)$$

Кинетическая энергия W манипулятора определяется из выражения

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_m. \quad (10)$$

На основе уравнений (2)÷(4), (8)÷(10) получаем следующее выражение для кинетической энергии манипулятора:

$$\begin{aligned} W = & J_1 \dot{\varphi}_1^2 / 2 + m_2 l_{02}^2 (\dot{\varphi}_1^2 \cos^2 \varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2) / 2 + \\ & + m_3 \{ l_2^2 [\dot{\varphi}_2^2 + \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2] + l_{03}^2 [(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)^2 + \\ & + \cos^2(\varphi_2 + \varphi_3) \dot{\varphi}_1^2] - 2l_2 l_{03} [\cos \varphi_3 \dot{\varphi}_2 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) + \\ & + \cos \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) \dot{\varphi}_1^2] \} / 2 + m \{ l_2^2 [\dot{\varphi}_2^2 + \\ & + \cos^2 \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2] + l_3^2 [(\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3)^2 + \cos^2(\varphi_2 + \\ & + \varphi_3) \dot{\varphi}_1^2] - 2l_2 l_3 [\cos \varphi_3 \dot{\varphi}_2 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) + \\ & + \cos \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_3) \dot{\varphi}_1^2] \} / 2. \quad (11) \end{aligned}$$

Частные производные от кинетической энергии по производным от обобщенных координат:

$$\begin{aligned} \partial W / \partial \dot{\varphi}_1 = & \dot{\varphi}_1 [J_1 + (m_2 l_{02}^2 + m l_2^2 + m_3 l_2^2) \cos^2 \varphi_2 + (m_3 l_{03}^2 + \\ & + m l_3^2) \cos^2(\varphi_2 + \varphi_3) - 2l_2 (m_3 l_{03} + m l_3) \cos \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_3)], \\ \partial W / \partial \dot{\varphi}_2 = & \dot{\varphi}_2 (m_2 l_{02}^2 + m l_2^2 + m_3 l_2^2) + (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \times \\ & \times (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) - (2\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) l_2 (m_3 l_{03} + m l_3) \cos \varphi_3, \quad (12) \\ \partial W / \partial \dot{\varphi}_3 = & (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) - \dot{\varphi}_2 l_2 (m_3 l_{03} + \\ & + m l_3) \cos \varphi_3. \end{aligned}$$

Производные от кинетической энергии W по обобщенным координатам:

$$\begin{aligned} \partial W / \partial \varphi_1 = & 0, \\ \partial W / \partial \varphi_2 = & -\dot{\varphi}_1^2 \{ (m_2 l_{02}^2 + m_3 l_2^2 + m l_2^2) \sin 2\varphi_2 + \\ & + (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \sin[2(\varphi_2 + \varphi_3)] - 2(m_3 l_2 l_{03} + m l_2 l_3) \times \\ & \times \sin(2\varphi_2 + \varphi_3) \} / 2, \quad (13) \\ \partial W / \partial \varphi_3 = & -\dot{\varphi}_1^2 \{ (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \sin[2(\varphi_2 + \varphi_3)] / 2 - \\ & - l_2 \cos \varphi_2 (m_3 l_{03} + m l_3) \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \} + \dot{\varphi}_2 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \times \\ & \times (m_3 l_{03} + m l_3) l_2 \sin \varphi_3. \end{aligned}$$

Выражение для потенциальной энергии Π манипулятора имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi = & m_1 g l_{01} + m_2 g (l_1 + l_{02} \sin \varphi_2) + \\ & + m_3 g (l_1 + l_2 \sin \varphi_2 - l_{03} \sin(\varphi_2 + \varphi_3)) + \\ & + m g [l_1 + l_2 \sin \varphi_2 - l_3 \sin(\varphi_2 + \varphi_3)]. \quad (14) \end{aligned}$$

Производные от потенциальной энергии Π по обобщенным координатам:

$$\begin{aligned} \partial \Pi / \partial \varphi_1 = & 0, \\ \partial \Pi / \partial \varphi_3 = & g (m_3 l_{03} + m l_3) \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ \partial \Pi / \partial \varphi_2 = & g (m_2 l_{02} + m_3 l_2 + m l_2) \cos \varphi_2 - \\ & - g (m_3 l_{03} + m l_3) \cos(\varphi_2 + \varphi_3). \quad (15) \end{aligned}$$

Подставляя в систему (1) выражения для частных производных (12), (13) и (15), после проведения операции дифференцирования по времени, выполнения ряда тригонометрических преобразований и введения обозначений, получим следующие уравнения динамики манипулятора с угловой системой координат:

$$\begin{aligned} A_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3) \ddot{\varphi}_1 + B_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) &= M_{\varphi_1}, \\ A_{\varphi_2}(\varphi_3) \ddot{\varphi}_2 + A_{\varphi_{23}}(\varphi_3) \ddot{\varphi}_3 + B_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) + \\ &+ C_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3) = M_{\varphi_2}, \quad (16) \\ A_{\varphi_3} \ddot{\varphi}_3 + A_{\varphi_{32}}(\varphi_3) \ddot{\varphi}_2 + B_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2) + \\ &+ C_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3) = M_{\varphi_3}. \end{aligned}$$

В системе (16) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3) = & J_1 + (m_2 l_{02}^2 + m l_2^2 + m_3 l_2^2) \cos^2 \varphi_2 + \\ & + (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \cos^2(\varphi_2 + \varphi_3) - 2l_2 (m_3 l_{03} + m l_3) \times \\ & \times \cos \varphi_2 \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ B_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) = & \dot{\varphi}_1 \{ -(m_2 l_{02}^2 + m l_2^2 + m_3 l_2^2) \times \\ & \times \sin 2\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2 - (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \sin[2(\varphi_2 + \varphi_3)] (\dot{\varphi}_2 + \\ & + \dot{\varphi}_3) + 2l_2 (m_3 l_{03} + m l_3) [\sin(2\varphi_2 + \varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_2 + \cos \varphi_2 \times \\ & \times \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \cdot \dot{\varphi}_3] \}, \\ A_{\varphi_2}(\varphi_3) = & m_2 l_{02}^2 + m_3 l_2^2 + m l_2^2 + m_3 l_{03}^2 + m l_3^2 - \\ & - 2 \cos \varphi_3 l_2 (m_3 l_{03} + m l_3), \\ A_{\varphi_{23}}(\varphi_3) = & m_3 l_{03}^2 + m l_3^2 - l_2 \cos \varphi_3 \cdot (m_3 l_{03} + m l_3), \quad (17) \\ B_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) = & (2\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) l_2 \sin \varphi_3 \cdot \dot{\varphi}_3 \times \\ & \times (m_3 l_{03} + m l_3) + \dot{\varphi}_1^2 \{ (m_2 l_{02}^2 + m_3 l_2^2 + m l_2^2) \sin(2\varphi_2) + \\ & + (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \sin[2(\varphi_2 + \varphi_3)] - 2(m_3 l_2 l_{03} + m l_2 l_3) \times \\ & \times \sin(2\varphi_2 + \varphi_3) \} / 2, \\ C_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3) = & g (m_2 l_{02} + m_3 l_2 + m l_2) \cos \varphi_2 - \\ & - g (m_3 l_{03} + m l_3) \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ A_{\varphi_3} = & m_3 l_{03}^2 + m l_3^2, \\ A_{\varphi_{32}}(\varphi_3) = & m_3 l_{03}^2 + m l_3^2 - l_2 \cos \varphi_3 \cdot (m_3 l_{03} + m l_3), \\ B_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2) = & \dot{\varphi}_1^2 \{ (m_3 l_{03}^2 + m l_3^2) \sin[2(\varphi_2 + \\ & + \varphi_3)] / 2 - l_2 (m_3 l_{03} + m l_3) \cos \varphi_2 \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3) \} - \\ & - \dot{\varphi}_2^2 (m_3 l_{03} + m l_3) l_2 \sin \varphi_3, \\ C_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3) = & -g (m_3 l_{03} + m l_3) \cos(\varphi_2 + \varphi_3). \end{aligned}$$

Векторная форма записи системы уравнений (16) имеет вид

$$A(q) \ddot{q} + B(q, \dot{q}) + C(q) = P, \quad (18)$$

где $A(q)$, \ddot{q} – матрицы инерционных параметров и ускорений;

$B(q, \dot{q})$ – вектор, учитывающий взаимовлияние координат;

$C(q)$ – вектор гравитационных сил;

P – вектор обобщенных сил.

Матрицы $A(q)$, \ddot{q} , P , $B(q, \dot{q})$ и $C(q)$ определяются следующим образом:

$$A(q) = \begin{bmatrix} A_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3) & 0 & 0 \\ 0 & A_{\varphi_2}(\varphi_3) & A_{\varphi_{23}}(\varphi_3) \\ 0 & A_{\varphi_{32}}(\varphi_3) & A_{\varphi_3} \end{bmatrix}, \quad \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{\varphi}_1 \\ \ddot{\varphi}_2 \\ \ddot{\varphi}_3 \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} M_{\varphi_1} \\ M_{\varphi_2} \\ M_{\varphi_3} \end{bmatrix}, \quad B(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} B_{\varphi_1}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) \\ B_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3) \\ B_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$C(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ C_{\varphi_2}(\varphi_2, \varphi_3) \\ C_{\varphi_3}(\varphi_2, \varphi_3) \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, что независимо от кинематической схемы манипулятора его динамическая модель всегда может быть представлена в виде уравнения (18). На основе этого векторного уравнения формируется система динамического управления манипулятором.

Решение прямой и обратной задач кинематики для манипулятора с угловой системой координат

Согласно расчетной схеме рассматриваемого манипулятора, приведенной на рис. 1, прямая задача кинематики решается в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_1 &= [l_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_3 \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \sin \varphi_1, \\ x_2 &= l_2 \cdot \sin \varphi_2 - l_3 \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3) + l_1, \\ x_3 &= [l_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_3 \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \cos \varphi_1. \end{aligned} \quad (20)$$

Дифференцируя (20) по времени, получим уравнения кинематики для скоростей

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= [-l_2 \dot{\varphi}_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \sin \varphi_1 + \\ &+ [l_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_3 \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1, \\ \dot{x}_2 &= l_2 \dot{\varphi}_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_3 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_3), \\ \dot{x}_3 &= [-l_2 \dot{\varphi}_2 \cdot \sin \varphi_2 + l_3 (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_3) \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \cos \varphi_1 - \\ &- [l_2 \cdot \cos \varphi_2 - l_3 \cdot \cos(\varphi_2 + \varphi_3)] \cdot \sin \varphi_1 \dot{\varphi}_1. \end{aligned} \quad (21)$$

Введем обозначения для обобщенных координат: $q_1 = \varphi_1$, $q_2 = \varphi_2$, $q_3 = \varphi_3$. Тогда выражения (20) записываются в виде матричного уравнения:

$$X = F(q) = \begin{bmatrix} [l_2 \cos q_2 - l_3 \cos(q_2 + q_3)] \sin q_1 \\ l_2 \sin q_2 - l_3 \sin(q_2 + q_3) + l_1 \\ [l_2 \cos q_2 - l_3 \cos(q_2 + q_3)] \cos q_1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Из первого и третьего уравнений системы

(20) получим

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{x_1}{x_3}\right). \quad (23)$$

Обобщенные координаты φ_2 и φ_3 можно выразить из треугольников, соответствующих верхней части рис. 1 и представленных на рис. 2.

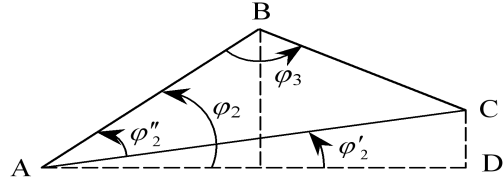


Рис. 2. Схема для определения обобщенных координат φ_2 и φ_3

Величины отрезков, изображенных на рис. 2, определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} |AB| &= l_2, |BC| = l_3, |CD| = x_2 - l_1, \\ |AD| &= \sqrt{x_1^2 + x_3^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

Из треугольника ACD находим

$$|AC| = \sqrt{|AD|^2 + |CD|^2} = \sqrt{x_1^2 + x_3^2 + (x_2 - l_1)^2}, \quad (25)$$

$$\varphi_2' = \arctg\left(\frac{|CD|}{|AD|}\right) = \arctg\left(\frac{x_2 - l_1}{\sqrt{x_1^2 + x_3^2}}\right). \quad (26)$$

Из треугольника ABC в соответствии с теоремой косинусов определяем углы φ_2'' и φ_3 :

$$\begin{aligned} \varphi_2'' &= \arccos\left[\frac{|AB|^2 + |AC|^2 - |BC|^2}{2|AB||AC|}\right] = \\ &= \arccos\left[\frac{l_2^2 - l_3^2 + (x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2}{2l_2 \cdot \sqrt{(x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2}}\right], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \arccos\left[\frac{|AB|^2 + |BC|^2 - |AC|^2}{2|AB||BC|}\right] = \\ &= \arccos\left[\frac{l_2^2 + l_3^2 - [(x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2]}{2l_2 l_3}\right]. \end{aligned} \quad (28)$$

Таким образом, для обобщенных координат φ_2 и φ_3 из выражений (26)÷(29) имеем

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \arctg\left[\frac{x_2 - l_1}{\sqrt{x_1^2 + x_3^2}}\right] + \\ &+ \arccos\left[\frac{l_2^2 - l_3^2 + (x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2}{2l_2 \cdot \sqrt{(x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2}}\right], \end{aligned} \quad (29)$$

$$\varphi_3 = \arccos\left[\frac{l_2^2 + l_3^2 - [(x_2 - l_1)^2 + x_1^2 + x_3^2]}{2l_2 l_3}\right]. \quad (30)$$

Уравнения (23), (29) и (30) позволяют решить обратную задачу кинематики для перемещений.

Решение прямой и обратной задачи о положении может использоваться при формировании кинематического алгоритма управления манипулятором [4].

Динамическое управление манипулятором

В системе динамического управления математическая модель динамики манипулятора непосредственно включается в структуру системы управления. В работе [5] описан подход, предусматривающий формирование полной динамической модели робота в процессе управления, т.е. вычисление вектора обобщенных сил в соответствии с уравнением (18) при использовании векторов измеренных значений обобщенных координат $q(t)$ и скоростей $\dot{q}(t)$ робота. Робот является асимптотически устойчивым в окрестности номинальной траектории, если вектор обобщенных сил

$$P(t) = A(q(t))\{\ddot{q}_{\text{зад}}(t) + K_0[q_{\text{зад}}(t) - q(t)] + K_1[\dot{q}_{\text{зад}}(t) - \dot{q}(t)]\} + B(q(t), \dot{q}(t)) + C(q(t)), \quad (31)$$

где K_0 – матрица размером $n \times n$ коэффициентов обратной связи по положению;

K_1 – матрица размером $n \times n$ коэффициентов обратной связи по скорости.

Схема формирования управляющих воздействий на исполнительный механизм, построенная в соответствии с выражением (31), приведена на рис. 3. Схема вычисляет вектор $P(t)$ обобщенных сил в соответствии с уравнением (31); вектор $I(t)$ управляющих токов рассчитывается на основе вектора $P(t)$ с учетом параметров кинематических передач.

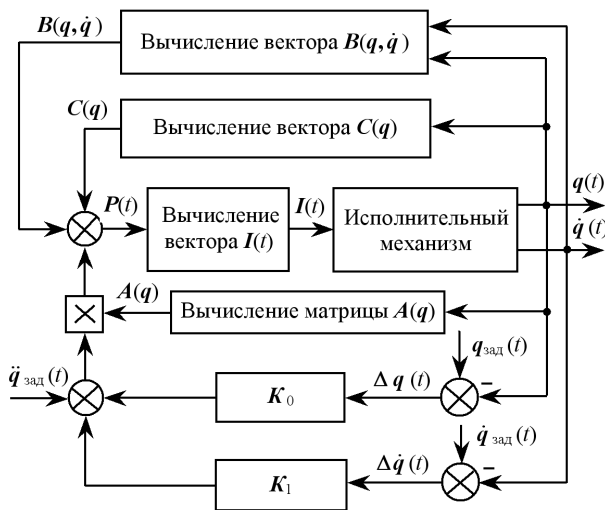


Рис. 3

В схеме учитываются взаимовлияние звеньев [матрица $B(q, \dot{q})$], гравитационные силы [матрица $C(q)$], изменение моментов инерции при движении манипулятора [в матрице $A(q)$].

Структура системы управления манипулятором

Микропроцессорная система динамического управления манипулятором, работающим в угловых координатах, формируется в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 4.

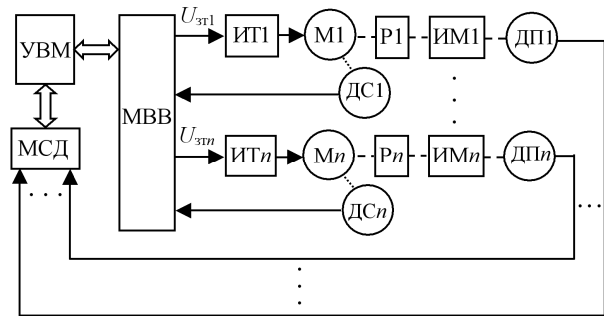


Рис. 4

На рис. 4 приняты следующие обозначения элементов схемы:

УВМ – управляющая вычислительная машина;

МСД – модуль связи с датчиками;

МВВ – модуль ввода-вывода;

ИТ1÷ИТn – источники тока координат робота, $n = 1, 2, 3$;

М1÷Mn – исполнительные двигатели;

ДС1÷ДСn – датчики скоростей;

Р1÷Pn – редукторы;

ИМ1÷ИМn – исполнительные механизмы координат робота;

ДП1÷ДПn – датчики перемещений.

На траектории перемещения манипулятора в соответствии с требуемым технологическим процессом выделяется ряд опорных точек. Промежуточные значения координат между опорными точками рассчитываются в результате интерполяции траектории с помощью кубических сплайнов [6, 7].

УВМ через модуль связи МСД получает информацию с датчиков ДП1÷ДПn о положениях координат, с датчиков ДС1÷ДСn о скоростях двигателей, и на основе этой информации вырабатываются коды сигналов задания токов.

МВВ преобразует коды в аналоговые сиг-

налы $U_{зт1} \div U_{зтn}$, которые поступают на источники тока ИТ1÷ИТn. Обмотки якорей исполнительных двигателей М1÷Мn питаются заданными токами, что обеспечивает отработку требуемых перемещений координат.

Заключение

Результаты выполненной работы следующие.

1. Разработана расчетная схема трехкоординатного манипулятора с угловой системой координат.

2. Проведен вывод уравнений движения рассматриваемого трехкоординатного манипулятора в дифференциальной и векторной формах записи.

3. Получено решение прямой и обратной задачи кинематики для трехкоординатного манипулятора, работающего в угловой системе координат.

4. Определена схема формирования управляющих воздействий на исполнительный механизм при динамическом управлении манипулятором.

5. Разработана структура микропроцессорной системы динамического управления манипулятором с угловой системой координат.

Литература

1. Медведев В.А. Энергосберегающая система управления робота "PM-01" // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2018. С. 252-253.
2. Медведев В.А., Петренко В.Р., Кузовкин А.В. Моделирование исполнительной системы робота PUMA-560 в среде MATLAB // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12.3. С. 4-6.
3. Медведев В.А., Новиков А.А. Моделирование динамики манипулятора с произвольной кинематической схемой // Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 1999. С. 139-142.
4. Хапкина И.К. Синтез управления роботами с использованием вектора скорости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 9. Ч. 1. С. 186-192.
5. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов. М.: МГТУ, 2006. 480 с.
6. Медведев В.А. Разработка и исследование системы управления манипулятором "PUMA-560" // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТУ, 2017. С. 311-315.
7. Медведев В.А. Микропроцессорная система управления манипулятором "PUMA-560" // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 34-38.

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 22.03.2019

Информация об авторах

Медведев Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: va.medved60@yandex.ru, тел. 8(473)243-77-20, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3509-2190>

DYNAMIC CONTROL OF THREE-COORDINATE MANIPULATOR, OPERATING IN THE ANGULAR COORDINATE SYSTEM

V.A. Medvedev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the theoretical problems that need to be solved to control a modern high-speed robot with low power consumption are determined. A calculation scheme of a three-coordinate manipulator with an angular coordinate system is developed. The analysis of methods of formation of dynamic models of manipulation mechanisms of robots is carried out. Expressions for kinetic and potential energy in accordance with the calculated scheme of the three-coordinate manipulator operating in the angular coordinate system are obtained. Based on the Lagrange apparatus, the equations of motion of a three-coordinate manipulator with an angular coordinate system in differential and vector forms of recording are derived. The solution of the direct and inverse kinematics problem for the considered three-coordinate manipulator, which can be used for kinematic control of the manipulator in the Cartesian coordinate system, is obtained. The theoretical approach providing for the formation of a complete dynamic model of the robot's manipulation mechanism in the control process is considered. The scheme of formation of control actions on the actuator under dynamic control of the manipulator is determined. The structure of microprocessor system of dynamic control of three-link manipulator with angular coordinate system is developed

Key words: robot, three-axis manipulator, dynamic model, dynamic control, angular coordinate system

References

1. Medvedev V.A. "Energy-saving control system of the robot "PM-01"", *Proc. of the International scientific-practical conference: "Alternative and intellectual energetic" (Al'ternativnaya i intellektual'naya energetika: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Voronezh, VSTU, 2018, pp. 252-253.
2. Medvedev V.A., Petrenko V.R., Kuzovkin A.V. "Modelling of executive system of robot PUMA-560 in matlab environment", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 12-3, pp. 4-6.
3. Medvedev V.A., Novikov A.A. "Simulation of dynamic behavior of the manipulator with the any cinematic scheme", *The interuniversity collection of papers: The analysis and designing of means of a robotics and automations (Analiz i projektirovanie sredstv robotizatsii i avtomatizatsii: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 1999, pp. 139-142.
4. Khapkina I.K. "Synthesis of robot control using the velocity vector", *News of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.)*, 2013, vol. 9, part 1, pp. 186-192.
5. Zenkevich S.L. "Basics of manipulative robots control: textbook for universities" ("Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, MSTU, 2006, 480 p.
6. Medvedev V.A. "Development and research of a control system by manipulator "PUMA-560"". *Proc. of the International scientific-technical conf.: New technologies in scientific research, design, management, production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, projektirovanii, upravlenii, proizvodstve: trudy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, VSTU, 2017, pp. 311-315.
7. Medvedev V.A. "Microprocessor control system for "PUMA-560" manipulator", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 34-38.

Submitted 28.02.2019; revised 22.03.2019

Information about the author

Vladimir A. Medvedev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: va.medved60@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-20

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ
СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НЕЯВНО ЗАДАНЫХ ФУНКЦИЙ**

А.М. Корнеев, А.В. Суханов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: в современных интеллектуальных системах принятия решений всё чаще приходится прибегать к различным методам стохастической оптимизации при определении расчётных параметров математических моделей, имитирующих работу исследуемого или структуризируемого объекта - сплава чугуна, отливки и других. Функции, определяющие связь между расчётными параметрами математических моделей и величинами, определяющими адекватность самих моделей, как правило, носят неявный характер. Целью настоящей работы является знакомство с программным комплексом, который позволяет проводить исследования точности и скорости сходимости алгоритмов стохастической оптимизации для неявно заданных функций. Подробно описан принцип работы программного комплекса, представлена его модульно-функциональная схема. Рассматриваются алгоритмы, построенные на основе методов случайного поиска в дискретном пространстве и известные под общим названием алгоритмов имитации отжига. Программа позволяет осуществлять оптимизацию расчётных параметров математических моделей с использованием различных модификаций схем алгоритма имитации отжига: схемы Коши и Больцмана модификаций А, Б и В, сверхбыстрый отжиг и алгоритм, предложенный Ксин Яо. Основные расчётные параметры алгоритмов, которым уделено внимание в статье, - размерность области поиска, параметры критерия останова (изменения температуры), время работы алгоритма, а также величины, характеризующие вероятность перехода точки поиска в новое состояние (параметры функции распределения Гиббса). Предложены собственные варианты модификации схем. Отдельное внимание уделено анализу точности результатов работы алгоритмов

Ключевые слова: стохастический поиск, алгоритм имитации отжига, точность, оптимум, случайная величина, распределение Гиббса

Введение

Существует множество разнообразных методов поиска экстремальных значений функций нескольких переменных [1]. Отдельную категорию из них составляют методы, использующие инструменты случайного поиска и основанные на марковских случайных процессах [2]. Для многофакторных функций оптимальным признан метаэвристический алгоритм - метод имитации отжига (simulated annealing) [2, 3, 4]. Преимущество методов оптимизации, основанных на марковском случайном поиске, заключено в возможности находить за сравнительно короткий промежуток времени решения задач в условиях отсутствия знаний о пространстве поиска; более того, вариативность расчётных параметров алгоритмов оптимизации позволяет осуществлять управление вычислениями в условиях, когда требуются многочисленные вычисления, например, в математических моделях, применяемых в системах принятия решений при оптимизации химических составов чугунов [2, 5]. Вариативность расчётных параметров алгоритмов стохастического поиска на основе ме-

тода имитации отжига позволяет оптимизировать схемы данных алгоритмов с учётом меняющихся требований к точности или времени работы [6].

Правильный подбор численных параметров при построении схемы алгоритма позволит достаточно быстро осуществлять поиск приемлемого по точности оптимального решения задачи [5, 6]. По этой причине алгоритм имитации отжига позволяет решать задачи такого типа, которые не решаются прямым аналитическим методом.

Стохастический поиск - весьма популярный класс среди современных инструментов оптимизации на дискретном пространстве, с его помощью эффективно решается большой спектр задач в различных отраслях и приложениях [6, 7]. В то же время очень часто в прикладных исследованиях возникает необходимость делать выбор в пользу одного из критериев, - между точностью получаемых результатов и временем, затрачиваемым на поиск оптимального решения [6]. Для принятия оптимальных решений при определении расчётных параметров в схемах алгоритмов стохастической оптимизации в настоящее время разрабатывается множество программных комплексов, позволяющих исследовать анали-

тические связи между характеристиками алгоритмов [8]. Описание ряда таких программ уже представлено в работах [6, 9].

Целью данной работы является описание разрабатываемой в настоящее время программы для ЭВМ, которая позволит более комплексно производить исследование схем алгоритмов стохастической оптимизации, построенных на основе метода имитации отжига.

Постановка задачи

В работах [2, 5] частично был уже описан программный комплекс, осуществляющий интеллектуальную поддержку принятия решений в системах управления структуризацией сплавов. В данной программе реализован отдельный модуль для исследования влияния численных параметров схем алгоритмов на время, затраченное при поиске оптимального решения. Более того, программа предоставляет данные о положении точек поиска на всех итерациях. В отдельном модуле выбирается модификация алгоритма стохастического поиска. Такой подход позволяет достаточно точно анализировать отдельные схемы алгоритмов, исследовать точность результатов для функций от нескольких переменных [2, 5]. Однако на практике чаще приходится производить оптимизацию неявно заданных функций. Например, при определении численных параметров криволинейных диаграмм деформирования стальных стержней [2, 5]; в этом случае целевая функция представляет собой сумму разностей между точками кривых, полученных экспериментальным и расчётным способом. Применение программного комплекса на практике показало, что в отдельных случаях время работы алгоритма весьма велико, вплоть до десятков минут (в зависимости от требуемой точности), что приводит к необходимости модификации схем и к созданию алгоритмов выбора численных параметров схем. Таким образом, ставится задача создания программного комплекса, осуществляющего вычислительные эксперименты с применением модифицированных алгоритмов на основе метода имитации отжига.

Описание схем алгоритмов

Алгоритм имитации отжига, называемый также *simulated annealing*, позволяет определять экстремум (оптимум) функции $f(x)$ за конечное число итераций. При этом поиск может

осуществляться как на дискретном, так и на непрерывном множестве значений, обозначаемом S .

Под системой E при построении схемы алгоритма понимают значения функции $f(x)$ в точках из множества S ($E = f(x)$). Новое состояние физической системе в алгоритме рассчитывается по заданной функции J . Также вводится ещё один термин, - температура T . По мере приближения решения к оптимальному температура системы уменьшается. Функция J позволяет получить случайное число на множестве S при заданном x и известной температуре T . После того, как будет сгенерировано случайным образом новое состояние, перейдёт к следующему этапу с определённой вероятностью h [2, 5, 9]:

$$h(\Delta E, T) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right). \quad (1)$$

В некоторых случаях система может не перейти в новое состояние.

Самый распространённый вариант алгоритма метода имитации отжига следующий [10, 11]:

1. Выбирается начальная точка x на множестве S . Определяется значение функции $E = f(x_0)$.
2. Пока температура системы не превышает критического значения ($T < T_{end}$), выполнять операции в цикле:
 - 2.a. Сравнить значения функции энергии системы в двух состояниях: в текущем состоянии и в состоянии текущего глобального оптимума (минимума или максимума). Значение текущего глобального оптимума необходимо изменить, если новое значение системы E более оптимально (превышает - при поиске максимума или меньше - при поиске минимума).
 - 2.b. Генерируется новое состояние x' .
 - 2.c. Рассчитывается значение состояния системы в новом состоянии E' .
 - 2.d. На отрезке от 0 до 1 генерируется случайное число α .
 - 2.e. Если α не превышает значения функции распределения Гиббса ($p(\Delta E, T(k))$), то значение x' передается переменной x и, соответственно, значение E' передаётся переменной E . Производится переход к следующему шагу. В противном случае производится переход к шагу 2.b пока не будет определена необходимая точка x' .

Схема описанного выше алгоритма имитации отжига при поиске минимума показана на рис. 1.

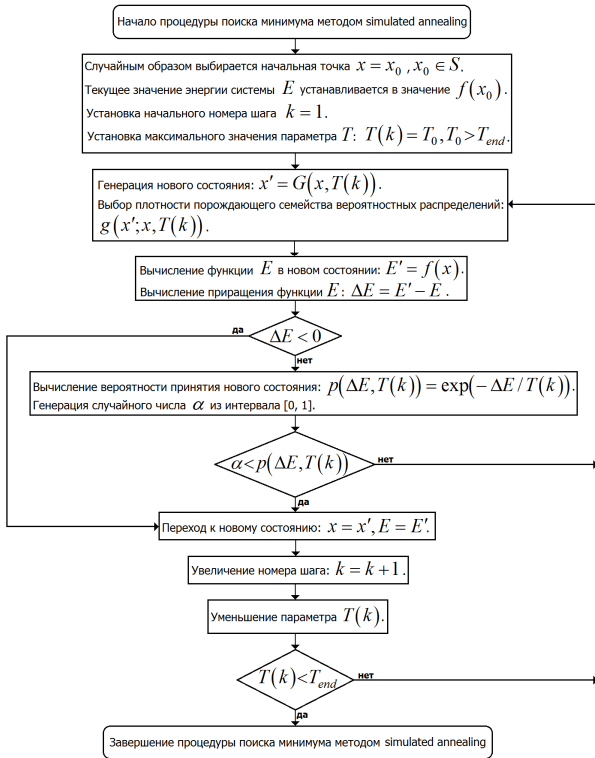


Рис. 1. Алгоритм имитации отжига

В работах [3, 10, 11] выделены следующие модификации представленного выше алгоритма:

А. Параметр T уменьшается в любом случае, даже если на шаге 2.е новая точка x не является подходящей.

Б. В качестве оптимума принимается последнее найденное решение x . Такая модификация применяется для случая, когда область поиска имеет большую размерность. Зачастую такая модификация может привести к неточному решению.

В. Новая точка на шаге 2.б не генерируется случайно, а вычисляется с применением рекурсии по заранее заданной формуле. При таком варианте организации схемы поиска может произойти потеря некоторых преимуществ алгоритма simulated annealing.

Известна также схема Больцмана [3, 11]. Здесь уменьшение параметра T задается формулой:

$$T(k) = \frac{T_0}{\ln(1+k)}, \quad k > 0, \quad (2)$$

а плотность вероятностных распределений определяется из зависимости:

$$g(x'; x, T) = \frac{1}{(2\pi T)^{D/2}} \cdot \exp\left(-\frac{|x' - x|^2}{2T}\right), \quad (3)$$

где D – размерность пространства состояний системы.

В схеме алгоритма, предложенной исследователями Цу и Хартли [12], изменение параметра T происходит обратно пропорционально номеру итерации в алгоритме:

$$T(k) = \frac{T_0}{k}. \quad (4)$$

В схеме Коши плотность нормированных распределений задаётся формулой:

$$g(x'; x, T) = \frac{1}{\pi^{(D+1)/2}} \cdot \frac{T}{(|x' - x|^2 + T^2)^{(D+1)/2}}. \quad (5)$$

В работе [13] исследователем Л. Ингбером подробно описан метод, впоследствии получивший название «сверхбыстрого». В предложенном им алгоритме пространство состояний системы считается состоящим из векторов:

$$(x_1 \dots x_n), \quad x_i \in [A_i, B_i]. \quad (6)$$

Параметр T здесь может изменяться с разной скоростью для каждого элемента x_i . Это означает, что параметр температуры T также представляет собой вектор в пространстве R^D .

Для расчёта распределения нового состояния используется вспомогательная переменная $y = \Delta x / (B_i - A_i)$. Новая точка при поиске оптимального значения рассчитывается по формуле:

$$x'_i = x_i + z_i (B_i - A_i), \quad (7)$$

где z_i - случайная величина на отрезке от -1 до 1. При этом i -е значение x' распределено на множестве с плотностью, задаваемой формулой:

$$g_T(y) = \prod_{i=1}^D \frac{1}{2(|y_i| + T_i) \ln\left(1 + \frac{1}{T_i}\right)} \equiv \prod_{i=1}^D g_{(i,T)}(y_i), \quad y_i \in [-1, 1]. \quad (8)$$

Величина z_i определяется из выражения:

$$z_i = \operatorname{sgn}\left(\alpha_i - \frac{1}{2}\right) \cdot T_i \left(\left(1 + \frac{1}{T_i}\right)^{2\alpha_i - 1} - 1 \right), \quad (9)$$

где α_i - равномерно распределённые на отрезке от 0 до 1 случайные величины.

Ксин Яо в работе [14] предложил иную схему алгоритма быстрого поиска с применением метода имитации отжига. Здесь i -е зна-

чение x' распределено на множестве с плотностью, задаваемой формулой:

$$g_T(y) = \prod_{i=1}^D g_{(i,T)}(y_i) = \prod_{i=1}^D \frac{1}{2 \left(|y_i| + \frac{1}{\ln(1/T_i)} \right) \ln(1 + \ln(1/T_i))}. \quad (10)$$

Сущность модификации алгоритмов стохастической оптимизации

Модификация алгоритмов стохастической оптимизации осуществляется посредством применения коэффициента, влияющего на скорость сужения границ в распределении Гиббса:

$$I_{\text{mod}} = \left| 1 - \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \left| \frac{M'_{xj}}{M^e_{xj}} \right|^{1/j}} \right|. \quad (11)$$

Применение данного коэффициента повышает вероятность перехода функции E в новое состояние системы E' в случае, если происходит сближение значений вычислительного и натурального эксперимента. Данный коэффициент используется в схемах, построенных для оптимизации расчётных параметров математических моделей (M_{xi}) работы стальных (чугунных) стержней при изгибе [2, 5].

Предложено также использовать данный коэффициент для модификации формулы, применяемой при расчёте плотности распределений:

$$g(x'; x, T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi T \cdot I_{\text{mod}, \text{fiz}}}} \times \exp\left(-\frac{|x' - x|^2}{2T \cdot I_{\text{mod}, \text{fiz}}}\right). \quad (12)$$

Блок-схема алгоритма стохастического поиска по схеме Больцмана с использованием коэффициента модификации I_{mod} представлена на рис. 2.

Также создан отдельный алгоритм для выбора схемы поиска (рис. 3).

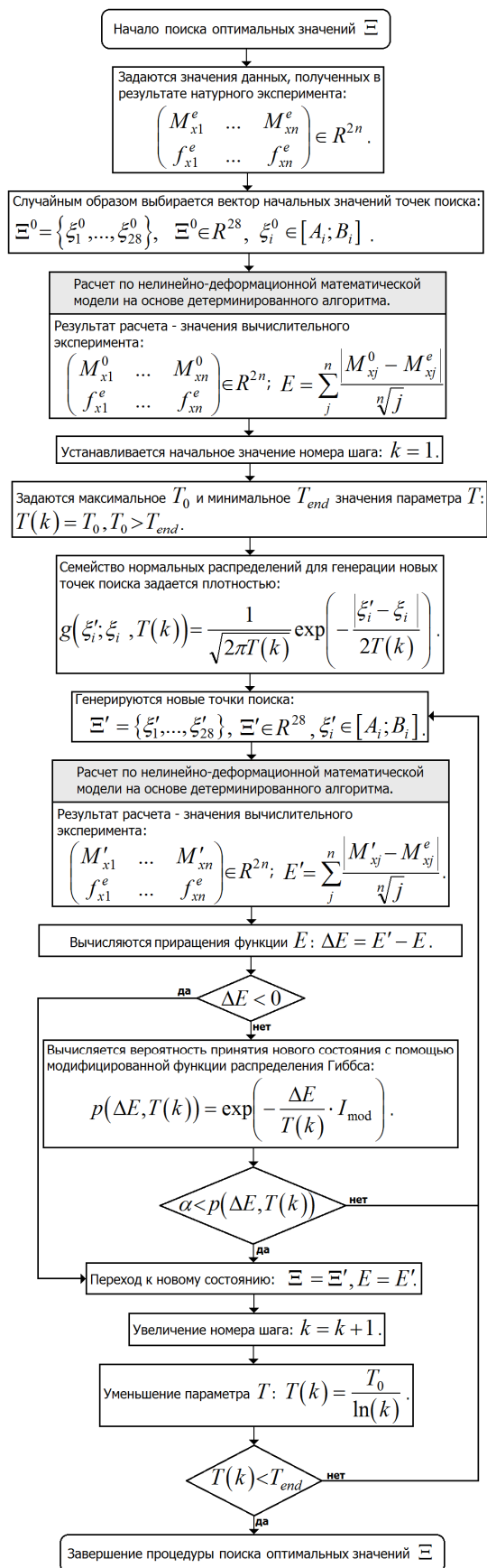


Рис. 2. Блок-схема алгоритма стохастического поиска по схеме Больцмана с использованием коэффициента модификации

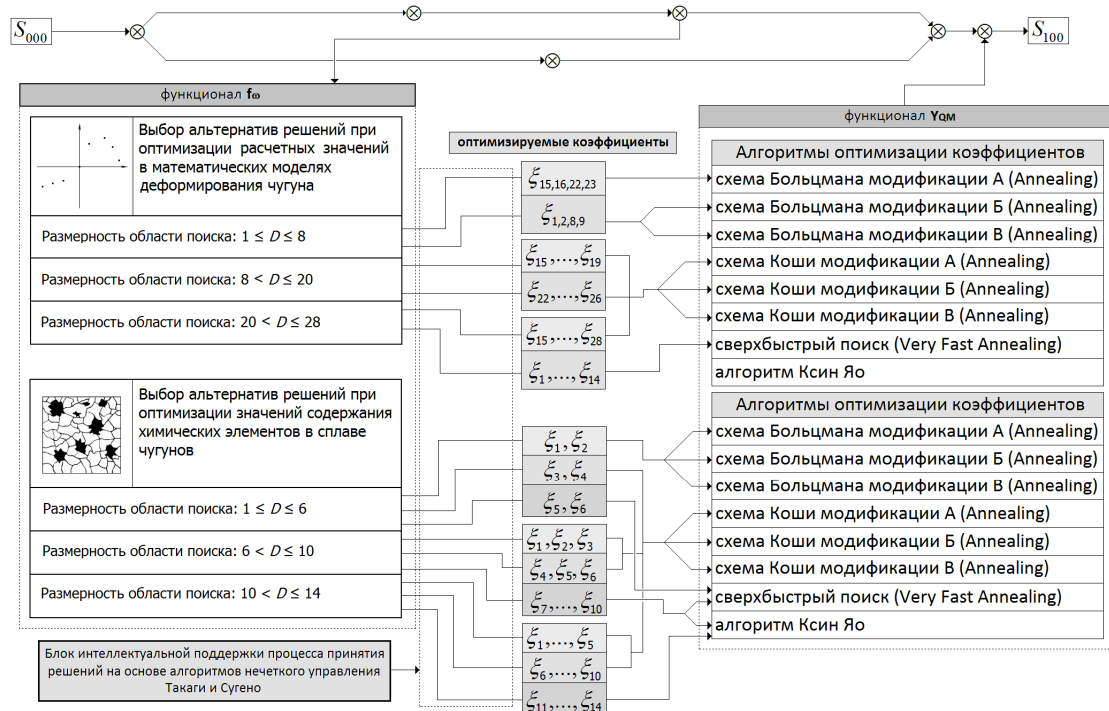


Рис. 3. Выбор модификации алгоритма

Здесь схема алгоритма определяется в зависимости от размерности области поиска и вида расчётных параметров математической модели.

Описание программного комплекса

С целью проведения полного исследования создан программный комплекс, состоящий из нескольких модулей (рис. 4), каждый из которых выполняет отдельную функцию. Программный комплекс служит руководством для принятия управленческих решений при формировании сплавов чугуна с требуемыми характеристиками. Основная задача программного комплекса - осуществление интеллектуальной поддержки принятия решений в системах управления процессом формирования структуры и химического состава отливок из чугунов различных марок. Программа написана на современном языке объектно-ориентированного программирования С++ и работает в последних версиях операционных систем [2, 5].

Комплекс программ снабжён простым интерфейсом, ввод данных производится вручную, вывод данных производится в оконном режиме. Выполнение отдельных задач происходит в отдельном модуле. Модульно-функциональная схема программного комплекса представлена на рис. 4.

Схема алгоритма и численные параметры задаются в специальном окне модуля (рис. 5), который позволяет оценивать скорость сходимости алгоритма и точность решения.

Результаты работы алгоритма стохастического поиска по выбранной схеме выводятся в отдельном модуле программы в виде, представленном на рис. 6.

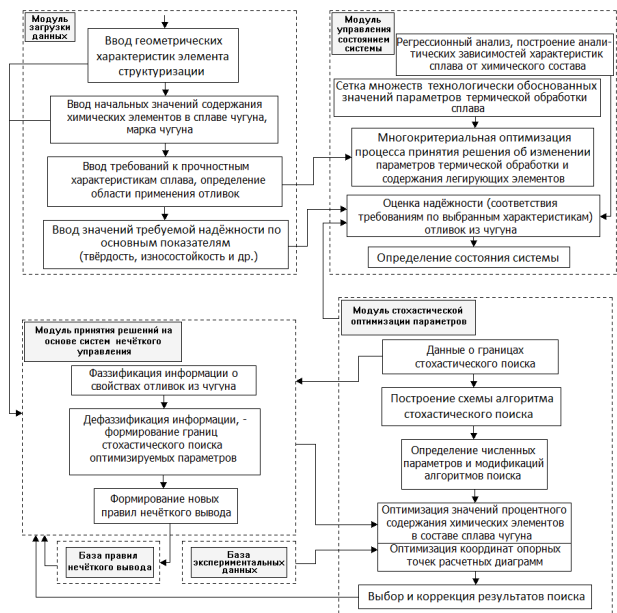


Рис. 4. Модульно-функциональная схема программного комплекса

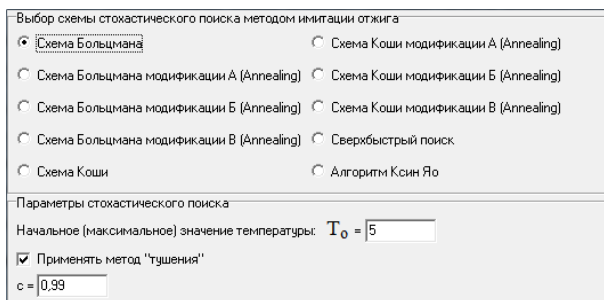


Рис. 5. Окно выбора схемы и параметров алгоритма стохастической оптимизации

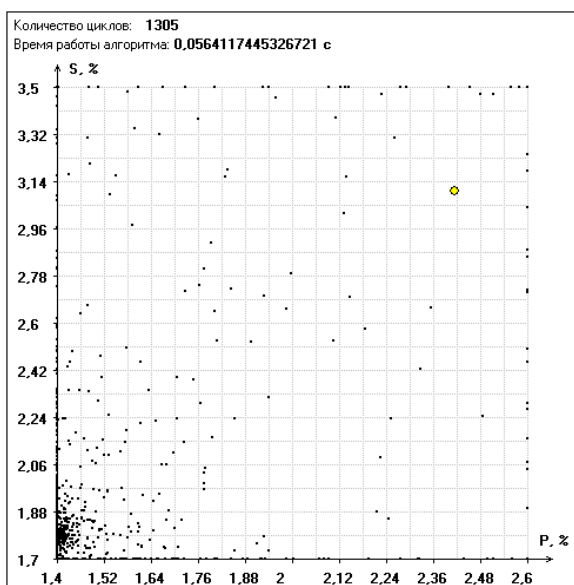


Рис. 6. Вывод результатов работы алгоритма

Разработанный программный комплекс не только реализует интеллектуальную поддержку процессов управления структуризацией сплавов, но и позволяет исследовать работу различных схем алгоритмов стохастической оптимизации в совокупности с применением методов компьютерного моделирования и нечёткого управления [5].

Результаты исследования

Область поиска при проведении расчётов с применением описанного программного обеспечения ограничена тринадцатью величинами. Ограничения наложены и на область определения исследуемых функций и на расчётные параметры схем алгоритма имитации отжига различных модификаций. Важно отметить, что скорость сходимости алгоритма и точность входных данных (оптимума) в сильной степени зависят от этих численных параметров.

Исследование проводилось с применением неявно заданных функций $f_1: R^6 \rightarrow R$, $f_2: R^8 \rightarrow R$, $f_3: R^9 \rightarrow R$ на заданной области поиска.

При проведении вычислительного эксперимента значение параметра T_0 фиксировалось и было равно 5. Для ускорения работы алгоритмов было принято применять метод «тушения», то есть температура системы уменьшалась по геометрической прогрессии: $T = cT_0$, где c равен 0,999.

Исследования проводились на компьютере с частотой процессора 3.50GHz.

На рис. 7 графически представлены результаты вычислительного эксперимента при исследовании точности выходных данных алгоритмов различных модификаций. На рис. 8 представлены результаты при исследовании скорости сходимости алгоритмов тех же модификаций.

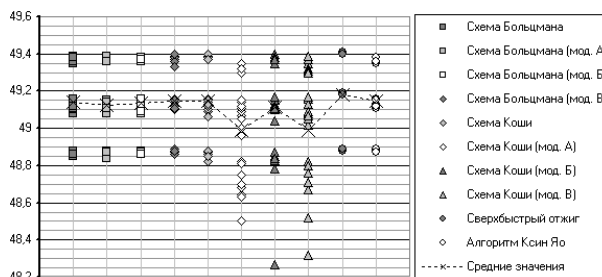


Рис. 7. Сравнение точности результатов работы алгоритмов различных схем (поиск максимума)

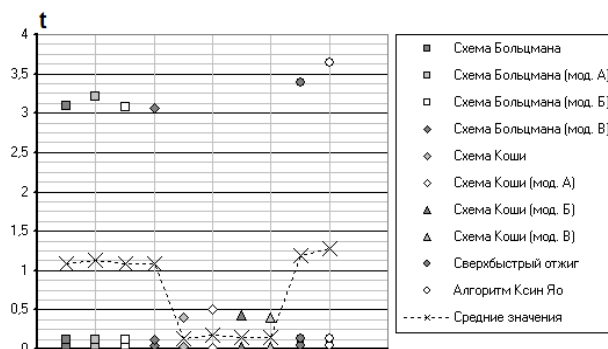


Рис. 8. Сравнение скорости сходимости алгоритмов имитации отжига различных схем (поиск максимума)

Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- наивысшую точность результатов при оптимизации функций показали алгоритмы, созданные на основе схемы Больцмана модификации В, а также алгоритм на основе схемы, предложенной Л. Ингбером;

- разброс значений, получаемых с применением схемы Больцмана модификации В, существенно ниже, чем разброс значений, получаемых при работе алгоритмов других схем;
- работа алгоритмов, построенных на основе схем Больцмана и Коши, отличается существенным отклонением результатов от оптимальных значений;
- наименьшей скоростью приближения искомого значения к оптимальному обладает алгоритм, построенный на основе схемы Ксин Яо.

Отметим, что существенным преимуществом модифицированных алгоритмов имитации отжига на основе схем Коши и Больцмана является возможность коррекции расчётных параметров схем с целью изменения точности вычислений или времени работы алгоритмов.

Литература

1. Жиглявский А.А., Жилинскас А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991.
2. Experience in using stochastic Optimization methods for Determining numerical parameters of models in materials structurization management systems / A.M. Korneev, O.P. Buzina, A.V. Sukhanov, I.A. Shipulin // International Journal of Engineering and Technology (UAE). Special Issue 5. 2018. Vol. 7. № 3.5. P. 32–36.
3. Тихомиров А.С. О быстрых вариантах алгоритма отжига (simulated annealing) // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. Т. 46. № 3. С. 379-394.
4. Тихомиров А.С. О скорости сходимости одно-родного марковского монотонного поиска экстремума // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47. № 5. С. 817-828.
5. Корнеев А.М., Суханов А.В. Опыт использования методов стохастической оптимизации для определения численных параметров математических моделей в системах управления структуризацией чугуновых сплавов // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 3(73). С. 13–17.
6. Корнеев А.М., Бузина О.П., Суханов А.В. Оптимизация схем алгоритмов стохастического поиска с использованием методов нечёткого управления // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 65–70.
7. Корнеев А.М., Сметанникова Т.А., Абдуллах Л.С. Моделирование сложных производственных систем с помощью вероятностных автоматов // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 1. С. 39-43.
8. Грибанова Е.Б. Стохастический алгоритм поиска // Прикладная информатика. 2017. № 2 (68). С. 130-134.
9. Корнеев А.М., Суханов А.В., Шипулин И.А. Исследование точности и скорости сходимости алгоритмов стохастической оптимизации функций на двумерном пространстве // Theoretical & Applied Science. 2018. № 4 (60). С. 184-189.
10. Корнеев А.М., Суханов А.В., Шипулин И.А. Варианты организации и общие схемы алгоритма стохастической оптимизации на основе метода имитации отжига // Theoretical & Applied Science. 2018. № 3 (59). С. 1-5.
11. Лопатин А.С. Метод отжига // Стохастическая оптимизация в информатике. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. № 1. С. 133–149.
12. Szu H.H., Hartley R.L. Fast Simulated Annealing // Physical Letters A. 122. 1987. P. 157-162.
13. Ingber L. Simulated Annealing: Practice versus theory // Mathematical and Computer Modelling. 1993. Vol. 18(11). P. 29–57.
14. Yao X. A New Simulated Annealing Algorithm // International Journal of Computer Mathematics. 1995. 56. P. 161-168.

Поступила 27.02.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Корнеев Андрей Матиславович - д-р техн. наук, доцент, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: weenrok@mail.ru
Суханов Андрей Владимирович - старший преподаватель, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: pm03sav@mail.ru

SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCHING ALGORITHMS OF STOCHASTIC OPTIMIZATION OF IMPLICIT FUNCTIONS

A.M. Korneev, A.V. Sukhanov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: in modern intelligent decision-making systems, it is increasingly necessary to resort to various methods of stochastic optimization in determining the calculated parameters of mathematical models that simulate the work of the object under study or structured, such as cast iron, casting and others. The functions that determine the relationship between the calculated parameters of mathematical models and the quantities that determine the adequacy of the models themselves, as a rule, are implicit. The purpose of this paper is to familiarize the reader with the software package, which allows one to study the accuracy and speed of convergence of stochastic optimization algorithms for implicitly specified functions. The principle of operation of the software system is described in detail; its modular-functional scheme is presented. Algorithms based on random search methods in discrete space and known under the general name of annealing simulation algorithms are considered. The program allows one to optimize the calculated parameters of mathematical models using various modifications of the schemes of the simulated annealing algorithm: the Cauchy and Boltzmann schemes of modifications A, B, and C, superfast annealing, and the

algorithm proposed by Xin Yao. The main design parameters of the algorithms that are paid attention to in the article are the dimension of the search area, the parameters of the stopping criterion (temperature change), the algorithm's operation time, and the values characterizing the probability of the search point moving to a new state (parameters of the Gibbs distribution function). We propose our own variants of schema modification. Special attention is paid to the analysis of the accuracy of the results of the algorithms.

Key words: stochastic search, annealing simulation algorithm, accuracy, optimum, random variable, Gibbs distribution.

References

1. Zhiglyavskiy A.A., Zhilinskas A.G. "Global extremum search methods" ("Metody poiska global'nogo ekstremuma"), Moscow, Nauka, 1991
2. Korneev A.M., Buzina O.P., Sukhanov A.V., Shipulin I.A. "Experience in using stochastic optimization methods for determining numerical parameters of models in materials structuration management systems", *International Journal of Engineering and Technology (UAE), Special Issue 5*, 2018, vol. 7, no. 3.5, pp. 32–36.
3. Tikhomirov A.S. "On fast variants of the annealing algorithm (simulated annealing)", *Stochastic Optimization in Computer Science (Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike)*, 2009, vol. 46, no. 3, pp. 379-394.
4. Tikhomirov A.S. "On the rate of convergence of a homogeneous Markov monotone search for an extremum", *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics (Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki)*, 2007, vol. 47, no. 5, pp. 817-828.
5. Korneev A.M., Sukhanov A.V. "Experience of using stochastic optimization methods for determining the numerical parameters of mathematical models in the control systems for structuring iron alloys", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2018, no. 3 (73), pp. 13-17.
6. Korneev A.M., Buzina O.P., Sukhanov A.V. "Optimization of the schemes of stochastic search algorithms using fuzzy control methods", *Modern High Technologies (Sovremennye naukoymkie tekhnologii)*, 2018, no. 10, pp. 65-70.
7. Korneev A.M., Smetannikova T.A., Abdullah L.S. "Modeling of complex production systems using probabilistic automata", *News of the Higher Educational Institutions of the Black Earth Region (Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2014, no. 1, pp. 39-43.
8. Gribanova E.B. "Stochastic search algorithm", *Applied Informatics (Prikladnaya informatika)*, 2017, no. 2 (68), pp. 130-134.
9. Korneev A.M., Sukhanov A.V., Shipulin I.A. "Investigation of the accuracy and rate of convergence of algorithms for stochastic optimization of functions on two-dimensional space", *Theoretical & Applied Science*, 2018, no. 4 (60), pp. 184-189.
10. Korneev A.M., Sukhanov A.V., Shipulin I.A. "Variants of organization and general schemes of the stochastic optimization algorithm based on the simulated annealing method", *Theoretical & Applied Science*, 2018, no. 3 (59), pp. 1-5.
11. Lopatin A.S. "Annealing method", *Stochastic Optimization in Computer Science (Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike)*, St. Petersburg, Publ. house of St. Petersburg State University, 2005, no.1, pp. 133-149.
12. Szu H.H., Hartley R.L. "Fast simulated annealing", *Physical Letters A*, no. 122, 1987, pp. 157-162.
13. Ingber L. "Simulated annealing: practice versus theory", *Mathematical and Computer Modelling*, 1993, vol. 18(11), pp. 29–57.
14. Yao X. "A new simulated annealing algorithm", *International Journal of Computer Mathematics*, 1995, vol. 56, pp. 161-168.

Submitted 27.02.2019; revised 15.04.2019

Information about the authors

Andrey M. Korneev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya st., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: weenrok@mail.ru

Andrey V. Sukhanov, Assistant Professor, Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya st., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: pm03sav@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ОПТИМИЗАЦИИ
ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**П.Ю. Гусев¹, К.Ю. Гусев¹, С.Ю. Вахмин²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается задача оптимизации планировочных решений производственных подразделений машиностроительных предприятий. Для решения задачи предлагается использование генетического алгоритма. Генетический алгоритм как метод решения задачи нахождения оптимальной планировки неоднократно описан. Однако описание практического применения генетического алгоритма в машиностроительной области не нашло своего отражения в научной литературе. Для решения задачи нахождения оптимального планировочного решения возможно применение программных средств имитационного моделирования, которые уже имеют встроенные механизмы оптимизации, в том числе и на основе генетических алгоритмов. Но применение таких программных средств затрудняется трудоемкостью создания имитационной модели, а также закрытым программным кодом, который реализует работу генетического алгоритма. Проведена формализация решаемой задачи. Для этого осуществлен выбор специфичного для машиностроительных предприятий производственного подразделения. На основе формализованного представления задачи выбран критерий оптимизации и разработан алгоритм расчета функции приспособляемости генетического алгоритма. В работе применены традиционные подходы к разработке принципов функционирования генетического алгоритма и предложен метод скрещивания, учитывающий повторяемость элементов. Реализация предложенного метода скрещивания в виде алгоритма позволила избежать дополнительных проверок на повторяемость элементов после проведения процедуры скрещивания. На основе разработанного генетического алгоритма реализовано программное средство на языке программирования C#. К особенностям программного средства можно отнести возможность изменения исходных данных как самой задачи, так и исходных настроек алгоритма, среди которых – количество популяций, количество генотипов в популяции, количество мутирующих генотипов. Отражены некоторые особенности разработки программного средства. В результате анализа полученных данных определены оптимальные параметры алгоритма для решения поставленной задачи оптимизации планировочного решения

Ключевые слова: генетические алгоритмы, оптимизация, формализация, машиностроение, генотип, функция приспособляемости

Введение

Современные машиностроительные предприятия активно используют новые технологии цифрового производства. Применение этих технологий позволяет эффективно организовать производственные процессы с минимальными затратами. Внедрение технологии цифрового производства подразумевает глобальную реконструкцию всей производственной системы предприятия. Особенно остро проблемы реконструкции возникают перед крупными предприятиями. Программные средства, которыми обеспечиваются цифровые производства, позволяют найти оптимальные параметры производственной системы, получаемые после реконструкции. Однако зачастую задачи формализации исследуемой системы и оптимизации результата решаются недостаточно точно, что

приводит к неудовлетворительному результату внедрения новых цифровых технологий.

Одной из задач реконструкции машиностроительных предприятий является оптимизация планировочных решений производственных подразделений. Аналогичная задача возникает при проектировании нового производственного подразделения. Для решения данной задачи необходимо учитывать специфику машиностроительных предприятий. Например, в ракетно-космическом машиностроении для производства корпуса турбины может потребоваться до 120 операций на различных рабочих местах. В авиационной промышленности для производства элемента закрылка из полимерных композиционных материалов требуется до 50 операций на различных рабочих местах [1]. Приведенные примеры говорят о том, что технологические маршруты на машиностроительных предприятиях могут иметь большое количество операций. Это приводит к повышенным требованиям при планировании технологиче-

ской цепочки в производственном подразделении.

Учитывая, что количество технологических процессов на одном предприятии может достигать нескольких тысяч, то получение планировочного решения является задачей многофакторной многокритериальной оптимизации.

Как следствие, возникла задача разработки современного метода получения оптимального планировочного решения без применения дорогостоящих программных продуктов. Одним из таких методов является применение генетического алгоритма для оптимизации планировочного решения. Вопросы оптимизации и применения генетических алгоритмов многократно рассматривались в отечественной литературе [2-6]. Однако массовому применению генетических алгоритмов в оптимизации производственных систем препятствует строго научный подход к решению рассматриваемых задач. Инженеры, работающие на производстве, не всегда могут быть знакомы с математическими положениями, применяемыми при формальном описании генетического алгоритма.

В зарубежной литературе также можно найти исследования генетического алгоритма применительно к задаче оптимальной планировки [7, 8]. В статье [7] тоже предлагается использовать нечеткую логику при решении подобных задач. Авторы работы [8] предлагают использовать дополнительные операторы обмена и вращения, которые позволяют расширить зону поиска в работе алгоритма. Однако оценка эффективности проводилась по ранее решенным задачам и не всегда может проецироваться на особенности отечественных машиностроительных предприятий со слабой автоматизацией.

Таким образом, целью данной работы является получение реализации генетического алгоритма для оптимизации планировочных решений с формализацией реальной задачи.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: выбор исследуемой системы, формализация задачи оптимизации, разработка генетического алгоритма и оператора скрещивания, реализация предложенных положений в программном средстве.

Формализация задачи

Основываясь на опыте работы с машиностроительными предприятиями, объектом исследования выбран участок механической об-

работки деталей как наиболее показательный и отражающий специфику предприятий в целом. Исследуемое производственное подразделение можно рассматривать как замкнутую производственную систему, которая характеризуется прямоточностью обработки поступающих заготовок и заранее известным дискретным временем обработки. От исследования сборочных операций в данной работе решено отказаться, т.к. сборочные операции, как правило, характеризуются одним постоянным рабочим местом.

Для формализации поставленной задачи оптимизации, в первую очередь, рассмотрена типовая планировка исследуемого участка. Оборудование на участке объединено по технологическому принципу и расположено в две линии. Можно точно определить расстояние между оборудованием и ширину проезда. Таким образом, для расстояний между оборудованием можно ввести свой весовой коэффициент, который на планировке выражается в метрах.

При прохождении каждой детали своего технологического маршрута можно подсчитать сумму пройденного расстояния. Полученная сумма является критерием, который необходимо минимизировать для получения оптимального планировочного решения. Учитывая наличие нескольких технологических маршрутов, критерием оптимизации будет выступать сумма частных решений. Таким образом, в формализованном виде можно определить критерий оптимизации:

$$\sum_{i=1}^n S_i \longrightarrow \min, \quad (1)$$

где n – количество технологических маршрутов, S_i – сумма пройденного расстояния i -го технологического маршрута.

На рис. 1 представлен частный случай схемы формализации задачи оптимизации планировочного решения.

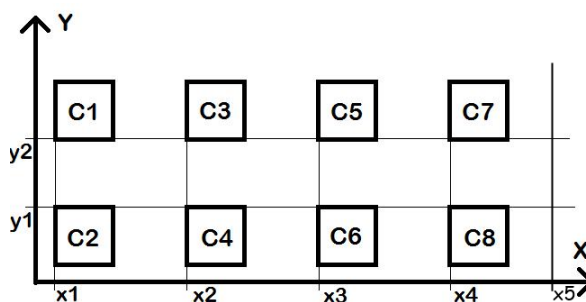


Рис. 1. Схема формализации задачи

Например, требуется рассчитать пройденное расстояние технологического маршрута С1-С3-С8. Координаты станка задаются по ближайшему к проезду левому углу. В таком случае пройденное расстояние может быть вычислено как:

$$S = \sqrt{x_1^2 + y_2^2} + (x_2 - x_1) + \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + (x_5 - x_4) \quad (2)$$

Разработка генетического алгоритма

Учитывая предложенную схему формализации задачи, каждый генотип в популяции генетического алгоритма представляет собой последовательность наименований оборудования - генов. При этом каждая неповторяющаяся последовательность генов представляет собой уникальное решение. Основная идея применения генетического алгоритма – это выполнение определенных операций над генотипами, которые имитируют процесс эволюционного отбора. На рис. 2 представлен обобщенный принцип работы используемого генетического алгоритма.

Генерация начального поколения осуществляется созданием случайных генотипов. Набор случайных генотипов позволяет охватить наибольшее количество решений. В случае отсутствия приемлемого решения можно увеличить количество генотипов или количество поколений для нахождения оптимального решения.

В работе генетического алгоритма предусмотрена возможность сохранения лучшего решения. Такая возможность позволяет генотипу, показавшему лучший результат, сохранять все свои гены. Таким образом, лучший генотип из текущей популяции только передает часть своих генов потомкам, но сам не изменяется.

Разработанный генетический алгоритм предусматривает функцию мутации. Мутирующий генотип заполняется случайными значениями. Мутация происходит с генотипом, имеющим наихудшую функцию приспособляемости. Это позволяет обновлять генотип, что может скорее привести к глобальному экстремуму.

Учитывая особенности исследуемой задачи, предложен алгоритм операции скрещивания. Ввиду того, что все технологические маршруты в производственном подразделении подчиняются принципу прямооточности, то решено сохранять первую половину генов в лучших решениях. Первый генотип при скрещивании

сохраняет первую половину своих генов. Вторая половина генов формируется скрещиванием. Лучший генотип текущей популяции сохраняется и в скрещивании участия не принимает.

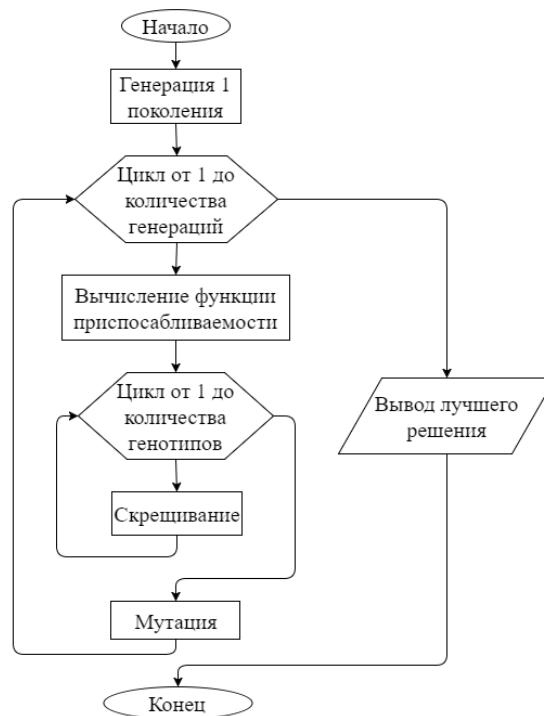


Рис. 2. Принцип работы генетического алгоритма

Формально работу предлагаемого оператора скрещивания можно описать следующим образом. Работе оператора скрещивания подвергается пара родительских генотипов:

$$\begin{cases} G_1 = (g_1^1, g_2^1, \dots, g_n^1) \\ G_2 = (g_1^2, g_2^2, \dots, g_n^2) \end{cases} \quad (3)$$

где G – родительский генотип, g – ген в генотипе, n – количество генов в каждом генотипе.

Каждая пара скрещиваемых генотипов выбирается согласно функции приспособляемости. Генотип G_1 обладает лучшим значением функции приспособляемости в сравнении с генотипом G_2 . Первыми скрещиваются 2 по приспособляемости генотип и следующий за ним. Далее скрещиваются 4 и 5 по значению функции приспособляемости генотипы. Далее идет скрещивание до количества генотипов в популяции с шагом 2.

Два родительских генотипа в результате скрещивания дают 2 генотипа – потомка:

$$\begin{cases} C_1 = (c_1^1, c_2^1, \dots, c_n^1) \\ C_2 = (c_1^2, c_2^2, \dots, c_n^2) \end{cases} \quad (4)$$

где C – генотип-потомок, c – ген в генотипе-потомке, n – количество генов в каждом генотипе.

Значения генов-потомков определяются следующим образом:

$$c_i^1 = \begin{cases} g_i^1, \text{при } i < n/2 \text{ или } i > n/2 \text{ и } i - \text{четное} \\ g_i^2, \text{при } i > n/2 \text{ и } i - \text{нечетное} \end{cases}, \quad (5)$$

$$c_i^2 = \begin{cases} g_i^1, \text{при } i - \text{нечетное} \\ g_i^2, \text{при } i - \text{четное} \end{cases} \quad (6)$$

Условия поставленной задачи диктуют необходимость наличия всех генов в каждом генотипе и гены не должны повторяться. При работе оператора скрещивания проводится проверка: если количество генов $n_{C_i} \neq n_{G_i}$, то в генотип C^1 добавляются гены из генотипа G^2 , а в генотип C^2 добавляются гены из генотипа G^1 . Описанный оператор скрещивания можно отнести к частному случаю многоточечного скрещивания.

Программная реализация и тестирование генетического алгоритма

Реализация генетического алгоритма оптимизации планировочных решений производственных подразделений производилась в среде программирования Visual Studio на языке программирования C#. Наличие множества встроенных функциональных возможностей языка позволило сосредоточить усилия на разработке алгоритма оптимизации. При этом вопросы использования вспомогательных средств отошли на второй план.

Первый этап реализации генетического алгоритма – это определение функциональных возможностей программного средства. Разрабатываемое программное средство должно обеспечивать:

- внесение и изменение исходных данных;
- управление настройками генетического алгоритма;

- проведение оптимизации с применением генетического алгоритма;
- вывод графика нахождения оптимального решения.

На рис. 3 изображена таблица с исходными данными. В ней внесены данные о станках и их местоположении. Каждый станок представляет собой ген. Совокупность генов, описывающих станки, представляет собой отдельный генотип.

Название	Координата X	Координата Y
Stanok0	0	0
Stanok1	0	120
Stanok2	80	0
Stanok3	80	120
Stanok4	160	0
Stanok5	160	120
Stanok6	240	0
Stanok7	240	120

Рис. 3. Окно с исходными данными

Программная реализация генетического алгоритма разработана с применением объектно-ориентированной парадигмы программирования. Генетический алгоритм реализован в отдельном классе, содержащем программные методы, обеспечивающие работу оператора скрещивания, оператора мутации, вычисления функции приспособляемости. Реализация генетического алгоритма в отдельном классе позволит, при необходимости, упростить применение генетического алгоритма в других программных средствах.

Для реализации работы генетического алгоритма создаются 5 уникальных полей:

- поле для хранения количества генераций, которые будут получены в ходе оптимизации;
- поле для хранения количества популяций, которые будут создаваться в рамках одной генерации;
- поле для учета количества генов в одном генотипе. По сути, каждый ген – это отдельный станок;
- поле для регулирования использования мутаций при проведении оптимизации;
- поле для сохранения лучшего результата при проведении оптимизации.

Важный этап программирования генетического алгоритма – вычисление значения функции приспособляемости. Значение функции приспособляемости отвечает за то, какие генотипы будут продолжать существование и будут скрещиваться, а какие прекратят свое существование или мутируют. Функция приспособляемости просматривает каждый технологический процесс и каждый генотип. Затем для каждого технологического процесса подсчитывается вес маршрутов, которые предстоит пройти деталям. После прохода всех технологических процессов по одному генотипу, значения функций для каждого технологического процесса складываются между собой. Таким образом, для каждого генотипа вычисляется своя функция приспособляемости. После вычисления функций приспособляемости происходит сортировка и этап скрещивания.

Для проверки работоспособности разработанной программной реализации генетического алгоритма с предложенным оператором скрещивания рассмотрен реальный участок механической обработки машиностроительного предприятия. На участке находится 12 единиц оборудования. Используемые технологические маршруты изготовления четырех деталей получены из маршрутных карт.

Для оценки эффективности работы генетического алгоритма и предложенного оператора скрещивания в программном средстве имитационного моделирования Plant Simulation создана модель рассматриваемого участка механической обработки. Данное программное средство выбрано ввиду того, что оно содержит инструменты оптимизации на основе генетических алгоритмов. В таблице представлены результаты оптимизации в имитационной модели и разработанном программном средстве, при этом применялись разные параметры генетического алгоритма. Каждый эксперимент проводился 5 раз, в результат записано среднее значение.

Результаты оптимизации

№ эксперимента	Размер популяции	Количество популяций	Результат в имитационной модели	Результат в разработанном программном средстве
1	5	15	6000	6200
2	10	20	5940	6140
3	15	25	5800	5760
4	20	30	5460	5260
5	40	100	5140	5140

Параметры генетического алгоритма использовались идентичные параметрам в имитационной модели. Исключение составляют параметры сохранения лучшего решения и мутации. Это связано с тем, что программное средство имитационного моделирования не предоставляет возможность управлять этими параметрами.

Как видно из сравнительного анализа результатов – оба алгоритма в 5 эксперименте определили оптимальный результат. При этом в первых двух экспериментах лучший результат найден в имитационной модели, а в 3 и 4 экспериментах лучший результат показал генетический алгоритм с предложенным оператором скрещивания. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный генетический алгоритм показывает эффективную работу при параметрах размера популяции в 15 генотипов и при количестве популяций больше 20.

Дальнейшие эксперименты с программным средством показали, что при отключении мутаций решение зачастую останавливается на локальном минимуме и дальше поиск не продолжается. Мутации позволяют «пробовать» локальное решение и расширять зону поиска. Отключение процедуры сохранения лучшего решения показывает хорошие результаты оптимизации. Однако данные результаты не стабильны по отношению к полученным оптимальным параметрам алгоритма.

Выводы

В результате работы получено формализованное описание поставленной задачи. Предложенный оператор скрещивания для генетического алгоритма позволяет успешно проводить поиск оптимальных решений. Тестирование программной реализации генетического алгоритма показало эффективность применения предложенного оператора скрещивания. В дальнейшем планируется предложить дополнительные операторы скрещивания, которые расширят область применения данной реализации генетического алгоритма.

Таким образом, достигнута главная цель проведенной работы: получена реализация генетического алгоритма для оптимизации планировочных решений с предложенным оператором скрещивания.

Литература

1. Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Имитационное моделирование производства деталей из полимерных композиционных материалов //Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. №. 2. С. 245-252.
2. Лаздынь С.В., Секирин А.И., Коробкова Т.А. Оптимизация компоновки технологического оборудования гибких производственных систем с использованием генетических алгоритмов //Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2007. №. 2. С. 114-119.
3. Спиричин А.А., Бурковский В.Л., Воропаев А.П. Анализ эффективности использования метода нечёткой классификации и генетических алгоритмов в интеллектуальной системе поддержки принятия врачебных решений //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. №. 2.
4. Елизаров Д.Э., Бурковский В.Л. Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания населения //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. №. 1.
5. Кравец О.Я., Чудинова К.В. Оптимизация мониторинга телекоммуникационных сетей для создания резервной производительности системы //Информационные технологии моделирования и управления. 2017. Т. 106. №. 4. С. 285-298.
6. Рыжков В.А., Юров А.Н., Кольцов А.С. Формализация задачи проектирования с целью автоматизации и оптимизация сборочных технологических процессов //Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. 2015. С. 419-423.
7. Jadram C., Boongsod W. Application of fuzzy materials-handling inputs with the genetic algorithm for machine layout //Industrial Technology and Management (ICITM), 2018 7th International Conference on. IEEE, 2018. С. 265-269.
8. Hasda R.K., Bhattacharjya R.K., Bennis F. Modified genetic algorithms for solving facility layout problems //International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2017. Т. 11. №. 3. С. 713-725.

Поступила 01.02.2019; принята к публикации 21.03.2019

Информация об авторах

Гусев Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-55-11-640, e-mail: GusevPvl@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3752-0152>

Гусев Константин Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. (473)243-77-20

Вахмин Сергей Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, преподаватель кафедры 207 физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. (473)244-76-13, e-mail: vax_serg@mail.ru

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF PLANNING DECISIONS OF INDUSTRIAL DIVISIONS OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

P.Yu. Gusev¹, K.Yu. Gusev¹, S.Yu. Vahmin²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russia

Abstract: the work solves the problem of optimizing the planning decisions of the production departments of machine-building enterprises. To solve the problem, the use of a genetic algorithm is proposed. The genetic algorithm, as a method for solving the problem of finding the optimal layout, has been repeatedly described. However, the description of the practical application of the genetic algorithm in the engineering field has not been reflected in the scientific literature. To solve the problem of finding the optimal planning solution, it is possible to use simulation tools that already have built-in optimization mechanisms, including those based on genetic algorithms. But the use of such software is hampered by the complexity of creating a simulation model, as well as a closed program code that implements the work of the genetic algorithm. In this work, the formalization of the problem was done. The selection of a production unit specific to machine-building enterprises was carried out. Based on the formalized presentation of the task, an optimization criterion was chosen and an algorithm was developed for calculating the adaptability function of the genetic algorithm. In the work, traditional approaches to the development of the principles of functioning of the genetic algorithm were applied and a crossing method was proposed that takes into account the repeatability of elements. The implementation of the proposed crossing method in the form of an algorithm made it possible to avoid additional checks on the repeatability of elements after the crossing procedure. Based on the developed genetic algorithm, a software tool in the C# programming language was implemented. The features of the software include the possibility of changing the initial data of both the task itself and the initial settings of the algorithm, among which there are the number of populations, the number of genotypes in the population, the number of mutated genotypes. The paper reflects some features of software development. As a result of the analysis of the obtained data, the optimal parameters of the algorithm were determined for solving the set optimization problem for the planning solution

Key words: genetic algorithms, optimization, formalization, engineering, genotype, adaptability function

References

1. Chizhov M.I., Skripchenko Yu.S., Gusev P.Yu. "Simulation modeling of the production of parts from polymer composite materials", *Computer Research and Modeling (Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye)*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 245-252.
2. Lazdyn' S.V., Sekirin A.I., Korobkova T.A. "Optimization of the layout of technological equipment of flexible production systems using genetic algorithms", *Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering (Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya)*, 2007, no. 2, pp. 114-119.
3. Spiryachin A.A., Burkovskiy V.L., Voropayev A.P. "Analysis of the effectiveness of using the method of fuzzy classification and genetic algorithms in the intellectual system to support medical decision-making", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 2.
4. Yelizarov D. E., Burkovskiy V. L. "Optimization models of the formation of the structure of developing multi-service networks of information services for the population", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 1.
5. Kravets O. YA., Chudinova K. V. "Optimization of monitoring telecommunication networks for creating backup system performance", *Information Technologies for Modeling and Management (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2017, vol. 106, no. 4, pp. 285-298.
6. Ryzhkov V. A., Yurov A. N., Kol'tsov A. S. "Formalization of the design task for the purpose of automation and optimization of assembly technological processes", *Modern Instrumental Systems, Information Technologies and Innovations (Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii)*, 2015, pp. 419-423.
7. Jadram C., Boongsod W. "Application of fuzzy materials-handling inputs with the genetic algorithm for machine layout", *7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM) - IEEE*, 2018, pp. 265-269.
8. Hasda R. K., Bhattacharjya R. K., Bennis F. "Modified genetic algorithms for solving facility layout problems", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 713-725.

Submitted 01.02.2019; revised 21.03.2019

Information about the authors

Pavel Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. 8-952-55-11-640, e-mail: GusevPvl@gmail.com

Konstantin Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7(473) 243-77-20

Sergey Yu. Vakhmin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), tel. +7(473) 244-76-13, e-mail: vax_serg@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТВОРЕНИЯ И РОСТА САХАРНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Д.В. Арапов¹, С.Л. Подвальный², С.Г. Тихомиров¹¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описаны нелинейные вероятностные математические модели скорости растворения и роста кристаллов сахарозы в поликомпонентных растворах. Экспериментальной основой разработанных моделей послужили: для скорости растворимости – 255 опытов А. Бригель-Мюллера, для скорости роста – 421 опыт ученых А. Бригель-Мюллера, Г. Вавринца и других. Анализ известных исследований эволюции сахарных растворов в процессе растворения и роста кристаллов позволяет сделать вывод о дискретном, вероятностном механизме этих явлений. Погрешность модели скорости растворимости составила $\pm 9,6\%$ отн., а модели скорости роста кристаллов $\pm 11,3\%$ отн. при величине шага итераций $0,1 \cdot 10^{-6}$. Аддитивная модель скорости растворимости состоит из четырех составляющих: диффузионной, обусловленной химическими реакциями с водой и несахарами, с образованием гидратированных молекул сахара и комплексов сахар-несахар, и образующейся в результате вырывания из кристалла активных сахарозных молекул. Модель скорости роста сахарного кристалла включает в себя слагаемые: диффузионную, поверхностную кристаллохимическую, непосредственного захвата кристаллом молекул сахарозы, распада комплексов сахар-несахар, включения в кристалл несахаров и воды. Для построения моделей использовали генетический алгоритм с последующим уточнением параметров моделей методом конфигураций Хука-Дживса

Ключевые слова: математическая модель, скорости растворимости и роста, кристалл сахара, генетический алгоритм, метод конфигураций Хука-Дживса

Введение

Рост или растворение кристаллов сахарозы зависит от её концентрации в растворе. В пересыщенной среде кристаллы растут, а в ненасыщенной растворяются.

Проблема растворимости кристаллов сахарозы в чистой воде и поликомпонентных растворах напрямую связана с потерями сахара-песка при его производстве. Например, потери сахара с мелассой достигают 50% от массового расхода оттока.

Производственные сахарные растворы представляют собой сложные многокомпонентные системы, включающие воду, сахарозу, соли щелочных металлов и слабых органических и неорганических кислот, коллоидные и другие органические вещества. Общее название примесей – несахара. Они блокируют молекулы сахарозы в растворе и препятствуют их кристаллизации.

В соответствии с современными представлениями [1, 2] о мелассообразовании одна часть сахарозы в растворе связана с водой, а другая – с несахарами. Небольшие количества несахаров снижают растворимость сахарозы, но с повышением их концентрации растворимость последней значительно увеличивается. Снижение растворимости в области низких концентраций несахаров объясняется гидратированием ионов

солей или молекул неэлектролитов, имеющих полярные группы, а повышение в области высоких соотношений несахар/вода обусловлено химическим взаимодействием сахарозы и комплекса несахаров. Гипотеза о решающем значении химического взаимодействия сахарозы с несахарами в мелассообразовании в настоящее время является главенствующей [1], хотя она и не отвечает на некоторые вопросы.

Постановка задачи

Химическое взаимодействие сахара (СХ) с несахаром (НСХ) в поликомпонентном водном растворе с образованием комплекса в общем виде может быть представлено реакцией: $mCX + nHCX \xrightleftharpoons[K_p]{K_o} mCX - nHCX$, где m и n – стехиометрические коэффициенты; K_o , K_p – скорости реакции образования комплекса и его распада, зависящие от степени пересыщения раствора и концентрации несахара. Вероятно, что для каждого вида несахара и его концентрации существует свое значение степени пересыщения, определяющее направление реакции. Для упрощения при моделировании было принято: в ненасыщенном растворе реакция сдвинута вправо, в пересыщенном влево, а в насыщенном скорости образования комплекса и его распада равны. Другими словами, в нена-

сыщенном растворе сахара дополнительно растворяют сахарозу с образованием комплексов той или иной степени устойчивости, а в пересыщенном растворе комплексы распадаются, сахароза высвобождается и участвует в процессе кристаллизации.

С теоретической точки зрения растворимость сахарозы в водных средах может быть выражена [2-4] в виде постоянной активности насыщенной фазы – термодинамической концентрации, хотя при этом обычная растворимость может изменяться. Связь между активностью и растворимостью осуществляется через коэффициент активности γ :

$$C_a = \gamma \cdot Z, \quad (1)$$

где C_a – активность насыщенного сахарного раствора; Z – безразмерное отношение сахара к воде; γ – коэффициент активности.

Таким образом, показатель растворимости сахарозы может быть выражен через коэффициент эквивалентной активности γ . В общем случае уравнение для коэффициента активности [3] имеет вид:

$$\lg \gamma = b \cdot Z + \sum_i^K \beta_i \cdot \mu_i + \sum_j^M B_j \cdot N_{ij}, \quad (2)$$

где b , β_i , B_j – постоянные коэффициенты; μ_i – ионная сила i электролита в растворе; N_{ij} – массовое отношение j электролита к воде.

Так как в производственных условиях величины μ_i и N_{ij} определить сложно, то правая часть (2) должна быть упрощена до некоторой функции $\varphi(Z, N)$, где N – отношение сахара/вода. Тогда имеем:

$$\lg \gamma = \varphi(Z, N). \quad (3)$$

Объединяя (1) и (3), получим [5] значение термодинамической концентрации сахарозы:

$$C_a = Z \cdot 10^{\varphi(Z, N)}, \quad (4)$$

где $\varphi(Z, N)$ – функция зависимости коэффициента активности от отношений сахара и сахара к воде.

Проблема растворимости сахарозы в водных средах включает в себя определение как собственно растворимости, так и расчет скорости растворимости. Основное внимание в литературе уделено первому вопросу – определению растворимости [6-12].

Наиболее полно исследована растворимость сахарозы в чистой воде. Для её расчета Международная комиссия ICUMSA рекомен-

дует уравнение Г. Вавринца [6] как наиболее обоснованное термодинамически:

$$H_0 = 64,447 + 0,822 \cdot 10^{-1} \cdot t + 0,16169 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 - 0,1558 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0,463 \cdot 10^{-7} \cdot t^4, \quad (5)$$

где H_0 – концентрация сахара, % масс.; t – температура раствора, °C.

Моделирование растворимости сахарозы в нечистых растворах выполнено в [13-15]. Авторами получена обобщенная зависимость коэффициента насыщения (отношение растворимости сахарозы в нечистом растворе при температуре t к её растворимости в чистой воде при той же температуре) от температуры и отношения сахара/вода:

$$\alpha_H = 1 + a_1 N \cdot (a_2 t + a_3 \ln(t) - t^2) + a_4 N^2 \cdot (a_5 t + a_6 \ln(t) - t^2) + a_7 (N \cdot t)^{m1} / \left(\frac{H_0}{100 - H_0} \right)^{m2}, \quad (6)$$

где α_H – коэффициент насыщения; $a_1 - a_7, m1, m2$ – регрессионные коэффициенты, зависящие от вида комплекса сахара, входящих в конкретный раствор. Экспериментальной базой уравнения (6) послужили многочисленные опыты (более 2000), проведенные исследователями разных стран [14, 15].

Значительно меньше внимания уделено определению скорости растворения сахарозы [2, 3, 9, 16]. Отмечается, что растворение сахарозы в воде скорее всего обусловлено диффузией, но это не изотропный процесс, так как скорость растворения различных граней разная. Шандера [2, 3], применив диффузионную теорию, установил, что скорость растворения прямо пропорциональна массе кристалла и обратно пропорциональна его поверхности и времени. Е.Б. Трейвус [17] связал скорость растворения (j) с формой и размером кристалла (r – радиус кривизны), скоростью движения раствора (u), недосыщением (ΔC) и коэффициентом диффузии (D):

$$j = 0,45 \cdot \Delta C \cdot \sqrt{\frac{D \cdot u}{r}}.$$

Экспериментально было выявлено, что различные грани одного и того же кристалла растворяются с разными скоростями. Из этого следует вывод о различных скоростях растворимости кристалла в целом, изменяющихся от опыта к опыту, то есть о вероятностном характере растворения.

Экспериментальные исследования

Используем формулы (4) – (6) при определении скорости растворения кристаллов. В качестве экспериментальной основы математической модели применим опыты известного датского ученого А. Бригель-Мюллера [18]. Его исследования выполнены при температуре раствора соответственно 30, 50, 70 °С. Диапазон изменений чистоты раствора (отношение сахара к содержанию сухих веществ) 60–100%, сухих веществ 64–95 %. Скорости растворимости и кристаллизации определялись в статике: одиночные кристаллы массой от 40 до 150 мг подвешивались в заранее приготовленном растворе на нейлоновой нити, закрепленной в торсионных весах. По снижению (или приросту) массы двух измерений до и после растворения (кристаллизации) определялась скорость растворения (кристаллизации). При длительных опытах (порядка трех часов) использовались крупные кристаллы сахара массой до 5 г.

В результате изменения концентрации раствора у поверхности образца образуются нисходящие концентрационные потоки (рис. 1), возникающие под действием различных сил, действующих на кристалл (силы трения, тяжести и подъемная сила) из-за разных плотностей раствора вокруг кристалла и в объеме жидкости. Если вокруг кристалла раствор является насыщенным, то критерий Архимеда конвективных потоков равен [19]:

$$Ar = \frac{9,8065 \rho_H^2 l^3}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_H - \rho_P}{\rho_P}, \quad (7)$$

где Ar – критерий Архимеда; ρ_H – плотность насыщенного раствора; ρ_P – плотность ненасыщенного раствора в окружающем объеме; l – характерный размер кристалла; μ – коэффициент динамической вязкости насыщенного раствора.

В качестве l чаще всего берут диаметр эквивалентного шара:

$$l = d_{\text{экв}} = \left(\frac{6V_{\text{ш}}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}, \text{ равный диаметру шара, имеющего одинаковый с кристаллом объем } V_{\text{ш}}.$$

Моделирование скорости растворения

Принятые допущения: сахароза растворяется за счет диффузии, химической реакции с сахарами, поверхностной химической реак-

ции гидратации и непосредственного взаимодействия кристалла с раствором.

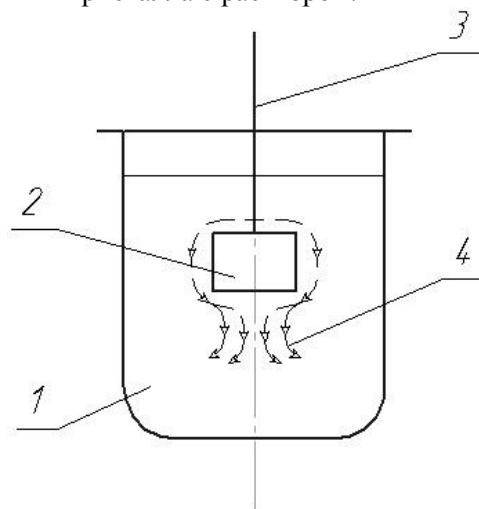


Рис. 1. Схема концентрационных потоков в опытах по определению скорости растворимости сахарозы: 1 – сосуд с ненасыщенным раствором; 2 – кристалл сахара; 3 – нейлоновая нить; 4 – направление концентрационных потоков

Уравнение скорости растворимости имеет вид:

$$K_{\text{РАСТ}} = \frac{dm}{d\tau \cdot F} = k_D (C_H - C_P) + k_X C_H + k_{\Pi} (C_{H1} - C_P)^{m3} + k_O (C_{H2} - C_P)^{m4}, \quad (8)$$

где $K_{\text{РАСТ}} = \frac{dm}{d\tau \cdot F}$ – скорость растворения кристалла, $г / м^2 \cdot мин$; k_D, k_X, k_{Π}, k_O – функциональные коэффициенты соответственно диффузионной скорости растворения, химического взаимодействия, поверхностной реакции и отрыва молекул сахарозы от кристалла раствором; C_H, C_{H1}, C_{H2} – активности насыщенного раствора для указанных составляющих; C_P – активность ненасыщенного раствора в объеме жидкости; $m3 - m4$ – неизвестные формальные порядки реакций.

Для расчета активностей использовались следующие формулы:

$$C_H = Z_K \alpha_H \exp(2,302585093 \times (a_8 Z_K \alpha_H + a_9 / Z_K \alpha_H + a_{10} Z_K \alpha_H / T^2 + a_{11} \ln(Z_K \alpha_H) + a_{12} Z_K \alpha_H / (T(Z_K \alpha_H + a_{13} N))) + a_{14} Z_K^2 \alpha_H^2 / (T(Z_K \alpha_H + a_{15} N))^2)) \times \exp(-a_{16} \cdot (N + 10^{-10})^{m5}); \quad (9)$$

$$C_p = Z \exp(2,302585093 \cdot (a_{17}Z + a_{18} / Z + a_{19}Z / T^2 + a_{20} \ln(Z) + a_{21}Z / (T(Z + a_{22}N)) + a_{23}Z^2 / (T(Z + a_{24}N))^2)) \times \quad (10)$$

$$\times \exp(-a_{16} \cdot (N + 10^{-10})^{m5});$$

$$C_{H1} = \gamma_1 C_H \exp(-\gamma_2 C_H); \quad (11)$$

$$C_{H2} = \gamma_3 C_H \exp(-\gamma_4 C_H), \quad (12)$$

где Z_K – отношение сахар/вода в чистом насыщенном растворе; T – абсолютная температура, °K; α_H – коэффициент насыщения, определяемый по формуле (6) на основе тех экспериментальных данных А. Бригель-Мюллера, где скорость растворения равна или близка к 0; $a_8 - a_{24}$, $\gamma_1 - \gamma_4$, $m5$ – коэффициенты.

Коэффициент диффузионной скорости растворения k_D вычисляли по формуле

$$k_D = a_{25} \alpha_H^{m6} T^{m7} \mu^{m8}, \quad (13)$$

где a_{25} , $m7 - m8$ – коэффициенты.

Для расчета коэффициента динамической вязкости использовали выражение, полученное в [20].

Коэффициент реакции химического взаимодействия сахарозы с несахарами определяли согласно выражению:

$$k_x = a_{26} \cdot (\alpha_H / \mu)^{m9} \exp(-a_{27} \alpha_H / \mu), \quad (14)$$

где a_{26} , a_{27} , $m9$ – коэффициенты.

Коэффициент поверхностной реакции растворения сахарозы рассчитывается по формуле, предложенной в [8] и скорректированной нами:

$$k_{II} = \frac{1}{(a_{28} + a_{29}N)^{m10}} \times \exp\left(\frac{a_{30} + a_{31}Q^3 + a_{32}Q^2 + a_{33}Q}{T}\right) \times \exp\left(\left(\frac{-a_{34}}{(a_{28} + a_{29}N)^{m10}}\right)\right) \times \exp\left(\frac{a_{30} + a_{31}Q^3 + a_{32}Q^2 + a_{33}Q}{T}\right), \quad (15)$$

где Q – чистота раствора, доли ед.; $a_{28} - a_{34}$, $m10$ – коэффициенты.

Благодаря движению фазовой границы часть вещества выхватывается из кристалла раствором непосредственно. Коэффициент реакции отрыва вычисляли по выражению:

$$k_o = \sigma^{m11} Ar^{m12} \cdot \exp\left(\frac{a_{35}}{(1 + a_{36} \cdot Q)^{m13}} + a_{37} + \frac{a_{38} + a_{39}T + a_{40}T^2}{T^{m14}}\right), \quad (16)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раствор–кристалл, $H / м$;

Ar – критерий Архимеда, рассчитываемый по формуле (7); $a_{35} - a_{40}$, $m11 - m14$ – коэффициенты.

Для расчета σ использовали формулу, полученную в [14, 15]. Плотность насыщенного и разбавленного растворов в формуле (7) критерия Архимеда вычисляли по выражению, полученному Синат-Радченко с соавторами [21]. Характерный размер кристалла l в (7) является неизвестной величиной, поэтому он также должен рассчитываться в процессе математического моделирования. Для его расчета использована формула

$$l = a_{40} \cdot \exp((-a_{40} \cdot Q \cdot CV \cdot T) / 273,15), \quad (17)$$

где CV – концентрация сухих веществ в растворе, доли ед.

Анализ зависимостей (11), (12), (14), (15), (17) показывает, что их правые части под функцией «exp» представляют собой экспоненциальные плотности вероятности соответствующих параметров, а в целом математическая модель скорости растворимости имеет вероятностный характер.

Итак, математическая модель, описывающая скорость растворения сахарных кристаллов в моно- и поликомпонентных водных растворах, включает в себя формулы (5)-(17) и известные выражения для вязкости насыщенного раствора, поверхностного натяжения на границе раствор–кристалл, плотностей насыщенного и разбавленного растворов. Для чистой воды содержание сухих веществ было принято равным $CV = 10^{-10}$ дол. ед., а чистота сахарного раствора изменялась от 10^{-10} до 1,0.

Модель имеет 58 неизвестных регрессионных коэффициентов, которые были определены в процессе вычислительного эксперимента на ЭВМ путем минимизации среднеквадратичного отклонения модельных значений скорости от опытных данных А. Бригель-Мюллера. Общее количество использованных экспериментов 255.

Моделирование скорости роста кристаллов сахарозы

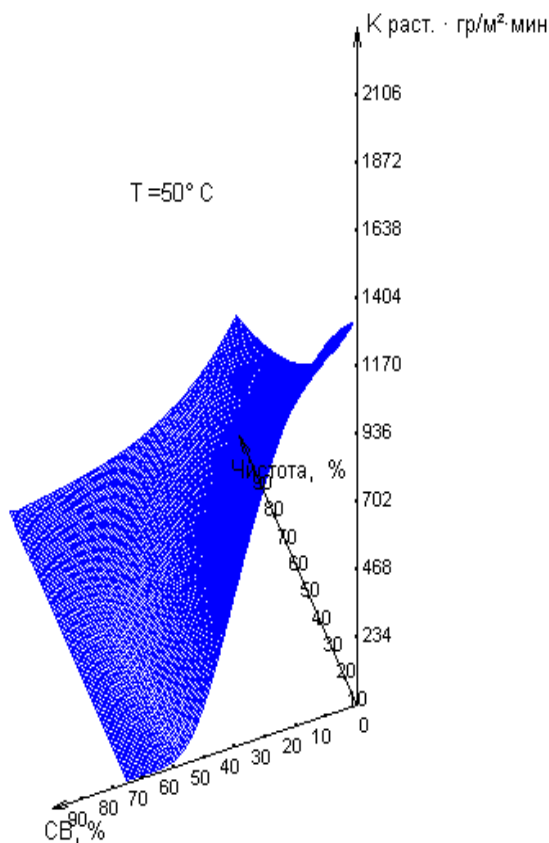


Рис. 2. Зависимость скорости растворимости сахарозы от содержания сухих веществ и чистоты промышленного раствора при температуре 50 °С

Регрессионные коэффициенты в формуле (6) были определены на основе тех опытов, где скорость растворения равна или близка к 0. Они равны:

$$a_1 = -0,767209 \cdot 10^{-4}; a_2 = -132,520232;$$

$$a_3 = -19,211828; a_4 = -0,133812 \cdot 10^{-2};$$

$$a_5 = -7,197855; a_6 = -1361,410294;$$

$$a_7 = -1,079497; m_1 = 1,955193;$$

$$m_2 = 6,605955$$

Погрешность модели равна $\pm 9,6$ % отн. при точности шага итераций 10^{-6} .

На рис. 2 показана трехмерная графическая интерпретация зависимости скорости растворимости от содержания сухих веществ и чистоты раствора для температуры среды 50 °С. С увеличением температуры среды скорость растворимости быстро увеличивается. Зависимость скорости растворимости от чистоты раствора и содержания сухих веществ имеет сложный нелинейный характер. Общая тенденция такова: с понижением чистоты раствора скорость увеличивается, а с увеличением содержания сухих веществ – уменьшается.

При увеличении концентрации сахара в растворе координационное число гидратации уменьшается с 12-8 до 6-5, и свободная вода полностью переходит в связанное гидратное состояние. Установлено [22], что в водных растворах сахарозы с концентрацией более 40% масс. все ее молекулы гидратированы и ассоциированы. И в таких системах могут появляться негидратированные группы молекул, которые сталкиваясь между собой, объединяются в ассоциаты, имеющие общую гидратную оболочку. В концентрированных растворах молекулы сахарозы связывают практически всю воду, присутствующую в системе.

Освобождение сахарозных молекул от водородных связей с молекулами воды является необходимым условием для зарождения кристалла и роста твердой фазы [23]. Установлено, что кристаллы сахара, выращенные при небольших пересыщениях раствора в лабораторных условиях не содержат в своем составе кристаллизационную воду. При кристаллизации сахарозные молекулы вначале освобождаются от водородных связей с гидратной водой, затем ассоциируются, формируют зародыш, встраиваются в решетку. Однако в производственных условиях снижение числа гидратации, обусловленное увеличением температуры и концентрации сахара в растворе, не гарантирует полной дегидратации молекул, и небольшая часть воды ($0,04 \div 0,15$ % к массе сахара песка) вместе с неупорядоченными ассоциатами встраивается в решетку кристалла [24].

Для преодоления энергетического барьера связи растворенных молекул сахара и встраивания их в кристалл необходим [25] разрыв хотя бы части этих связей.

Существующие в растворах флуктуации способствуют кратковременному повышению энергии некоторых молекул, в результате чего они могут преодолевать энергетический барьер и выходить из потенциальной ямы. Образование сахарных ассоциатов [3,8] осуществляется при столкновениях частиц по обратимой реакции: $A_{n-1} + A \rightleftharpoons A_n$. Достигнув критического размера, определяемого числом ассоциированных молекул 80-100 и радиусом ~ 2 нм, ассоциаты превращаются в зародыши кристалликов сахара.

Харин В.М. [26–29] установил, что процесс зародышеобразования в сахарных растворах имеет существенно нестационарный харак-

тер, преобладает автокаталитический механизм нуклеации. На заключительной стадии кристаллизации преобладает вторичное зародышеобразование. При увеличении температуры происходит ускорение как роста кристаллов, так и зародышеобразования. Но рост кристаллов ускоряется быстрее, в итоге кристаллы, выращенные при высокой температуре, были крупнее, чем при низкой.

Реальный процесс массовой кристаллизации состоит из стадий образования зародышей, их роста, растворения, коагуляции и агрегации, перекристаллизации, истирания и разрушения образовавшихся кристаллов из-за столкновений и т.д. Все эти стадии протекают одновременно, поэтому состав кристаллического осадка в значительной степени определяется соотношением скоростей всех перечисленных выше процессов.

Увеличение пересыщения приводит к уменьшению размера кристаллов, однако при высоких пересыщениях наблюдается интенсивная агрегация кристаллов, а их роста практически не происходит.

Из-за более интенсивного влияния на образование кристаллов, чем на их рост, перемешивание раствора способствует образованию более мелких кристаллов [1,8]. Повышение скорости циркуляции раствора приводит к дроблению выросших кристаллов из-за механического воздействия их друг на друга, уменьшению их размеров и появлению новых зародышей, что в определенной степени нейтрализует влияние пересыщения.

Твердая фаза, контактируя с жидкой фазой раствора, может перекристаллизовываться. Различают два вида перекристаллизации – структурную и оствальдовскую [30]. Структурная определяется несовершенством поверхности кристаллов из-за наличия на ней дефектов: трещин, наростов, вкраплений чужеродных молекул и т.п. Молекулы сахарозы стремятся перейти в более выгодное энергетическое состояние. Основой оствальдовской перекристаллизации служит обратно пропорциональная зависимость растворимости частиц от их размера. Коэффициент пересыщения раствора с мелкими кристаллическими частицами меньше, чем с более крупными. Тогда крупные частицы будут расти, а мелкие растворяться.

Процессы коагуляции частиц оказывают большое влияние на параметры твердой фазы. Из-за агрегации молекул, ассоциатов, зародышей и других частиц дисперсионная среда находится в непрерывном развитии [30]. Это

приводит к тому, что частицы, достигшие значительных размеров, теряют кинетическую устойчивость и седиментируют. Вначале образуется путем агрегатирования частиц полидисперсная фаза, далее более крупные частицы растут, мелкие растворяются, и твердая фаза становится более однородной. Эти положения подтверждаются [1] теорией коагуляции Смолуховского и Мюллера.

Установлено [31], что наличие примесей негативно отражается на процессе кристаллизации, так как почти всегда уменьшается скорость роста кристаллов сахара, захватываются примеси, образуются дефекты кристаллической решетки. Примеси, адсорбируясь на поверхности, либо тормозят движение ступени роста (при сильной адсорбции), либо отравляют активные центры кристалла (при слабой адсорбции), при этом часто изменяется габитус кристалла [32–39]. Кристалл может удлиняться [32] или укорачиваться, что объясняется разным влиянием примесей на рост отдельных граней. Изменение габитуса кристалла в присутствии примесей наиболее проявляется при условии контроля роста кристаллохимической реакцией. Примесь может влиять на процессы роста путем внедрения в кристаллическую решетку или образуя включения маточного раствора [33]. На начальном этапе роста кристалл характеризуется максимальным количеством дефектов, в это время скорость роста и количество включений максимальны. В связи с этим, примерно 80% всех включений сосредотачиваются в центре кристалла. Кристаллы, образовавшиеся в процессе спонтанной нуклеации, обычно не имеют включений. По мнению [33], условием встраивания нес сахаров в растущие кристаллы сахара является их высокая положительная гидратация.

Наибольшее развитие в настоящее время получили термодинамическая, диффузионная, молекулярно-кинетическая и дислокационная теории роста кристаллов [1, 5, 17, 34–37]. Они основаны на двух механизмах роста: непрерывном (диффузионная) и дискретном (остальные гипотезы).

Диффузионная теория наиболее распространена. Ее поддерживают известные отечественные и зарубежные ученые [8–12, 29, 30, 38]. Согласно этой гипотезе кристаллизация зависит от обмена вещества между твердой и жидкой фазами [26–29, 39]. На её скорость влияет диффузия молекул к поверхности [30, 39], а также адсорбция и дегидратация молекул сахарозы, образование двумерного зародыша,

диффузия молекул вдоль поверхности грани и укладка в кристаллическую решетку [30, 39, 47–49]:

$$V_D = k_D (C_V - C_P); \quad (18)$$

$$V_{KX} = k_{KX} (C_P - C_H)^n, \quad (19)$$

где V_D и V_{KX} – соответственно скорость роста, определяемая диффузией и кристаллохимической реакцией, $кг / м^2 \cdot с$; k_D и k_{KX} – коэффициенты диффузионной скорости роста и кристаллохимической реакции, $м / с$; C_V, C_P, C_H – концентрации в объеме раствора, у поверхности кристалла и равновесного состояния, $кг / м^3$; n – порядок реакции близкий к 2 [5, 10, 36, 50], хотя многие авторы принимают его равным 1 [8, 9, 11, 12], что весьма сомнительно [36]. Обычно считают, что $V_g = V_r = V_K$, где V_K – скорость роста кристалла. Но это не совсем точно. Из-за движения фазовой границы часть вещества в единице объема кристалла, равная его концентрации в поверхностном слое, захватывается кристаллом непосредственно [17], поэтому не все вещество доставляется к кристаллу с диффузией. В результате диффундирующее вещество замещает растворитель частично или полностью в зависимости от того, образуется ли безводное вещество или кристаллогидрат.

В растворах без примесей процесс образования твердой фазы реализуется диффузионной массопередачей и поверхностно-химической реакцией. В промышленных процессах диффузия в объеме кристаллизатора протекает медленнее, затрудняется перемещение молекул по поверхности, увеличивается разность концентраций сахарозы в местах вхождения в кристаллическую решетку. Таким образом, время протекания суммарной реакции определяется временами реализации объемной диффузии, диффузии вдоль поверхности и вхождения в решетку [10]. Если пересыщение раствора небольшое, то определяющей стадией служит взаимодействие частиц с поверхностью кристалла, и скорость кристаллизации при этом невелика. С ростом пересыщения роль диффузии значительно возрастает, и скорость кристаллизации определяется этой стадией.

На основе диффузионной теории с использованием многочисленного экспериментального материала (328 опытов) авторами [5, 50] была создана аддитивная кинетическая модель скорости роста кристаллов сахарозы в чистых и нечистых растворах:

$$K_{KP} = \frac{dm}{d\tau \cdot F} = k_D (C_{II} - C_H) + k_P (C_{II} - C_H)^2, \quad (20)$$

где K_{KP} – скорость роста кристаллов, $кг / м^2 \cdot с$; C_{II}, C_H – активности пересыщенного и насыщенного растворов, $моль / кг$;

Однако с помощью данной модели не удалось адекватно описать те эксперименты (54 опыта), в которых чистота раствора была менее 62-65 %, а температура более 50–60 °С. В этой связи пришлось моделировать эти опыты отдельно, опять-таки в рамках диффузионной теории. В итоге погрешность модели для основной группы опытов составила $\pm 13,1$ % отн., а для 54 экспериментов $\pm 22,6$ % отн.

Хотя диффузионная теория была подтверждена рядом экспериментальных исследований, она не смогла объяснить всех явлений, наблюдаемых в процессе роста кристаллов. В частности, она оказалась непригодной для объяснения роста, лимитируемого пограничной межфазной реакцией, и роста кристаллов по слоям, законов их огранки и дефектов в строении. Кроме того, изучение изменения концентрации вещества в прилегающем к поверхности кристалла слое показало, что оно не всегда соответствует представлениям диффузионной теории. Так Майерс [30,36] установил, раствор в контакте с гранью растущего кристалла всегда пересыщен, но степень пересыщения разная в различных точках по всей грани. Поэтому и коэффициент диффузионного переноса вещества k_D у одной и той же грани тоже будет различным. Берг точными измерениями определил [30, 36], что максимальная концентрация устанавливается на углах грани, а минимальная - в ее центре. О.М. Аншелес обнаружил [37], что отложение слоев на грани кристалла происходит не непрерывно, а дискретно, порциями.

В.М. Харин экспериментально доказал [26–29], что при температуре равной или более 60 °С рост кристаллов сахара осуществляется в диффузионной области. При температурах меньших 60 гр С кристаллы сахара растут в смешанной области. Поверхностная реакция лимитирует процесс кристаллизации при низких температурах и пересыщениях. Конвективный массообмен более важен в процессах роста и растворения, чем молекулярный.

Большое число исследований позволило установить, что при малых пересыщениях важнейшую роль в кристаллизации играет дислокационный механизм роста, являющийся достаточно характерным и всеобщим.

Значительное влияние на массовую скорость роста кристаллов сахара оказывает их линейный размер [8]. Кристаллы размером меньше 50 мкм начинают расти при коэффициенте пересыщения большем 1,038 [44] и их рост в наибольшей степени контролируется поверхностной кристаллохимической реакцией. Константа скорости этой реакции $k_{кх}$ не является постоянной величиной, она возрастает с увеличением размера кристалла [61]. Более того, величина константы скорости $k_{кх}$ изменяется при переходе от грани к грани на одном и том же кристалле [46].

В [34] Матусевич Л.Н. выдвинул гипотезу, что совместно с молекулярно – диффузионным реализуется рост кристалла слоями, усложненный дополнительно блоковым ростом в области больших пересыщений. Пересыщение раствора является определяющим параметром. С ростом коэффициента пересыщения растет толщина слоев, частота отложения слоя и в целом скорость кристаллизации.

Таким образом, известные исследования эволюции растворов в процессе роста кристаллов позволяют сделать вывод о дискретном, вероятностном механизме их роста. Очевидно, что в условиях смешанной кинетики вывод уравнений скорости роста должен учитывать реальные концентрации на границе раствор–кристалл.

Применительно к производству сахара в качестве строительных частиц кристаллов могут выступать и отдельные молекулы сахарозы, и их ассоциаты, как упорядоченные, так и неупорядоченные, а также ионы и молекулы примеси и воды, откладывающиеся на гранях кристалла в той или иной степени.

Вероятностная модель скорости роста разработана на основе 421 опыта, выполненных интернациональным коллективом ученых по разным методикам [2,3,18,45–49]. Использованные опыты проводились авторами в различной гидродинамической обстановке: кристаллизующаяся система находилась как в состоянии покоя [2], так и в движении [46]. Полученные данные по приросту кристаллов определялись также по разным методикам: обычным взвешиванием на аналитических весах [46], взвешиванием с помощью кварцевой [2] или нейлоновой [18] нити, закрепленной в торсионных весах высокой точности. На рис. 3 показана схема концентрационных потоков при кристаллизации сахарозы. Критерий Архимеда для этого случая равен:

$$Ar = \frac{9,8065 \cdot \rho_{\Pi}^2 \cdot l^3}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_{\Pi} - \rho_H}{\rho_H}, \quad (21)$$

где ρ_n – плотность пересыщенного раствора.

Вероятностное уравнение скорости роста кристаллов сахара состоит из восьми слагаемых и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} K_{кп} = \frac{dm}{d\tau \cdot F} = & K_{1D} + K_{2D} + K_{1кх} + \\ & + K_{2кх} + K_{3кх} + K_{п3} + K_{нсх} + K_B = \\ = & k_{1D} \Delta C_1 \cdot \exp(-\beta_1 \Delta C_1) + \\ & + k_{2D} [C_{\Pi} \cdot \exp(\beta_2 C_{\Pi}) - C_H \cdot \exp(\beta_3 C_H)]^{\alpha_1} + \\ & + k_{1кх} \cdot (C_H / C_{\Pi})^{\exp(6,45)} [\Delta C_2 \exp(-\beta_4 \cdot \Delta C_2)]^2 + \\ & + k_{2кх} [\Delta C_2 \exp(-\beta_5 \Delta C_2)]^2 + \\ & + k_{3кх} [\Delta C_3 \cdot \exp(-\beta_6 \Delta C_3)]^{\alpha_2} + \\ & + k_{п3} C_H \cdot \exp(\beta_7 C_H) \cdot \exp(-C_H) + K_{нсх} + K_B, \quad (22) \end{aligned}$$

где $\Delta C_1 = C_{\Pi} - \beta_8 \cdot C_H$; $\Delta C_2 = \beta_9 \cdot C_{\Pi} - C_H$; $\Delta C_3 = 1,5 \cdot C_{\Pi} - C_H$;

$$\begin{aligned} k_{1D} = & \left(\left(\beta_{10} \cdot \frac{\alpha_H^2}{\mu} + \beta_{11} \cdot \frac{\alpha_H}{\mu} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \beta_{12} \cdot \frac{\alpha_H}{\mu^2} + \beta_{13} \cdot \frac{T}{\mu^{1,788}} \right) / \frac{(\beta_{14} + N)^{2,6}}{Z^{0,6832}} \right)^{\alpha_3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{2D} = & \beta_{15} \cdot \frac{T}{\mu^2} \left(\exp \left(-\beta_{16} \cdot Q \cdot CV \cdot \frac{T}{273,15} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times 9,80665 \cdot \frac{\rho_{\Pi}^2}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_{\Pi} - \rho_H}{\rho_H} \right) \right)^{\alpha_4}; \end{aligned}$$

$k_{1кх} = \beta_{16} \cdot T^{\alpha_5}$; $k_{2кх} = \beta_{17} \cdot Q \cdot R_{\Pi} \exp(-\beta_{18} \cdot R_{\Pi})$, где

$$\begin{aligned} R_{\Pi} = & \exp \left((\beta_{19} + \beta_{20} \cdot Q^3 + \beta_{21} \cdot Q^2 + \beta_{22} \cdot Q) / \right. \\ & \left. / T / (\beta_{23} + N)^{0,23} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{3кх} = & \beta_{24} \sigma^{2,5} \exp \left(\beta_{24} (1 - \beta_{25} \cdot Q)^{-\alpha_6} + \beta_{26} + \right. \\ & \left. + T^{-0,75} (\beta_{27} + \beta_{28} T + \beta_{29} T^2) + \beta_{30} \sigma^{\alpha_7} \right); \end{aligned}$$

$$k_{п3} = \beta_{31} \cdot Q \cdot \left(\frac{\alpha_H}{\mu} \right)^{\alpha_8} \cdot \exp \left(-\beta_{32} \cdot \frac{\alpha_H}{\mu} \right),$$

где $K_{1D}, K_{2D}, K_{1кх}, K_{2кх}, K_{3кх}, K_{п3}$ – слагаемые скорости роста кристалла за счет диффузии, поверхностной кристаллохимической реакции, непосредственного захвата кристаллом молекул сахарозы и за счет распада комплексов

$CX - HCX$; K_{HCX}, K_B – компоненты скорости роста за счет включения соответственно несахаров и воды в кристалл сахара; $\beta_1 - \beta_{32}$, $\alpha_1 - \alpha_8$ – регрессионные коэффициенты модели.

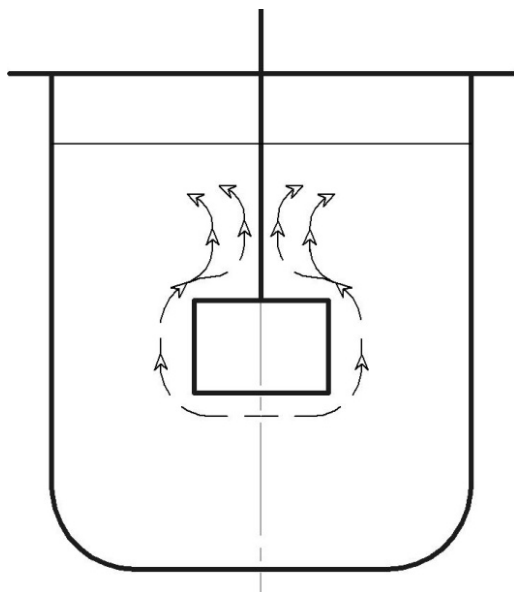


Рис. 3. Схема концентрационных потоков в опытах по определению скорости роста кристаллов сахарозы

В работе [50] показано, что включение примесей в кристалл сахарозы может быть описано случайным законом распределения, аналогичным закону Пуассона. В этой связи при моделировании на ЭВМ получили следующее выражение для расчета K_{HCX} :

$$K_{HCX} = 0,155759 \cdot 10^{-11} \cdot N \cdot \exp(N) \times (0,3760726 \cdot N \cdot \exp(N))^{13} \times \exp(-0,3760726 \cdot N \cdot \exp(N)) \cdot (\mu / T)^{0,0275} \quad (23)$$

Скорость включения воды в кристалл сахара описывается формулой:

$$K_B = \frac{0,1757875 \cdot 10^{-15}}{Q} \times (1 - CV + 0,27007 \cdot (1 - CV) \cdot (1 - Q))^{5,31} \times \left(\frac{T}{\mu}\right)^{1,85} \quad (24)$$

Полученные выражения (23), (24) позволяют количественно определить массу несахаров и воды, перешедших из межкристалльного раствора в кристалл при выкристаллизовывании сахарозы.

Активности пересыщенного и насыщенного растворов C_{II}, C_H определяли по уравнениям:

$$C_{II} = Z \cdot \exp\left\{2,302585093 \left[1,7579227 \cdot 10^{-2} \cdot Z - \frac{1,11072945}{Z} - 11636,271056 \cdot \frac{Z}{T^2} + 9,0256314 \cdot \frac{Z}{T(Z - 0,988264N)} - 314,578003 \left[\frac{Z}{T(Z - 1,050913 \cdot N)}\right]^2\right]\right\} \times \exp\left(-0,048570741(N + 10^{-10})^{2,6} - \frac{2,15 \cdot 10^{-13}}{2,15 \cdot 10^{-13} + N}\right); \quad (25)$$

$$C_H = Z_k \alpha_H \exp\left\{2,302585093 \cdot [0,019060338 \cdot Z_k \alpha_H - \frac{1,00155707}{Z_k \cdot \alpha_H} - 13780,286599 \cdot Z_k \cdot \alpha_H / T^2 + 11,478503 \frac{Z_k \alpha_H}{T(Z_k \alpha_H - 0,9950651N)} - 187,19805469 \left[\frac{Z_k \alpha_H}{T(Z_k \alpha_H - 0,9928844N)}\right]^2]\right\} \times \exp\left(-0,048570741(N + 10^{-10})^{2,6} - \frac{2,15 \cdot 10^{-13}}{2,15 \cdot 10^{-13} + N}\right) \quad (26)$$

Коэффициент насыщения рассчитывали по формуле:

$$\alpha_H = 1 - 0,91707507 \cdot 10^{-2} \cdot N \cdot t + 0,25202195 \cdot N \cdot \lg(t) - 0,27479248 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot t^2 - 0,1439764 \cdot 10^{-2} \cdot N^2 \cdot t + 0,037636 \cdot N^2 \cdot \lg(t) - 0,40277019 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 \cdot t^2 - 0,43804156(N \cdot t)^{1,008611} / Z_k^{4,022132} \quad (27)$$

Созданная математическая модель охватывает весь диапазон изменений температур, содержания сухих веществ и чистоты, который имеет место в промышленном производстве как свекловичного, так и тростникового сахара. Средняя относительная погрешность модели (22)-(27) составляет $\pm 11,3\%$.

На рис. 4 показана трехмерная графическая интерпретация зависимости скорости кристаллизации от концентрации сухих веществ и чи-

стоты раствора при температуре 70 °С. С увеличением температуры среды скорость кристаллизации быстро увеличивается. Зависимость скорости кристаллизации от чистоты раствора и содержания сухих веществ имеет сложный нелинейный характер. Общая тенденция такова: с понижением чистоты раствора скорость уменьшается, а с увеличением содержания сухих веществ – увеличивается до определенного предела, затем уменьшается, т.е. носит экстремальный характер.

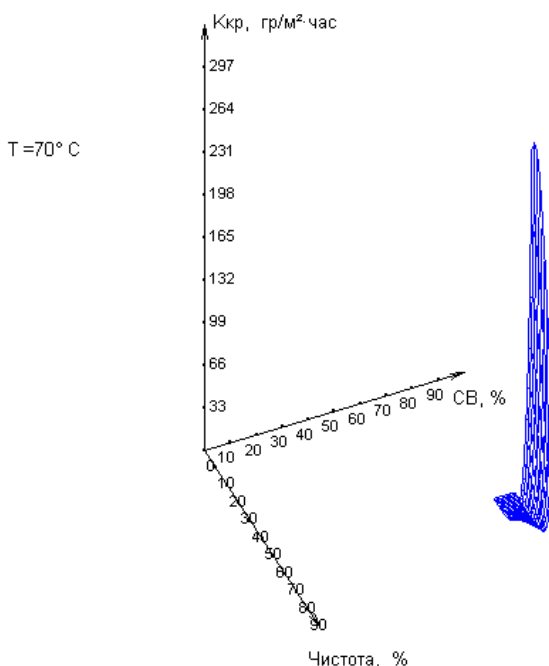


Рис. 4. Поверхность скорости кристаллизации от концентрации СВ и чистоты раствора при температуре 70 °С

Для построения математических моделей скорости растворимости и роста кристаллов сахара разработана интерактивная система (ИС) идентификации и оптимизации. В нее входят методы и алгоритмы: Гаусса (решает линейные уравнения и их системы), генетический алгоритм и модифицированный метод Хука-Дживса (решает задачи нелинейного программирования), алгоритм, реализующий сеть радиально-базисных функций (RBF), служит для определения модели типа «черный ящик», метод последовательных приближений – для решения неявных и трансцендентных уравнений, а также развитый интерфейс для пользователя системой. Система разработана в среде MS Visual Studio 2017 на языке C#. В методе Хука-Дживса реализован автоматический расчет направления поиска. В генетическом алгоритме в популяции случайным образом генерируются приращенные искомым коэффициентам модели.

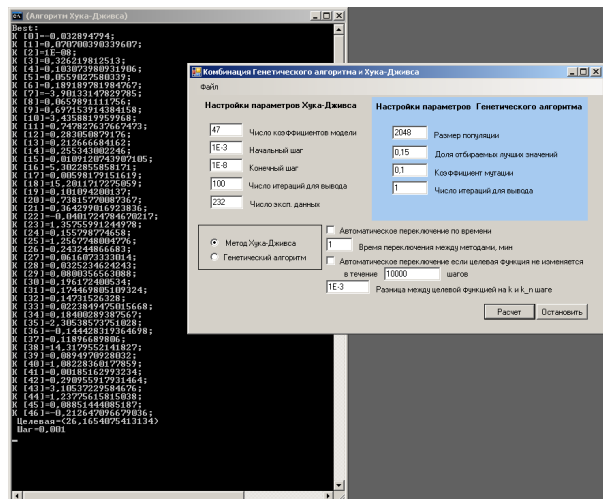


Рис. 5. Интерфейс интерактивной системы

На рис. 5 приведен элемент интерфейса интерактивной системы, реализующий ручное либо автоматическое переключение между генетическим алгоритмом и алгоритмом Хука-Дживса. Автоматическое переключение реализуется по заданию либо времени работы соответствующего алгоритма в минутах, либо разности δ между значениями целевой функции на k -м и $k+n$ шаге, где значения n и δ задаются в окне программы.

Выводы

1. На основе многочисленных экспериментальных данных получены нелинейные модели скорости растворимости и кристаллизации сахара в водных растворах, включающие вероятностные слагаемые. Модели могут быть использованы для исследования и оптимизации процесса массовой кристаллизации сахара-песка.
2. Разработана интерактивная система для идентификации и оптимизации, реализующая наиболее эффективные вычислительные методы для построения моделей и выбора оптимальных решений в системах управления.

Литература

1. Гнездилова А.И., Перельгин В.М. Физико-химические основы мелассообразования и кристаллизации лактозы и сахарозы в водных растворах. Воронеж: Издат. ВГУ, 2002. 96 с.
2. Герасименко А.А. Кристаллизация сахара. Киев: Наукова Думка, 1965. 361 с.
3. Принципы технологии сахара / Под ред. П. Хонига. М.: Пищепромиздат, 1961. 616 с.
4. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. Л.: Химия, 1972. 200 с.
5. Петров С.М., Курицын В.А., Арапов Д.В. Кинетическая модель скорости роста кристаллов сахарозы из чистых и нечистых растворов // Сахар. 2004. №6. С. 26-29.

6. Sugar Analysis. Official and tentative methods recommended by ICUMSA / Edited by Ferdinand Scheider, ICUMSA. Peterborough, England, 1979. 265 p.
7. Люсый Н.А., Люсый Н.Н., Молотилин Ю.И. Кристаллизация сахарозы. Краснодар: Просвещение Юг, 2004. 304 с.
8. Тужилкин В.И. Кристаллизация сахара. М.: Издат. комплекс МГУПП, 2007. 336 с.
9. Сорокин А.И. Научные основы синтеза оптимальных схем и режимов процесса многоступенчатой кристаллизации сахара: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МТИПП. 1989. 50 с.
10. Ekelhof B. Gesamtmodell der Kristallisationskinetik der Saccharose in reinen und unreinen Losungen: Disser. Dr. Ing. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1997.
11. Gros H., Kilpio T., Nurmi Ju. Continuous cooling crystallization from solution // Powder Technology, 121, 2001. P. 106-115.
12. Семенов Е.В., Славянский А.А., Ильина В.В. Моделирование роста кристаллов сахарозы из её растворов // Сахар. 2004. №4. С. 37-41.
13. Петров С.М., Арапов Д.В., Курицын В.А. Расчет коэффициента насыщения нечистых сахарных растворов // Сахар. 2005. №1. С.42-45.
14. Петров С.М., Арапов Д.В., Курицын В.А. Уравнения для расчета на ЭВМ физико-химических свойств водных растворов сахарозы // Сахар. 2014. № 4. С. 44-53.
15. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии. М.: Мир, 1988. 416 с.
16. Трейвус Е.Б. Кинетика роста и растворения кристаллов. Л.: Изд. ЛГУ, 1979. 248 с.
17. Brighel-Muller A. Ubersattigung und Kristallisationsgeschwindigkeit. Supersaturation and Velocity of Crystallization // Zucker. 1962. №12. S. 596-600.
18. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. М.: Химия, 1981. 812 с.
19. Петров С.М., Курицын В.А., Арапов Д.В. Модель вязкости водных сахарных растворов // Сахар. 2004. № 2. С. 31-33.
20. Синат-Радченко Д.Е., Василенко С.М., Штангеев К.О. Расчетные зависимости теплофизических свойств сахарных растворов // Сахар. 2004. № 1. С. 43.
21. Schliephake D. Die Diffusion der Saccharose in wasseriger Lösungen // Zucker. 1965. № 18. P. 138 -142.
22. Бобровник Л.Д. Физико-химические основы очистки в сахарном производстве. Киев: Высш. шк., 1994. 225 с.
23. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства. М.: Колос, 1998. 495 с.
24. Maria Ittu Zugrav. Mecanismul cresteri cristalelor din solutie // Studii si Cercetari de Fizica. 1980. Bd. 32. № 1. P. 77-93.
25. Харин В.М., Жарков А.Л. Исследование роста и растворения кристаллов сахарозы // Изв. вузов. Пищевая технология. 1974. № 4. С. 121-123.
26. Харин В.М., Жарков А.Л. О роли конвективного массообмена в процессах роста и растворения кристаллов сахарозы // Изв. вузов. Пищевая технология. 1975. № 4. С. 133-136.
27. Харин В.М., Жарков А.И., Тонких В.А. О влиянии стесненности движения кристаллов на межфазный массообмен в процессах массовой кристаллизации // ТОХТ. 1977. Т. XI. № 1. С. 22-27.
28. Харин В.М. Исследование кинетики массовой кристаллизации из растворов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев: КТИПП, 1980. 48 с.
29. Хамский Е.В. Кристаллизация в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 343 с.
30. Чернов А.А. Слоисто-спиральный рост // Успехи химии. 1961. Т. LXXIII. Вып. 2. С. 308-317.
31. Mantovani G. Growth and morphology of the sucrose crystal // International Sugar Journal. 1991. Vol. 93. № 1106. P. 23-27.
32. Дмитриенко А.У., Бренман С.А. Условия включения несахаров в растущие кристаллы сахара // Сахарная промышленность. 1992. № 5. С. 13-15.
33. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М.: Химия, 1968. 304 с.
34. Козлова О.Г. Рост кристаллов. М.: МГУ, 1967. 238 с.
35. Mullin J.W. Crystallization. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 610 s.
36. Кузнецов В.Д. Кристаллы и кристаллизация. М.: Государственное изд-во техн.-теорет. лит., 1953. 412 с.
37. Веригин А.М., Щупляк И.А., Михайлов В.Ф. Кристаллизация в дисперсных системах. Л.: Химия, 1986. 324 с.
38. Schliephake D., Petersen H., Schneider F. Einfluß der Strömungsverhältnisse auf die Kristallisationsgeschwindigkeit der Saccharose // Zuckerindustrie. 1974. B. 27. № 3. S. 113-121.
39. Schneider F., Schliephake D. Die Kristallisationsgeschwindigkeit der Saccharose und ihre Beeinflussungsfaktoren // Zuckerindustrie. 1971. B. 24. № 7. S. 181-184.
40. Schneider F., Schliephake D., Witte J. Untersuchungen über den Ablauf des Kochprozesses und seine Verbesserungen // Zuckerindustrie. 1973. B. 26. № 1. S. 12-20.
41. Кот Ю.Д. Теория кристаллизации сахарозы // Сахарная промышленность. 1987. № 12. С. 15-17.
42. Арапов Д.В., Курицын В.А. Оптимизация температурного режима вертикального кристаллизатора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. №12 (93). С. 31-36.
43. Heffels S.K., Jong E.J., Sinke D.J. Growth rate of small sucrose crystals at 70 °C // Zuckerindustrie. 1987. Vol. 112. № 6. P. 511-518.
44. Vavrinecz G. Berechnungen über die zweckmäßigste Kühlung von Nachproduktfullmassen // Zeitschrift für die Zuckerindustrie. 1967. N 7. S. 357-360; N 9. S. 470-473.
45. Кухаренко И.А. Кристаллизация сахарозы. Киев: Сельхознабиздат, 1923. 23 с.
46. Жвирблянский Ю.М. Кристаллизация сахара. М.: Пищепромиздат, 1958. 112 с.
47. Силин П.М. Технология сахара. М.: Пищевая промышленность, 1967. 624 с.
48. Van Hook A. Kinetics of sucrose crystallization: mechanism of the reaction in real // American Society of Sugar Beet Technologists. 1946. P.558-564.
49. Петров С.М., Арапов Д.В., Курицын В.А. Вероятностная модель включения несахаров в растущие кристаллы сахара // Сахар. 2011. № 8. С. 34-38.

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 22.03.2019

Информация об авторах

Арапов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: arapovdv@gmail.com, тел. 8-908-143-65-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8726-5279>

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394026 г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. 8-910-349-71-70, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Тихомиров Сергей Германович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: tikhomirov_57@mail.ru, тел. 8-980-555-55-54

MODELING OF THE DISSOLUTION AND GROWTH OF SUGAR CRYSTALS

D.V. Arapov¹, S.L. Podvalny², S.G. Tikhomirov¹

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: nonlinear probabilistic mathematical models of the rate of dissolution and growth of sucrose crystals in multi-component solutions are described. The experimental basis of the developed models was: for the dissolution rate — 255 experiments of A. Brigel-Muller, for the growth rate — 421 experiences of the scientists A. Brigel-Muller, G. Vavrinet and others. The error model of the solubility rate was $\pm 9.6\%$ rel., and the models of crystal growth rate $\pm 11.3\%$ rel. at the magnitude of the iteration step $0.1 \cdot 10^{-6}$. The additive model of the dissolution rate consists of four components: diffusional, due to chemical reactions with water and non-sugars, with the formation of hydrated sugar molecules and sugar - non-sugar complexes, and formed as a result of pulling active sucrose molecules from the crystal. The model of the growth rate of a sugar crystal includes the following components: diffusion, surface crystal chemical, direct capture of sucrose molecules by a crystal, disintegration of sugar-nonsugar complexes, incorporation of non-sugars and water into the crystal. To build the models, a genetic algorithm was used, followed by specification of model parameters using the Hook-Jeeves configuration method

Key words: mathematical model, dissolution and growth rates, sugar crystal, genetic algorithm, Hook-Jeeves configuration method

References

1. Gnezdilova A.I., Perelygin V.M. "Physical and chemical bases of molasses formation and crystallization of lactose and sucrose in aqueous solutions" ("Fiziko-khimicheskie osnovy melassoobrazovaniya i kristallizatsii laktozy i sakharozy v vodnykh rastvorakh"), Voronezh, VSU Publ., 2002, 96 p.
2. Gerasimenko A.A. "Sugar crystallization" ("Kristallizatsiya sakhara"), Kiev, Naukova Dumka, 1965, 361 p.
3. Ed. Honig P. "Principles of sugar technology" ("Printsipy tekhnologii sakhara"), Moscow, Pishchepromizdat, 1961, 616 p.
4. Ed. Mishchenko K.P., Ravdel A.A. "A brief handbook of physical and chemical quantities" ("Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin"), Leningrad, Khimiya, 1972, 200 p.
5. Petrov S.M., Kuritsyn V.A., Arapov D.V. "Kinetic model of the growth rate of sucrose crystals from pure and impure solutions", *Sugar (Sakhar)*, 2004, no. 6, pp. 26-29.
6. Ed. Scheider F. "Sugar Analysis. Official and tentative methods recommended by ICUMSA", ICUMSA, Peterborough, England, 1979, 265 p.
7. Lyusy N.A., Lyusy N.N., Molotilin Yu.I. "Crystallization of sucrose" ("Kristallizatsiya sakharozy"), Krasnodar, Prosveshchenie Yug, 2004, 304 p.
8. Tuzhilkin V.I. "Sugar crystallization" ("Kristallizatsiya sakhara"), Moscow, Publ. complex of MGUPP, 2007, 336 p.
9. Sorokin A.I. "Scientific basis for the synthesis of optimal schemes and modes of the process of multi-stage crystallization of sugar: Dr. tech. sci. diss." ("Nauchnye osnovy sinteza optimal'nykh skhem i rezhimov protsessa mnogostupenchatoy kristallizatsii sakhara: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk"), Moscow, MTIPP, 1989, 50 p.
10. Ekelhof B. "Gesamtmodell der Kristallisationskinetik der Saccharose in reinen und unreinen Losungen: Diss. Dr. – Ing.", Berlin, Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1997.
11. Gros H., Kilpio T, Nurmi Ju. "Continuous cooling crystallization from solution", *Powder Technology*, 2001, vol. 121, pp. 106-115.
12. Semenov E.V., Slavyanskiy A.A., Il'ina V.V. "Simulation of the growth of sucrose crystals from its solutions", *Sugar (Sakhar)*, 2004, no. 4, pp. 37-41.
13. Petrov S.M., Arapov D.V., Kuritsyn V.A. "Calculation of the saturation coefficient of unclean sugar solutions", *Sugar (Sakhar)*, 2005, no. 1, pp.42-45.
14. Petrov S.M., Arapov D.V., Kuritsyn V.A. "Equations for calculating the physicochemical properties of sucrose aqueous solutions on a computer", *Sugar (Sakhar)*, 2014, no.4, pp.44-53.
15. Ebert K., Ederer H. "Computers. Application in chemistry" ("Komp'yutery. Primenenie v khimii"), trans. from German, Moscow, Mir, 1988, 416 p.
16. Treivus E.B. "Kinetics of growth and dissolution of crystals" ("Kinetika rosta i rastvoreniya kristallov"), Leningrad, Publ. LSU, 1979, 248 p.
17. Brighel-Muller A. "Ubersattigung und Kristallisationsgeschwindigkeit. Supersaturation and Velocity of Crystallization", *Zucker*, 1962, no. 12, pp. 596-600.
18. Gel'perin N.I. "Basic processes and apparatuses of chemical technology" ("Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii"), Moscow, Khimiya, 1981, 812 p.
19. Petrov S.M., Kuritsyn V.A., Arapov D.V. "Viscosity model of aqueous sugar solutions" ("Model' vyazkosti vodnykh sakharonykh rastvorov"), *Sugar (Sakhar)*, 2004, no. 2, pp. 31-33.
20. Sinat-Radchenko D.E., Vasilenko S.M., Stangeev K.O. "Calculated dependencies of thermophysical properties of sugar solutions", *Sugar (Sakhar)*, 2004, no. 1, pp. 43.

21. Schliephake D. "Die Diffusion der Saccharose in wässriger Lösung", *Zucker*, 1965, no. 18, pp. 138-142.
22. Bobrovnik L.D. "Physical and chemical bases of cleaning in sugar production" ("Fiziko-khimicheskie osnovy ochistki v sakharnom proizvodstve"), Kiev, Vysshaya shkola, 1994, 225 p.
23. Saponov A.R. "Technology of sugar production" ("Tekhnologiya sakharnogo proizvodstva"), Moscow, Kolos, 1998, 495 p.
24. Maria Iltu Zugrav "Mecanismul crester cristalelor din solutie", *Studii si Cercetari de Fizica*, 1980 vol. 32, no. 1, pp. 77-93.
25. Kharin V.M., Zharkov A.L. "Study of the growth and dissolution of sucrose crystals", *Food Technology (Pishchevaya tekhnologiya)*, 1974, no. 4, pp. 121-123.
26. Kharin V.M., Zharkov A.L. "On the role of convective mass transfer in the processes of growth and dissolution of sucrose crystals", *Food Technology (Pishchevaya tekhnologiya)*, 1975, no. 4, pp. 133-136.
27. Kharin V.M., Zharkov A.I., Tonkikh V.A. "On the effect of constraint on the movement of crystals on the interfacial mass exchange in mass crystallization processes", *Theoretical Foundations of Chemical Technology (TOKHT)*, 1977, vol. 11, no. 1, pp. 22-27.
28. Kharin V.M. "Investigation of the mass crystallization kinetics from solutions: Dr. techn. sci. diss." ("Issledovanie kinetiki massovoy kristallizatsii iz rastvorov: Avto-ref. dis. ... d-ra tekhn. nauk."), Kiev, KTIPP, 1980, 48 p.
29. Khamsky E.V. "Crystallization in the chemical industry" ("Kristallizatsiya v khimicheskoy promyshlennosti"), Moscow, Khimiya, 1979, 343 p.
30. Chernov A.A. "Bedded-spiral growth" ("Sloisto-spiral'ny rost"), *Successes of Chemistry (Uspekhi khimii)*, 1961, vol. 73, no. 2, pp. 308-317.
31. Mantovani. G. "Growth and morphology of the sucrose crystal", *International Sugar Journal*, 1991, vol. 93, no. 1106, pp. 23-27.
32. Dmitrienko A.U., Brenman S.A. "Conditions for the inclusion of non-sugars in growing sugar crystals", *Sugar Industry (Sakharnaya promyshlennost')*, 1992, no. 5, pp. 13-15.
33. Matusovich L.N. "Crystallization from solutions in the chemical industry" ("Kristallizatsiya iz rastvorov v khimicheskoy promyshlennosti"), Moscow, Khimiya, 1968, 304 p.
34. Kozlova O.G. "Crystal growth" ("Rost kristallov"), Moscow, Moscow State University, 1967, 238 p.
35. Mullin J. W. "Crystallization", Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001, 610 p.
36. Kuznetsov V.D. "Crystals and crystallization" ("Kristally i kristallizatsiya"), Moscow, State publishing house of tech. and theor. lit., 1953, 412 p.
37. Verigin A.M., Shchuplyak I.A., Mikhailov V.F. "Crystallization in disperse systems" ("Kristallizatsiya v dispersnykh sistemakh"), Leningrad, Khimiya, 1986, 324 p.
38. Schliephake D., Petersen H., Schneider F. "Einfluss der Strömungsverhältnisse auf die Kristallizationgeschwindigkeit der Saccharose", *Zuckerindustrie*, 1974, vol. 27, no. 3, pp. 113-121.
39. Schneider F., Schliephake D. "Die Kristallizationgeschwindigkeit der Saccharose und ihre Beeinflussungsfaktoren", *Zuckerindustrie*, 1971, vol. 24, no. 7, pp. 181-184.
40. Schneider F., Schliephake D., Witte J. "Untersuchungen über den Ablauf des Kochprozesses und seine Verbesserungen", *Zuckerindustrie*, 1973, vol. 26, no. 1, pp. 12-20.
41. Kot Yu.D. "Theory of crystallization of sucrose", *Sugar Industry (Sakharnaya promyshlennost')*, 1987, no. 12, pp. 15-17.
42. Arapov D.V., Kuritsyn V.A. "Optimization of the temperature mode of the vertical crystallizer", *Mechatronics, Automation, Control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2008, no. 12 (93), pp. 31-36.
43. Heffels S.K., Jong E.J., Sinke D.J. "Growth rate of small sucrose crystals at 70 °C", *Zuckerindustrie*, 1987, vol. 112, no. 6, pp. 511-518.
44. Vavrincz G. "Berechnungen über die zweckmäßigste Kühlung von Nachproduktfullmassen", *Zeitschrift für die Zuckerindustrie*, 1967, no. 7, pp. 357-360; no. 9, pp. 470-473.
45. Kukharensko I.A. "Crystallization of sucrose" ("Kristallizatsiya sakharozy"), Kiev, Sel'khozsnabizdat, 1923, 23 p.
46. Zhvirblyansky Yu.M. "Crystallization of sugar" ("Kristallizatsiya sakhara"), Moscow, Pishchepromizdat, 1958, 112 p.
47. Silin P.M. "Sugar technology" ("Tekhnologiya sakhara"), Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1967, 624 p.
48. Van Hook A. "Kinetics of sucrose crystallization: mechanism of the reaction in real", *American Society of Sugar Beet Technologists*, 1946, pp.558-564.
49. Petrov S.M., Arapov D.V., Kuritsyn V.A. "Probabilistic model of inclusion of non-sugars in growing sugar crystals", *Sugar (Sakhar)*, 2011, no. 8, pp. 34-38.

Submitted 28.02.2019; revised 22.03.2019

Information about the authors

Denis V. Arapov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 prospekt Revolyutsii, Voronezh, 394036, Russia), e-mail: arapovdv@gmail.com, tel. 8-908-143-65-13

Semen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), spodvalny@yandex.ru, tel. 8-910-349-71-70

Sergey G. Tikhomirov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 prospekt Revolyutsii, Voronezh 394036, Russia), e-mail: tikhomirov_57@mail.ru, tel. 8-980-555-55-54

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

А.Е. Кишалов, А.А. Зиннатуллин

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Аннотация: децентрализованная выработка энергии в настоящее время приобретает большую актуальность ввиду ряда таких существенных недостатков централизованного энергообеспечения, как потери в окружающую среду при транспортировании, необходимость трансформации энергии и возможность обесточивания большого числа потребителей при крупной аварии. Одним из методов децентрализованного производства энергии является применение энергоустановок малой мощности, основанных на органическом цикле Ренкина. В них рабочее тело, нагреваясь и превращаясь в пар в котле, попадает в турбину и совершает полезную работу. Затем оно попадает в конденсатор, конденсируется и с помощью насоса подается обратно в котёл. Турбина вращает электрогенератор, за счет чего и вырабатывается электроэнергия. Рассмотрен один из вариантов отвода тепла рабочего тела к холодному источнику – грунту – при помощи горизонтального трубопровода круглого сечения. Моделирование стационарного процесса теплообмена рабочего тела с грунтом с учётом его конденсации произведено с помощью двух подходов: в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS CFX (гомогенная модель течения) и методом конечных разностей (модель кольцевого раздельного течения). Определено распределение массового паросодержания (степени сухости пара) и температуры теплоносителя по длине трубопровода для двух подходов к описанию двухфазных течений. Приведен анализ результатов, полученных в ходе решения задачи средствами конечно-элементного анализа и инженерного расчёта методом конечных разностей

Ключевые слова: децентрализованная выработка энергии, теплоотдача, конденсация, гомогенная модель течения, кольцевой режим течения, математическое моделирование теплофизических процессов, ANSYS CFX

Введение

Децентрализованной выработкой энергии принято называть генерацию электрической и тепловой энергии независимо от централизованных источников. Она имеет ряд ключевых преимуществ в сравнении с централизованным энергообеспечением. Непосредственная близость мест выработки к потребителям практически сводит на нет потери энергии в окружающую среду при транспортировании и трансформации. Благодаря своей автономности, установки децентрализованной выработки могут обеспечивать энергией географически отдаленные районы (включая области Крайнего Севера). Децентрализация позволяет смягчить последствия аварий на центральных электростанциях для объектов социального назначения посредством снабжения их резервной энергией.

В данном исследовании рассматривается конструкция конденсатора системы децентрализованной выработки энергии, представляющего собой горизонтально расположенный трубопровод, помещенный в грунт [1]. Подобная конструкция обеспечивает охлаждение рабочего тела (РТ) на температурном уровне окружающей среды за счёт хладоресурса грунта. В настоящей статье исследуются подходы для расчёта стационарного теплообмена РТ с грун-

том через цилиндрическую стенку с учетом его конденсации. Также проведён сравнительный анализ подходов к описанию двухкомпонентных течений с фазовыми превращениями.

Расчётная модель конденсатора (рис. 1) представляет собой горизонтально расположенную трубу длиной $l = 70$ м, помещенную в грунт на глубину $h = 1,6$ м, с наружным диаметром $D = 219$ мм и толщиной $\delta = 32$ мм. Материал конструкции – нержавеющая сталь 08X17T, с постоянной теплопроводностью $\lambda_{\text{труб}} = 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ [2].

Трубопровод окружен грунтом, теплопроводность которого равна $\lambda_{\text{грунт}} = 1,03 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, что соответствует пылевато-глинистому грунту малой влажности (ил, песок, глина) [3].

Рабочим телом является толуол, зависимости теплофизических свойств (ТФС) его жидкой и парообразной фаз определены аппроксимацией данных из программы REFPROP [4] и источников [5, 6]. Температура РТ на входе в трубопровод составляет $T_{\text{вх}} = 554,73$ К, расход – $m = 0,0328$ кг/с.

Для упрощения моделирования приняты следующие допущения.

Теплообмен происходит при изобарных условиях без потерь напора из-за трения. Значит, ТФС РТ зависят только от температуры. Влияние сил гравитации не учитывается.

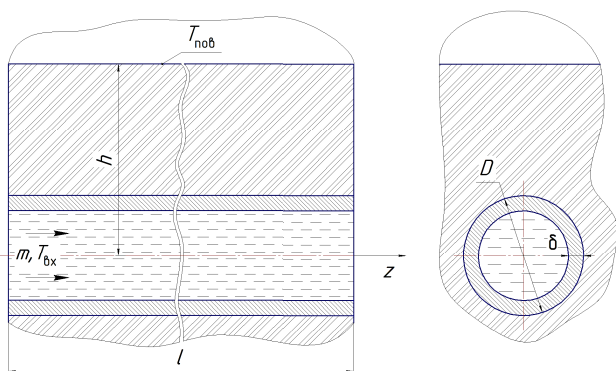


Рис. 1. Расчетная область

В работе было проведено два расчёта: расчёт № 1 – инженерная методика, тепловой расчёт конденсатора посредством модели кольцевого течения с применением метода конечных разностей; расчёт № 2 произведен в программном продукте трехмерного численного гидрогазодинамического моделирования ANSYS CFX с применением гомогенной модели течения. Вдобавок произведено сравнение полученных результатов с результатами инженерного расчёта с помощью модели гомогенного течения [1].

Расчёт № 1. Расчёт по инженерной методике с помощью модели кольцевого течения

В отличие от гомогенного течения, в котором поток пара и конденсата рассматривается как «псевдоконтинуум» (сплошная неразрывная среда), в кольцевой модели течения фазы движутся раздельно (рис. 2). Кольцевое течение, наряду с гомогенной моделью, можно охарактеризовать как идеализацию, так как в данной модели не происходит стекания пленки конденсата с образованием «ручья» в нижней части трубопровода. Однако кольцевая модель течения является более приближенной к реальной картине течения пленки конденсата в трубопроводе.

В инженерной методике принят ряд предположений, позволяющих упростить расчёт. Во-первых, тепловой расчёт производится в одномерной постановке, то есть изменение параметров РТ происходит только вдоль оси трубопровода. Во-вторых, имеет место только термодинамическое взаимодействие фаз: трение между фазами отсутствует, динамического срыва пленки конденсата потоком пара не происходит. В-третьих, рассматривается равновесная конденсация: температура поверхности раздела фаз равна температуре насыщения $T_s = 383,75$ К, следовательно, профиль температуры в чистой паровой фазе плоский, стало

быть, в ней отсутствует термическое сопротивление [7]. В-четвертых, вследствие малости и незначительности изменения, в уравнении энергии не учитываются составляющие энтальпии конденсата, а также кинетической энергии конденсата и пара.

Температура поверхности грунта принята постоянной $T_{пов} = 286,8$ К, что соответствует осредненной температуре грунта в г. Уфа для августа [8].

Расчёт проводится в 2 этапа.

Этап 1: расчёт охлаждения перегретого пара, поступающего из турбины энергоустановки до расчётного сечения, где температура пара достигает точки насыщения T_s . На данном этапе начало конденсации происходит, когда температура внутренней стенки трубы становится ниже температуры насыщения: $T_{ст} < T_s$. Определение изменения степени сухости пара x производится соотношениями для гомогенного потока.

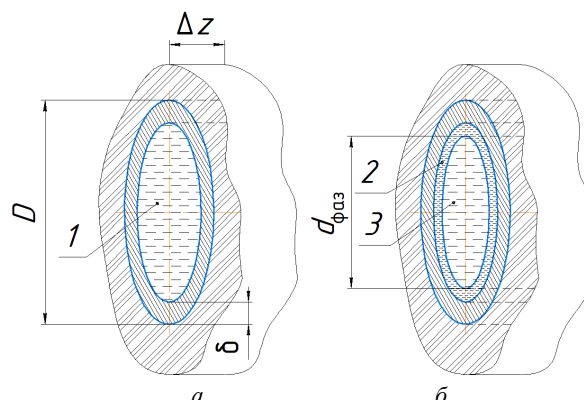


Рис. 2. Сравнение подходов к расчёту двухфазных течений: а – гомогенная модель течения, б – модель раздельного кольцевого течения
1 – парожидкостная смесь, 2 – жидкая фаза, 3 – паробразная фаза

Степень сухости пара в данном расчётном сечении с индексом $n + 1$ определяется следующей системой, полученной линейризацией дифференциалов переходом к конечным разностям:

$$\begin{aligned}
 & x^{(n+1)} = \\
 & \begin{cases} 1, T_{ст}^{(n)} > T_s \\ x^{(n)} - \frac{k^{(n)} \Delta z}{m(\Delta i_{п}^{(n)} + r^{(n)})} (T_s - T_{пов}), T_{ст}^{(n)} \leq T_s \end{cases}; \\
 & 0 \leq x^{(n+1)} \leq 1; \\
 & T_{ст}^{(n)} = T^{(n)} - \frac{k^{(n)}(T^{(n)} - T_{пов})}{\pi d \bar{\alpha}_{см}^{(n)}}; \\
 & T^{(n+1)} = T^{(n)} \left(1 - \frac{k^{(n)} \Delta z}{m c_{p,см}^{(n)}} \right) + T_{пов} \frac{k^{(n)} \Delta z}{m c_{p,см}^{(n)}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $k^{(n)}$ – суммарный линейный коэффициент теплоотдачи от РТ в окружающую среду через цилиндрическую стенку и полубесконечный массив (грунт), Δz – шаг интегрирования по оси трубопровода, $\Delta i''^{(n)} = i''^{(n)} - i_s''$ – энтальпия перегрева пара, $r^{(n)}$ – теплота парообразования, $T^{(n)}$ – температура пара, $\bar{\alpha}_{см}^{(n)}$ – средний на выбранном дискретном малом участке Δz коэффициент теплоотдачи от смеси пара и жидкости, m – суммарный расход теплоносителя, $d = D - 2\delta$ – внутренний диаметр трубы, $c_{p,см}^{(n)}$ – изобарная удельная теплоемкость смеси [1].

Этап 2: расчёт раздельного кольцевого течения пара и конденсата.

Для второго этапа уравнение баланса энергии рассматриваемой системы с учетом предпосылок, описанных ранее, имеет следующий вид:

$$r \frac{dx}{dz} = - \frac{k(T_s - T_{пов})}{m} \quad (2)$$

Суммарный линейный коэффициент теплоотдачи от РТ через цилиндрическую стенку в окружающую среду, грунт определяется следующим выражением [9]:

$$k = \frac{1}{\frac{\ln \left[\frac{2h}{D} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D} \right)^2 - 1} \right]}{2\pi\lambda_{грунт}} + \frac{\ln \left(\frac{D}{d} \right)}{2\pi\lambda_{труб}} + \frac{1}{\pi d \bar{\alpha}'}} \quad (3)$$

где $\bar{\alpha}'$ – средний на выбранном участке Δz коэффициент теплоотдачи от пленки конденсата.

Средний коэффициент теплоотдачи от пленки конденсата определяется в зависимости от числа Нуссельта:

$$\bar{\alpha}' = \frac{\lambda' \bar{Nu}}{d} \quad (4)$$

где \bar{Nu} – среднее на участке длины трубопровода Δz число Нуссельта, λ' – коэффициент теплопроводности жидкой фазы.

Для определения числа Нуссельта использованы корреляции чисел подобия для теплоотдачи при течении теплоносителя в канале круглого сечения с применением гидравлического диаметра $d_r = d - d_{фаз}$ в качестве характерного размера.

$$\bar{Nu} = \begin{cases} 1,4 \left(Re \frac{d}{\Delta z} \right)^{0,4} Pr^{0,33}, & Re < 2300; \\ 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_n, & 2300 \leq Re < 10000; \\ 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}, & Re \geq 10000; \end{cases} \quad (5)$$

где $Re = \frac{\rho' W d_r}{\mu'}$ – число Рейнольдса, $Pr = \frac{\mu' c_p'}{\lambda'}$ – число Прандтля, $\varphi = \frac{1}{1 + \left[\frac{1-x}{x} \right] \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{2/3}}$ – доля сечения, занятая паром [7]; ε_n – поправка на переходный режим, зависящая от числа Рейнольдса [10].

Система уравнений (1–5) с учетом граничных условий является замкнутой для проведения теплового расчёта процесса охлаждения и конденсации пара в горизонтальном трубопроводе.

По результатам расчёта построены зависимости средней температуры и массового паросодержания вдоль оси трубопровода.

Также с целью оценки степени влияния процесса конденсации на участке охлаждения РТ на результат решения, проведен дополнительный расчёт без учёта наличия конденсации на этапе снятия перегрева пара. Другими словами, предполагается, что на начальном участке происходит только охлаждение пара до температуры насыщения без конденсации у стенок трубопровода.

Расчёт № 2. Моделирование в ANSYS CFX

Расчётная область состоит из трёх частей: грунт, трубопровод и зона течения теплоносителя, передача информации между ними осуществляется посредством специальных связей – интерфейсов. В целях минимизации времени расчёта, в моделировании задействована только половина области.

Расчётная область грунта представляет собой параллелепипед шириной 3,5 м и высотой 5 м с вырезом в форме половины цилиндра для трубопровода и области течения (рис. 1). На данной геометрической модели построена не структурированная тетраэдрическая сетка с замельчением по поверхности контакта грунта с трубой [11]. Минимальный размер элемента сетки – 80 мм, максимальный – 150 мм, в замельчении размер элемента – 40 мм. Количество элементов – порядка 3 800 000 (рис. 3а).

Для модели трубопровода, представляющего собой половину полого цилиндра (рис. 1), построена не структурированная тетраэдрическая сетка с замельчением по внутренней поверхности. В данном случае минимальный размер элемента сетки – 8 мм, максимальный – 15 мм. Число элементов – 3 400 000. Результат построения показан на рис. 3б.

Аналогично для области течения РТ построена не структурированная тетраэдрическая

сетка с замельчением по области контакта с внутренней поверхностью трубопровода и структурированными слоями из призматических элементов (слои инфляции). Минимальный размер элемента сетки – 20 мм, максимальный – 60 мм, размер замельчения равен 10 мм, суммарная толщина слоёв инфляции – 54,2 мм, число слоёв – 5, максимальная толщина одного слоя составляет 13 мм. Число элементов – порядка 3 280 000 (рис. 3в).

При моделировании использовался так

называемый подход «Эйлера-Эйлера», сущность которого заключается в том, что отдельные фазы рассматриваются как взаимопроникающие континуумы, и через каждую точку пространства в разные моменты времени проходят частицы двух фаз теплоносителя, имеющие собственные значения термо- и газодинамических величин. Функции, описывающие концентрации фаз в рассматриваемом объеме (массовая, объемная и мольные содержания), являются непрерывными, сумма содержаний фазовых составляющих РТ постоянна во времени и пространстве и равна 1.

Для объема грунта задано начальное условие в виде зависимости температуры от глубины (таблица).

Распределение средних температур по глубине грунта в г. Уфа в августе [8]

$h, \text{ м}$	0	0,8	1,6	2,4
$T_{\text{грунт}}, \text{ К}$	290,75	289,05	285,15	280,75

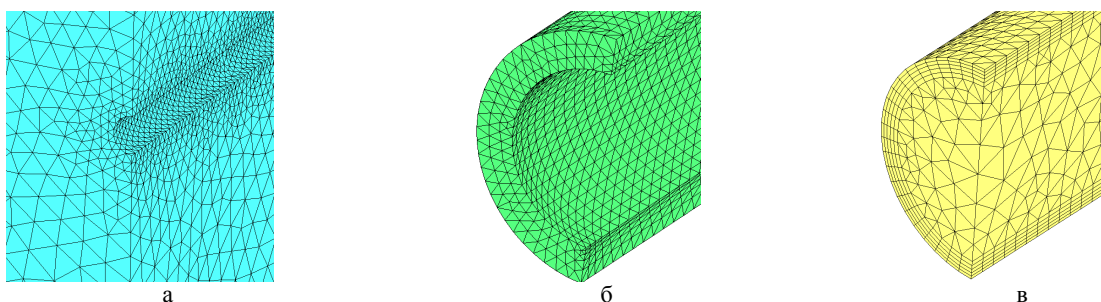


Рис. 3. Конечно-элементные модели: а – грунта, б – трубопровода, в – области течения РТ

Одной из моделей, относящихся к Эйлер-Эйлеровому подходу, является модель смеси (Mixture Model) [12]. Она разработана для двух или более фаз. Система основных уравнений рассматривается не для отдельных фаз, а для их смеси. Эффективные ТФС смеси получают по определенным зависимостям [1]. Частный случай модели смеси – модель гомогенного течения (Homogeneous Mixture Model). В ней предполагается, что фазы движутся с одинаковой скоростью, не проскальзывая друг относительно друга. Поверхности раздела фаз не существуют, капли не моделируются.

Подобная модель была использована для описания конденсации РТ в канале кольцевого сечения [1] инженерной методикой.

В качестве РТ была использована бинарная гомогенная смесь (Binary Homogeneous Mixture), компоненты которой – пар и конденсат толуола – были выбраны из библиотеки материалов ANSYS CFX. Фазовый переход – термический (Thermal Phase Change) – конденсация в зависимости от температуры. Установле-

на модель теплопереноса Thermal Energy, модель турбулентности – $k - \epsilon$.

Распределения массового паросодержания и температуры в моделируемой области, полученные в результате решения задачи в ANSYS CFX, изображены на рис. 4 и 5 соответственно.

Профили степеней сухости в сечениях трубопровода имеют форму концентрических окружностей, а вдоль его оси изменяются по закону, близкому к квадратичной параболе. Значит, изоповерхности степеней сухости пара в пространстве имеют форму, похожую на параболоид вращения.

Из рис. 5а видно, что установленные граничные условия деформируют профиль температур во входной и выходной области моделирования. Профили температур в поперечных контрольных сечениях (рис. 5б) моделируемой области вблизи трубопровода имеют форму концентрических окружностей, далее по мере удаления от оси профиль принимает всё больший нелинейный асимметричный («приплюснутый» вдоль вертикальной оси) характер.

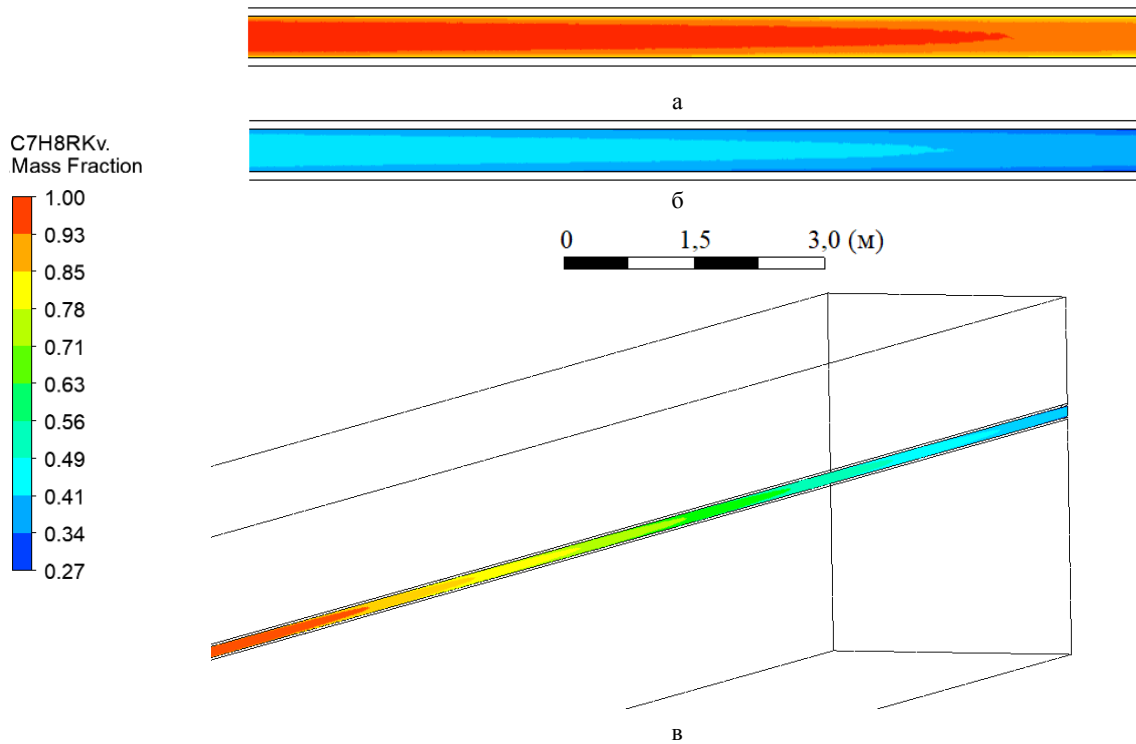


Рис. 4. Изменение степени сухости пара по длине трубопровода:
а – в области начала конденсации, б – в выходной области трубопровода,
в – общая картина

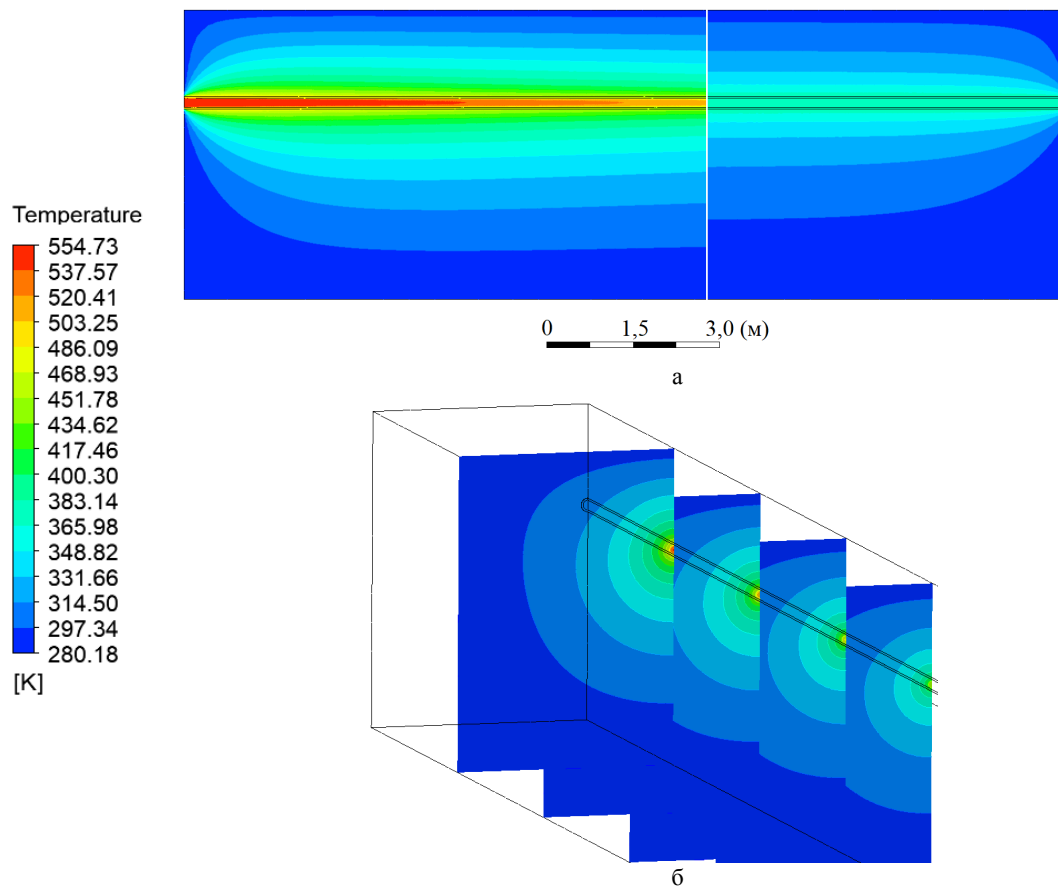


Рис. 5. Поля температур:
а – в области входного и выходного сечений по плоскости симметрии,
б – в контрольных плоскостях вдоль оси трубопровода z (5, 10, 15, 20 м)

Анализ полученных результатов

На рис. 6 приведены распределения средних по сечениям трубопровода температур РТ. Как видно из графиков, имеются некоторые расхождения результатов расчётов. Так, сечение, для которого по всей поверхности устанавливается температура ниже условий насыщения, имеет координату вдоль оси трубопровода: для расчёта №1 – $z = 39,2$ м, для расчёта №2 – $z = 35$ м. Соответственно, отклонение расчёта инженерной методики от расчёта в ANSYS CFX составляет 4,2 м (12,0%).

В свою очередь, среднее расхождение инженерной методики расчёта относительно расчёта в ANSYS CFX по температурам в сходственных точках, составило 11,0 К (2,6%). Средний на участке снятия перегрева температурный градиент dT/dz для расчёта №1 равен –4,3 К/м, а для расчёта №2 равен –4,8 К/м, другими словами, расчёт №2 показал более усиленный теплосъем.

На рис. 7 приведены графики распределения степеней сухости пара по результатам расчёта инженерной методики с помощью модели кольцевого течения (расчёт №1, кривая 1), моделирования в ANSYS CFX (расчёт №2, кривая 2), расчёта инженерной методикой моделью кольцевого течения без учёта конденсации РТ на этапе съёма перегрева за счёт падения температуры стенки ниже условий насыщения (кривая 3) и расчёта гомогенной моделью, согласно алгоритму, приведенному в [1]. Качественно все зависимости схожи, однако имеются некоторые количественные расхождения. Причём характер расхождения в каждом случае индивидуален. Например, результаты расчёта №1 отличаются в среднем на 0,015 (2,5%) от результатов расчёта №2. Распределение массового паросодержания, определенное гомогенной моделью течения [1], при аналогичной геометрической конфигурации трубы и граничных условиях, различается от результатов расчёта в ANSYS CFX на 0,108 (21,5%). Среднее отличие результатов расчёта №1 относительно расчёта №2 при определении координат с одинаковым значением степени сухости составило 4,3%. Для принципа расчёта из [1] при тех же условиях – 30,4%, к тому же, погрешность имеет тенденцию к росту с увеличением z .

На длине трубопровода $l = 70$ м (выходное сечение) для расчёта №1 массовое содержание конденсата $(1 - x)$ составляет 0,575, для расчёта №2 – 0,653, для расчёта в предположении отсутствия конденсации у стенки тру-

бы на этапе охлаждения – 0,485, а для расчёта [1] – 0,335.

Среднее уменьшение степени сухости пара вдоль оси трубопровода \overline{dx}/dz для расчётов составило: 0,011 м⁻¹ – для расчёта №1, 0,010 м⁻¹ – для расчёта №2, 0,005 м⁻¹ – для методики расчёта, приведенной в [1]. Таким образом, наиболее интенсивный процесс конденсации наблюдается в модели расчёта №1. В то же время скорость уменьшения степени сухости пара для расчёта №2 незначительно отличается от величины для расчёта №1. Это можно заметить по практически равному углу наклона двух кривых 1 и 2 (рис. 7) на участке конденсации.

Стоит отметить, что относительная близость распределений степеней сухости пара двух принципиально разных расчётов №1 и №2 объясняется одновременно большим, в сравнении с гомогенной моделью, коэффициентом теплоотдачи для кольцевой модели течения и более высокой точностью расчёта в ANSYS CFX.

Различие результатов для степени сухости пара и температуры определяется, в первую очередь, тем, что ANSYS CFX обеспечивает сравнительно высокий уровень решения задачи. Это достигается, во-первых, за счёт более мелкой структуры сетки, в сравнении с инженерными методиками (меньшая ошибка при интерполяции результатов в узлах), во-вторых, за счёт принципа решения, построенного на методе конечных элементов (в то время как инженерные методики расчёта были основаны на методе конечных разностей). Также в не малой степени на результат влияет различие моделей, послуживших основой решения: в ANSYS CFX (расчёт №2) и [1] течение фаз теплоносителя задано гомогенным (линии 2 и 4 на рис. 7), а в инженерной методике (расчёт №1) – кольцевым раздельным (линии 1 и 3).

При $z = 39,2$ м кривая 1 (рис. 7) имеет характерный излом, связанный с переходом от охлаждения пара с учетом конденсации вблизи стенки трубопровода соотношениями гомогенного потока к конденсации, описываемой кольцевой моделью течения.

Результаты расчётов моделью кольцевого течения с учётом конденсации на участке охлаждения (кривая 1, рис. 7) и без учёта (кривая 3) по степени сухости отличаются на 0,105 (12,3%). Длина трубопровода при одинаковой степени сухости в среднем отличается на 6,4 м. Следовательно, для повышения точности моделирования необходимо учитывать

тот факт, что на этапе охлаждения РТ имеется

процесс конденсации за счёт условия $T_{ст} < T_s$.

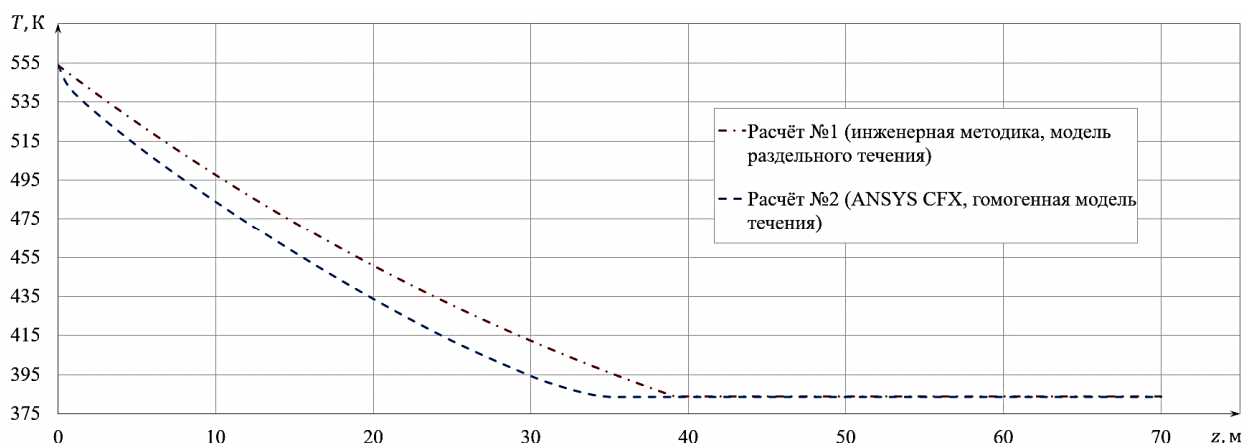


Рис. 6. Изменение средней температуры в сечениях по длине трубопровода

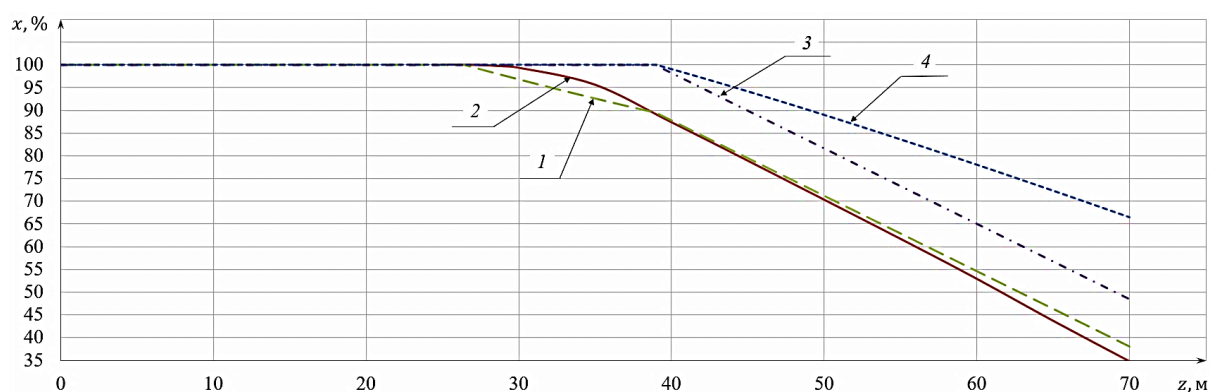


Рис. 7. Распределение массового паросодержания вдоль оси трубопровода:

1 – расчёт №1 (инженерная методика, кольцевая модель течения), 2 – расчёт №2 (ANSYS CFX, гомогенная модель течения), 3 – инженерная методика, кольцевая модель течения (в предположении отсутствия конденсации на участке охлаждения), 4 – инженерная методика, гомогенная модель течения [1]

Выводы

В рамках данного исследования рассмотрена система отдачи тепла рабочего тела холодному источнику – грунту – для энергоустановки децентрализованной выработки тепловой и электрической энергии. Был произведён расчёт стационарного теплообмена движущегося теплоносителя (толуола) с грунтом через цилиндрическую стенку – трубопровод – с учётом конденсации двумя методами: расчёт №1 (инженерная методика) модель раздельного кольцевого течения посредством метода конечных разностей с учётом конденсации РТ на этапе снятия перегрева и без неё, расчёт №2 – в ANSYS CFX с применением гомогенной модели течения. Также произведен расчёт инженерной методикой с помощью гомогенной модели течения согласно алгоритму из [1]. Далее прове-

ден сравнительный анализ результатов, полученных с применением указанных методик.

Расчёты № 1 и 2 дают качественно и количественно схожие результаты. Установлено, что значения температур на этапе охлаждения РТ, определенные инженерными методиками, достаточно хорошо согласуются с результатами моделирования в ANSYS CFX, средняя погрешность составляет 11,0 К (2,6%).

В выходном сечении трубопровода для расчёта №1 массовая доля конденсата составляет 0,575, для расчёта №2 – 0,653, а для инженерного расчёта посредством гомогенной модели при тех же условиях – 0,335. В среднем, значения степеней сухости пара, определенные инженерными методиками, отличаются от расчёта в ANSYS CFX на 2,5% и 21,5% для кольцевой и гомогенной модели соответственно.

Результаты расчётов кольцевой моделью течения с учётом конденсации на этапе охлаждения рабочего тела (расчёт №1) и без нее по степени сухости отличаются на 0,105 (12,3%). Длина трубопровода при одинаковой степени сухости пара больше на 6,4 м для расчёта с пренебрежением наличия конденсации на участке охлаждения.

Несмотря на различие в подходах и трудоёмкость моделирования, разные модели дают схожие результаты. В особенности наиболее близкими к результатам моделирования при помощи ANSYS CFX являются результаты расчёта инженерной методикой с применением кольцевой модели течения.

Литература

1. Кишалов А. Е., Зиннатуллин А. А. Тепловой расчёт горизонтального трубопровода с учётом конденсации теплоносителя // Технические науки: теория и практика: материалы IV Междунар. науч. конф. Казань: Молодой ученый, 2018. С. 27-32.
2. Характеристика материала 08X17T // Марочник стали и сплавов [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=319 (дата обращения: 30.10.2018)
3. Теплопроводность горных пород и минералов, их плотность и теплоемкость // Thermalinfo.ru [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/mineraly/teploprovodnost-gornyh-porod-i-mineralov-ih-plotnost-i-teploemkost> (дата обращения: 30.10.2018).
4. NIST REFPROP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (дата обращения: 30.10.2018).
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 708 с.
6. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик и др. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
7. Петухов Б.С., Шиков В.К. Справочник по теплообменникам. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с.
8. Волков М.М., Михеев А.Л., Конев К.А. Справочник работника газовой промышленности. М.: Недра, 1989. 286 с.
9. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
10. Лашугина Н.Г., Макашова О.В., Медведев Р.М. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики: учеб. пособие. Л.: Машиностроение, 1988. 336 с.
11. Кудоярова В.М., Кишалов А.Е. Решение прикладных задач теплообмена и гидрогазодинамики в пакете ANSYS: учеб. пособие. Уфа: РИК УГАТУ, 2016. 219 с.
12. The Homogeneous Model // SHARCNET [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en/us/help/cfx/mod/i1305196.html> (дата обращения: 30.10.2018).

Поступила 17.01.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Кишалов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики, Уфимский государственный авиационный технический университет (450008, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12), e-mail: kishalov@ufanet.ru

Зиннатуллин Альмир Альбертович – студент четвертого курса кафедры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет (450008, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12), e-mail: zinnatullin.almir@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2249>

COMPUTATIONAL MODELLING OF HEAT-TRANSFER AGENT CONDENSATION IN HORIZONTAL PIPELINE

A.E. Kishalov, A.A. Zinnatullin

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

Abstract: currently, decentralized energy production gains a significant relevance due to several essential disadvantages of centralized power supply such as energy loss to the environment while transferred, the need for energy transformation and a probability of de-energizing a large number of consumers in case of an accident. One of the methods of decentralized energy generation is using low-power plants based on Rankin organic cycle. The working body enters the turbine and performs useful work once it has been heated and converted into the vapor. Then it gets into the condenser, is condensed and is fed back to the boiler with the use of the pump. The turbine rotates the electric generator and electricity is generated. In this paper, one of the options of removing working fluid heat to the cold source – ground – using a horizontally oriented pipe of circular cross section is considered. The modelling is conducted using engineering simulation and 3D design software ANSYS CFX based on finite element method (homogeneous model) and finite difference method (separate O-ring flow model). For both multiphase flow modelling approaches, the distribution of steam mass content (steam dryness) and averaged heat-transfer agent temperature along the pipeline length is determined. Results of multiphase flow modelling by finite element and finite difference method are analyzed

Key words: decentralized energy generation, heat transfer, condensation, homogeneous flow model, separate O-ring flow model, thermophysical processes mathematical modeling, ANSYS CFX

References

1. Kishalov A.E., Zinnatullin A.A. "Thermal calculation of horizontal pipeline regarding the condensation of the heat-transfer agent", *Proc. of IV International Scientific Conference: Technical Sciences: Theory and Practice (Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf.)*, Kazan, Molodoy uchyenyi, 2018, available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/312/14598/>
2. "Characteristics of the material 08H17T", *Mark System of Steel and Alloys (Marochik staley i splavov)*, 2018, available at: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=319
3. "Thermal conductivity of rocks and minerals, their density and heat capacity", *Thermalinfo.ru*, 2018, available at: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/mineraly/teploprovodnost-gornyh-porod-i-mineralov-ih-plotnost-i-teploemkost>
4. "NIST REFPROP", 2018, available at: <https://www.nist.gov/srd/refprop>
5. Vargaftik N.B. "Handbook of thermophysical properties of gases and liquids" ("Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti"), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1963, 708 p.
6. Vargaftik N.B. "Handbook of thermal conductivity of liquids and gases" ("Spravochnik po teploprovodnosti zhidkosti i gazov"), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 352 p.
7. Petukhov B.S., Shikov V.K. "Heat Exchanger Handbook" ("Spravochnik po teploobmennikam"), Moscow, Energoatomizdat, 1987, 560 p.
8. Volkov M.M., Mikheev A.L., Konev K.A. "Gas Industry Handbook" ("Spravochnik rabotnika gazovoi promyshlennosti"), Moscow, Nedra, 1989, 286 p.
9. Kutateladze S.S. "Fundamentals of the theory of heat transfer" ("Osnovy teorii teploobmena"), Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p.
10. Lashutina N.G., Makashova O.V., Medvedev R.M. "Technical thermodynamics with the basics of heat transfer and hydraulics" ("Tekhnicheskaya termodinamika s osnovami teploperedachi i gidravliki"), Leningrad, Mashinostroenie, 336 p.
11. Kudoyarova V.M., Kishalov A.E. "Solution of applied problems of heat transfer and fluid dynamics in the ANSYS" ("Reshenie prikladnykh zadach teploobmena i gidrogazodinamiki v pakete ANSYS"), Ufa State Aviation Technical University, Ufa, RIK USATU, 2016, 219 p.
12. "The Homogeneous Model", *SHARCNET*, 2018, available at: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en/us/help/cfx_mod/i1305196.html

Submitted 17.01.2019; revised 15.04.2019

Information about the authors

Aleksandr E. Kishalov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Ufa State Aviation Technical University (12 Karla Marksa st., Ufa 450008, Russia), e-mail: kishalov@ufanet.ru

Almir A. Zinnatullin, Student, Ufa State Aviation Technical University (12 Karla Marksa st., Ufa 450008, Russia), e-mail: zinnatullin.almir@gmail.com

О ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ СТАДИИ ДИФФУЗИИ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА

А.С. Канюгина

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: для управления распределенными производственными процессами с несколькими номинальными режимами актуальной является задача объединения локальных статических окрестностных систем, описывающих номинальные режимы, в общую окрестностную систему с общим законом управления, имитирующим действия диспетчера как по стабилизации режимов, так и по переводу процесса из одного номинального режима в другой. Методы такого объединения должны учитывать, в частности, варианты зависимости этих локальных режимов и переключений как от внешних условий (внешних входов), так и от внутренних состояний узлов системы. В работе предлагается вариант решения описанной актуальной задачи в рамках теории квазистатических окрестностных систем. Разработанная методика применяется для решения задачи управления температурными параметрами стадии диффузии производства сахара в диффузионных аппаратах колонного типа в условиях зависимости номинального температурного режима от качества сахарной свеклы. Полученные формулы статического пропорционального управления температурами могут использоваться для коррекции действий оператора, что способствует эффективности протекания процесса диффузии. Приведенные в работе исследования проводились на основе сезонной выборке данных производства АО «АПО «Аврора» СП «Боринский сахарный завод», объем выборки более 10000 наблюдений

Ключевые слова: квазистатическая окрестностная система, билинейная окрестностная система, кластеризация, номинальный режим, управление вблизи номинального режима, управление квазистатической системой

Введение

Различные аспекты проблемы управления технологическими параметрами свеклосахарного производства рассматривались в исследованиях многих авторов, в частности, в работах [1-4]. Задача управления температурным режимом изучалась, в основном, для диффузионных аппаратов наклонного типа и соответствующие схемы управления не могут быть адаптированы для аппаратов колонного типа, основанных на совершенно другом технологическом решении. К тому же существующие схемы управления не рассматривают выбор температурного режима от качества перерабатываемой свеклы. Таким образом, проблема управления температурными параметрами стадии диффузии в диффузионных аппаратах колонного типа в условиях зависимости номинального температурного режима от качества сахарной свеклы остается актуальной. В настоящей работе эта проблема рассматривается с точки зрения методологии окрестностных структур и систем, синтезирующей в себе системный анализ технологических схем, построение статических моделей и решение задачи управления соответствующими статическими системами.

Постановка задачи

На основе квазистатической окрестностной системы стадии диффузии производства сахара необходимо решить задачу управления температурными параметрами стадии диффузии в диффузионных аппаратах колонного типа в условиях зависимости номинального температурного режима от качества сахарной свеклы.

Методы исследования

В качестве теоретической и методологической основы исследования использованы методы системного анализа, теории графов, математической статистики, математического моделирования, теории управления, вычислительные эксперименты.

Квазистатические окрестностные системы производственных процессов и квазистатические композиции номинальных режимов

Напомним кратко квазистатическую схему объединения окрестностных систем, изложенную ранее в [5, 6]. Мы будем использовать обозначения и терминологию из работы [6]. В частности, мы будем считать известными понятия вершинной (вертексной) и реляционной статических окрестностных систем. Вершин-

ные системы, записанные в неявной форме, совпадают с традиционными окрестностными системами из [7]. Уравнения вершинной системы соответствуют вершинам (узлам) окрестностной структуры, в случае реляционной системы – ребрам-связям. Реляционные системы обобщают класс окрестностных систем и отличаются от них большей гибкостью, позволяют упростить этап системного анализа технологической схемы распределенного многостадийного производства и этап построения соответствующей этой схеме окрестностной системы для дальнейшего решения задач управления.

Во многих случаях можно считать, что номинальному режиму моделируемого производственного процесса соответствует стационарная точка гипотетической глобальной динамической модели процесса, и потому в качестве модели вблизи номинального режима можно использовать статическую линейную или билинейную окрестностную систему [7, 8]. Достаточно типичной является ситуация, когда номинальных режимов несколько и диспетчер производства изменяет управляющие переменные в зависимости от внешних входных или входных данных узлов. Построение более сложной динамической модели, описывающей переходные режимы (а не только номинальные) на основе данных наблюдений, то есть регрессионными методами, обычно не дает хороших результатов. Поэтому при моделировании процессов с несколькими номинальными режимами имеет смысл вместо усложнения уравнений перейти к квазистатической схеме, которая была описана в [6, 7]. Номинальные режимы могут быть либо технологическими, то есть заданными инструкциями, либо эмпирическими, то есть определяемыми на основе данных наблюдения системы, либо искусственно заданными. В последнем случае квазистатическая схема используется для аппроксима-

ции гипотетической или уже заданной нелинейной модели более простыми, как правило, линейными. Мы будем рассматривать далее вариант схемы для номинальных режимов только по внешним входам. Общий случай с номинальными режимами по узлам рассмотрен ранее в [6]. Идентификация номинальных (эмпирических) режимов окрестностной системы в этом случае производится на основе кластеризации входных данных системы.

Можно предполагать, что множеству номинальных режимов по внешним входам соответствует кластеризация множества входных данных $D(0) = D_1 \cup \dots \cup D_M \in \mathbb{R}^{N_0}$ с центрами кластеров $d_1, \dots, d_M \in \mathbb{R}^{N_0}$, где M – количество кластеров, соответствующее числу номинальных режимов по входам; N_0 – размерность пространства входов. Переходы между номинальными режимами могут осуществляться дискретно или непрерывно в зависимости от выбранной модели управления и рекомендаций технологов. В квазистатической схеме эти переходы описываются функциями α – коэффициентами в перечисленных выше моделях. Далее мы описываем, какими должны быть эти функции в дискретном и непрерывном случае.

Пусть $\mathfrak{D}(0) = \mathfrak{D}_1 \cup \dots \cup \mathfrak{D}_M \in \mathbb{R}^{N_0}$ – разбиение пространства \mathbb{R}^{N_0} (разбиение Дирихле-Вороноего) входных данных с центрами кластеров $d_1, \dots, d_M \in \mathbb{R}^{N_0}$ и $\chi_m(d)$ – характеристические функции множеств \mathfrak{D}_m .

Дискретной композицией (по входам) вершинных локальных моделей для номинальных режимов по входам мы называем квазистатическую систему (1).

Дискретной композицией (по входам) реляционных локальных моделей для номинальных режимов по входам мы называем квазистатическую систему (2).

$$\begin{cases} X_s(i) = \chi_1(d)F_i^1(X(*, i), X_u(i)) + \dots + \chi_M(d)F_i^M(X(*, i), X_u(i)), \\ X(\infty) = \chi_1(d)F_\infty^1(X(*, \infty)) + \dots + \chi_M(d)F_\infty^M(X(*, \infty)), \\ i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_s(i) = \chi_1(d)F_i^1(Y(*, i), X_u(i)) + \dots + \chi_M(d)F_i^M(Y(*, i), X_u(i)), \\ Y_s(i, k) = \chi_1(d)F_{ik}^1(Y(*, i), X(i)) + \dots + \chi_M(d)F_{ik}^M(Y(*, i), X(i)), \\ X(\infty) = \chi_1(d)F_\infty^1(Y(*, \infty)) + \dots + \chi_M(d)F_\infty^M(Y(*, \infty)), \\ i = 1, \dots, n; k \in Out(i). \end{cases} \quad (2)$$

Для каждого из множеств $D_1, \dots, D_M \subset \mathbb{R}^{N_0}$ вычислим ковариационную матрицу и обозна-

чим через $\varphi_1, \dots, \varphi_M$ соответствующие N_0 -мерные нормальные плотности с центрами $d_1, \dots, d_M \in \mathbb{R}^{N_0}$. Положим

$$\bar{\varphi}_m(d) = \frac{\varphi_m(d)}{\varphi_1(d) + \dots + \varphi_M(d)}; m = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Функции $\bar{\varphi}_m(d)$ образуют разбиение единицы на пространстве \mathbb{R}^{N_0} .

$$\begin{cases} X_s(i) = \bar{\varphi}_1(d)F_i^1(X(*, i), X_u(i)) + \dots + \bar{\varphi}_M(d)F_i^M(X(*, i), X_u(i)), \\ X(\infty) = \bar{\varphi}_1(d)F_\infty^1(X(*, \infty)) + \dots + \bar{\varphi}_M(d)F_\infty^M(X(*, \infty)), \\ i = 1, \dots, n. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_s(i) = \bar{\varphi}_1(d)F_i^1(Y(*, i), X_u(i)) + \dots + \bar{\varphi}_M(d)F_i^M(Y(*, i), X_u(i)), \\ Y_s(i, k) = \bar{\varphi}_1(d)F_{ik}^1(Y(*, i), X(i)) + \dots + \bar{\varphi}_M(d)F_{ik}^M(Y(*, i), X(i)), \\ X(\infty) = \bar{\varphi}_1(d)F_\infty^1(Y(*, \infty)) + \dots + \bar{\varphi}_M(d)F_\infty^M(Y(*, \infty)), \\ i = 1, \dots, n; k \in Out(i). \end{cases} \quad (5)$$

Управление статической системой вблизи номинального режима

При решении задачи управления окрестной системой вблизи некоторой точки в пространстве состояний и управлений (в частности, вблизи номинального режима) нелинейную модель можно аппроксимировать линейной с помощью линеаризации уравнений системы.

Как вершинную, так и реляционную статические нелинейные системы в общем виде в классических обозначениях без учета окрестной структуры можно записать следующим образом:

$$X^0 + \Delta X = F(X^0, U^0) + F'_X(X^0, U^0)\Delta X + F'_U(X^0, U^0)\Delta U, \quad (7)$$

или

$$\Delta X = F'_X(X^0, U^0)\Delta X + F'_U(X^0, U^0)\Delta U. \quad (8)$$

Управление вблизи номинального режима X^0, U^0 будем осуществлять по принципу пропорционального регулирования, который основан на пропорциональном изменении ΔU управляющего воздействия в зависимости от разности ΔX между наблюдаемыми значениями $X^0 + \Delta X$ и заданными (номинальными) значениями X^0 переменных системы [9]. При сравнении наблюдаемого значений переменных с заданными значениями получаем ошибку рассогласования ΔX . Пропорциональное управление заключается в генерировании управляющего сигнала $U^0 + \Delta U$, который направлен на устранение ошибки рассогласования. Чем больше ошибка рассогласования, тем сильнее управляющий сигнал. Заметим,

Непрерывной нормальной композицией (по входам) вершинных локальных моделей для номинальных режимов по входам мы называем квазистатическую систему (4).

Непрерывной нормальной композицией (по входам) реляционных локальных моделей для номинальных режимов по входам мы называем квазистатическую систему (5).

$$\begin{cases} X = F(X, U), \\ Y = G(X, U). \end{cases} \quad (6)$$

где X – вектор состояний окрестностной системы, U – вектор управлений (входов), Y – вектор выходов окрестностной системы.

Пусть X^0 и U^0 – состояния и управления окрестностной системы, соответствующие номинальному режиму. Линеаризация первого уравнения (на самом деле это векторное уравнение, то есть система) системы (6) вблизи номинального режима (X^0, U^0) имеет вид (раскладываем в ряд Тейлора в точке X^0, U^0 и берем линейные слагаемые):

что после устранения ошибки рассогласования второе уравнения системы (6) (для выходов Y) выполняется автоматически. Для компенсации сдвига ΔX (по состояниям) необходимо найти приращение управления ΔU , соответствующее сдвигу $-\Delta X$. Это значение можно найти как решение системы (8), подставляя в эту систему вектор $-\Delta X$ вместо вектора ΔX :

$$\Delta U = [F'_U(X^0, U^0)]^+ (F'_X(X^0, U^0) - E) \Delta X. \quad (9)$$

где $[F'_U(X^0, U^0)]^+$ – псевдообратная матрица. Полная компенсация ошибки рассогласования ΔX возможна только в том случае, когда формула (9) дает настоящее решение системы (8), при этом минимальность нормы решения в случае, когда оно не является единственным,

соответствует минимальности необходимого компенсирующего изменения вектора управления. В том случае, когда формула (9) дает только псевдорешение, минимизирующее невязку, полная компенсация ошибки рассогласования по пропорциональной схеме управления невозможна. Для существования настоящего (а не псевдо) решения, как правило, достаточно того, чтобы размерность вектора управления U была больше либо равна размерности вектора состояния X .

Управление квазистатическими окрестностными системами с номинальными режимами по входам

Пусть

$$\begin{cases} X = F^m(X, U), \\ m = 1, \dots, M, \end{cases} \quad (10)$$

записанные в общем виде, без учета окрестностной структуры регрессионные модели, построенные для каждого из номинальных режимов (X^m, U^m) по входам, где m – номер кластера, M – количество кластеров. Мы не записываем уравнения для выходов, поскольку в задаче пропорционального управления выходы нам не потребуются.

В этих упрощенных обозначениях квазистатическая (по входам) окрестностная система имеет вид (11):

$$X = \alpha_1(d)F^1(X, U) + \dots + \alpha_M(d)F^M(X, U) = \tilde{F}(X, U, d), \quad (11)$$

где $d \in \mathbb{R}^{N_0}$ и $\alpha_1(d) + \dots + \alpha_M(d) = 1, \alpha_m(d) \geq 0$.

В качестве *текущего* номинального режима системы (11) нужно взять вектор (12):

$$(\tilde{X}, \tilde{U}) = (\alpha_1(d)X^1 + \dots + \alpha_M(d)X^M, \alpha_1(d)U^1 + \dots + \alpha_M(d)U^M). \quad (12)$$

Управление вблизи текущего номинального режима по входам (\tilde{X}, \tilde{U}) осуществляется по схеме, описанной в предыдущем пункте.

Замечание. В случае дискретных композиций локальных моделей по входам текущий номинальный режим (\tilde{X}, \tilde{U}) всей системы совпадает с одним из номинальных режимов (X^m, U^m) . В случае непрерывных композиций локальных моделей по входам текущий номинальный режим (\tilde{X}, \tilde{U}) всей системы принадлежит выпуклой оболочке номинальных режимов (X^m, U^m) .

Системный анализ и окрестностное моделирование процесса экстрагирования (стадии диффузии)

Технологический процесс получения диффузионного сока в диффузионном аппарате колонного типа можно рассматривать как систему, элементами которой являются ошпариватель, диффузионная колонна и подогреватель. На рис. 1 представлена технологическая блок-схема получения диффузионного сока с позиции системного анализа.

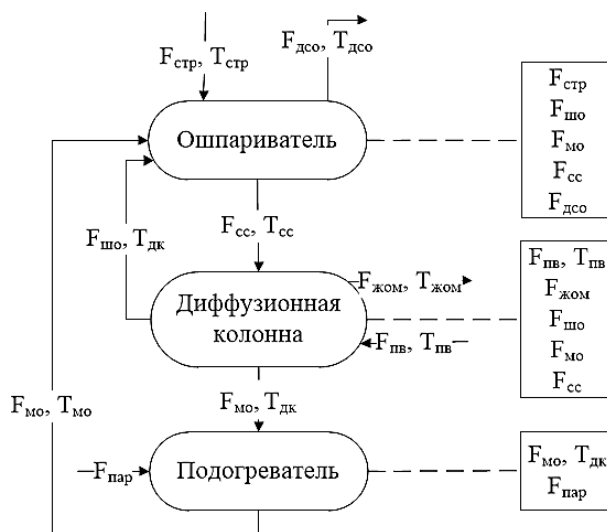


Рис. 1. Технологический процесс получения диффузионного сока

Перечислим переменные, указанные на технологической схеме:

- $F_{стр}$ - расход стружки;
- $T_{стр}$ - температура стружки;
- $F_{дсо}$ - расход соко-стружечной смеси;
- $T_{дсо}$ - температура соко-стружечной смеси;
- $F_{жом}$ - расход жома;
- $T_{жом}$ - температура жома;
- $F_{пв}$ - расход питательной воды;
- $T_{пв}$ - температура питательной воды;

$F_{\text{шо}}$ - расход диффузионного сока, поступающего в шахту ошпаривателя;

$T_{\text{дк}}$ - температура диффузионного сока в нижней части диффузионной колонны;

$F_{\text{мо}}$ - расход диффузионного сока, поступающего в мешалку ошпаривателя;

$T_{\text{мо}}$ - температура диффузионного сока после подогрева;

$F_{\text{дсо}}$ - расход диффузионного сока из ошпаривателя;

$T_{\text{дсо}}$ - температура диффузионного сока из ошпаривателя.

Элементы системы связаны между собой технологическими потоками $F_{\text{сс}}, T_{\text{сс}}$; $F_{\text{мо}}, T_{\text{дк}}$;

$F_{\text{шо}}, T_{\text{дк}}$; $F_{\text{мо}}, T_{\text{мо}}$. Ошпариватель и диффузионная колонна образуют подсистему с обратной связью $F_{\text{сс}}, T_{\text{сс}}$; $F_{\text{шо}}, T_{\text{дк}}$. Входными потоками в систему являются $F_{\text{стр}}, T_{\text{стр}}$; $F_{\text{пв}}, T_{\text{пв}}$, которые соответствует подаче свекловичной стружки и питательной воды из внешней среды. Выходными потоками системы являются $F_{\text{дсо}}, T_{\text{дсо}}$; $F_{\text{жом}}, T_{\text{жом}}$, которые образуются в результате функционирования системы. Отдельно на рис. 1 отмечены параметры, управляющего воздействия на элементы системы.

Для математической формализации технологического процесса стадии диффузии производства сахара на рис. 1 построим окрестностную структуру:

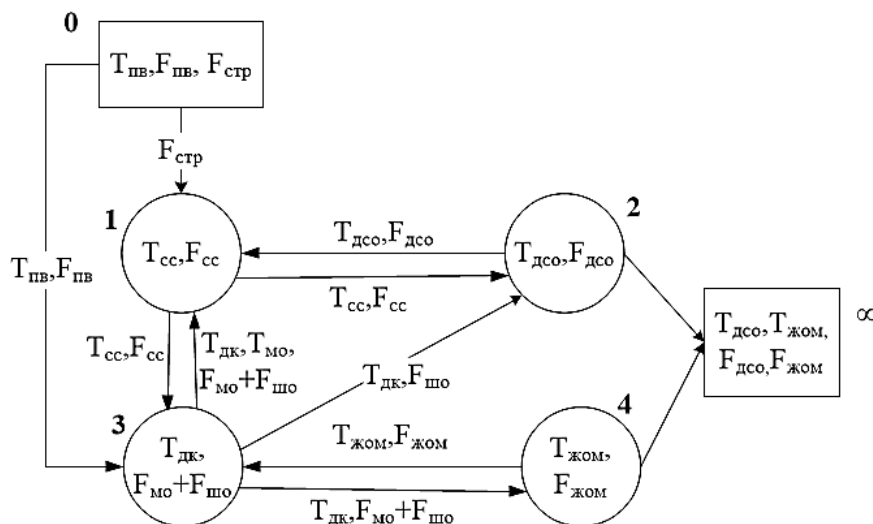


Рис. 2. Окрестностная структура стадии диффузии

В качестве узлов окрестностной структуры примем технологические операции процесса получения диффузионного сока. Узел 1 соответствует получению сокостружечной смеси в ошпаривателе. Узел 2 соответствует технологическому потоку диффузионного сока из ошпаривателя. Узел 3 соответствует процессу экстракции сахара в диффузионной колонне. Узел 4 соответствует операции выгрузки обессахаренной стружки, т.е. сырого жома, в верхней части диффузионной колонны.

Для дальнейшего удобства работы с математической моделью дополним окрестностную структуру формальными узлами 0 и ∞ , которые соответствуют внешним входам и выходам из системы, соответственно. Узел 0 включает в себя операции подачи свекловичной стружки в шахту ошпаривателя и питательной воды в диффузионную колонну. Подача питательной и жомопрессовой воды в диффузионную колонну

осуществляется совместно. Узел ∞ выводит информацию о параметрах диффузионного сока и жома, полученных в процессе экстрагирования.

При составлении окрестностной структуры мы не рассматривали операции по нагреву диффузионного сока в подогревателе до заданных температур как отдельный самостоятельный процесс. Данные по температуре диффузионного сока после подогрева включили в переменную $T_{\text{мо}}$.

Построенная окрестностная структура является реляционной, поскольку узел 3 передает по ребрам-связям разные наборы переменных $Y(3,1) = [T_{\text{дк}}, \{T_{\text{мо}}, F_{\text{мо}} + F_{\text{шо}}\}]$, $Y(3,2) = [T_{\text{дк}}, F_{\text{шо}}]$, $Y(3,3) = [T_{\text{дк}}, F_{\text{мо}} + F_{\text{шо}}]$. Переменные связей узлов 1, 2 и 4 совпадают с переменными узлов: $X(1) = Y(1,2) = Y(1,3) = [T_{\text{сс}}, F_{\text{сс}}]$; $X(2) = Y(2,1) = [T_{\text{дсо}}, F_{\text{дсо}}]$; $X(4) = Y(4,3) = [T_{\text{жом}}, F_{\text{жом}}]$. Переменную внешнего входа

$X(0) = \{T_{пв}, F_{пв}, F_{стр}\}$ мы рассматриваем как вектор, компонентами которого являются переменные $Y(0,1) = \{F_{стр}\}$ и $Y(0,3) = \{T_{пв}, F_{пв}\}$, соответствующие входам $a_{0,1}$ и $a_{0,3}$ в систему. Аналогичным образом определяется переменная внешнего выхода $X(\infty) = \{T_{дсо}, F_{дсо}, T_{жом}, F_{жом}\}$ с компонентами $Y(2, \infty) = \{T_{дсо}, F_{дсо}\}$ и $Y(4, \infty) = \{T_{жом}, F_{жом}\}$.

Переменными состояниями окрестностной структуры являются $T_{сс}, T_{дк}, T_{дсо}, T_{жом}$, остальные переменные являются управлениями или выходами. Преимуществом использования реляционных окрестностных структур для системного анализа технологической схемы является упрощение соответствующей этой схеме окрестностной структуры (как орграфа). При построении вершинной окрестностной структуры нам пришлось бы увеличивать количество узлов орграфа, а именно разделять узел 3 на три новых узла, соответствующих переменным ребер-связей реляционного узла 3. Это, в свою очередь, привело бы к потере наглядности окрестностной структуры и ее соответствия физическому объекту.

Реляционная окрестностная система [6], соответствующая схеме на рис. 2, имеет вид (13)-(16). Уравнения для выходов в данном случае имеют вид тождеств $T_{дсо} = T_{дсо}$ и $T_{жом} = T_{жом}$. Для управления температурным режимом нам потребуются только уравнения (13)-(14), т.к. основными параметрами, определяющими процесс экстрагирования, являются $T_{сс}$ и $T_{дк}$, которые должны поддерживаться в определенных достаточно узких пределах за счет управления остальными переменными системы.

$$T_{сс} = f(T_{дк}, T_{мо}, T_{дсо}, F_{сс}, F_{стр}, F_{мо}, F_{шо}, F_{дсо}); \quad (13)$$

$$T_{дк} = g(T_{сс}, T_{пв}, T_{жом}, F_{шо} + F_{мо}, F_{сс}, F_{жом}, F_{пв}); \quad (14)$$

$$T_{дсо} = h(T_{дк}, T_{сс}, F_{дсо}, F_{сс}, F_{шо}); \quad (15)$$

$$T_{жом} = v(T_{дк}, F_{жом}, F_{шо} + F_{мо}). \quad (16)$$

Предварительная обработка исходных данных

Приведенные в работе исследования проводились на основе сезонной выборке данных производства АО «АПО «Аврора» СП «Боринский сахарный завод» за период с 10.09.2016 по 30.11.2016г. с временным интервалом 10 минут, объем выборки более 10000 наблюдений. Данные о качестве перерабатываемой сахарной свеклы и свекловичной стружки (подмороженность корнеплодов свеклы, дигестия (сахари-

стость) свекловичной стружки, длина 100г стружки) были взяты из журнала регистрации химической лаборатории. Химический анализ качества свеклы и свекловичной стружки выполняется лаборантами каждые 2-4 часа и фиксируется вручную.

Технологические параметры производства записываются автоматически в условиях реального времени и в некоторых случаях могут сопровождаться ошибками регистрации. Для обеспечения достоверности данных наблюдений проведем предварительную обработку исходных данных.

На рис. 3 изображен график расхода стружки. Из рис. 3 мы видим смещение данных для 2992-4096 наблюдений, которое завышает значения расхода стружки на 20 единиц. При этом смещение значений других технологических параметров производства не наблюдается. По информации, полученной от технолога производства, причиной данной ошибки может быть сбой в калибровке ленточных весов. Калибровку ленточных весов необходимо проводить каждые две недели.

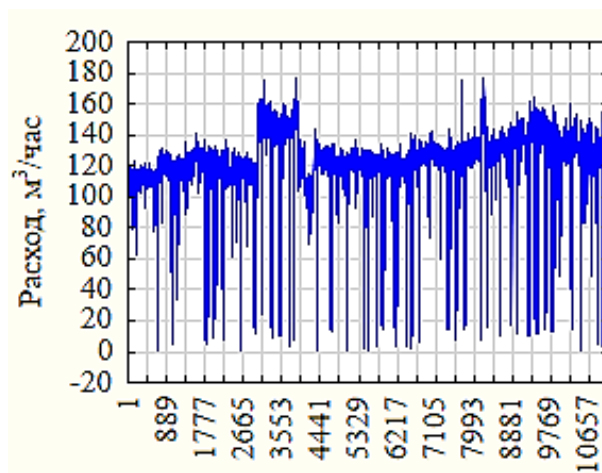


Рис. 3. График расхода стружки

Для устранения случайных ошибок регистрации проведем коррекцию смещения данных расхода стружки по формуле:

$$F'_{стр} = \frac{(F_{стр} - 20) * (1 - \text{sign}(F_{стр} - 20))}{2}, \quad (17)$$

где $F'_{стр}$ – скорректированное значение расхода стружки.

На рис. 4 изображен график расхода стружки с учетом коррекции смещения данных.

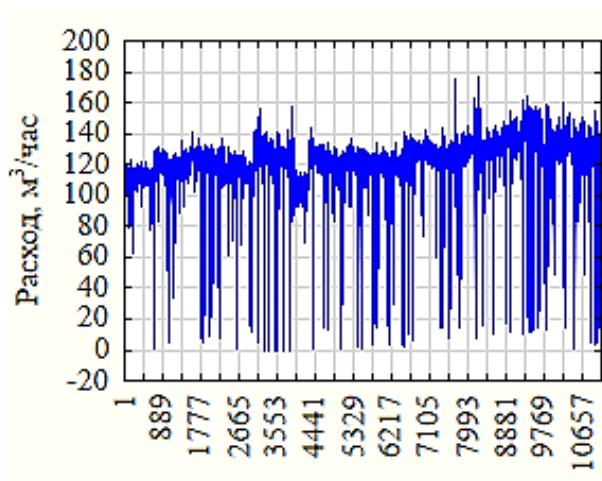


Рис. 4. График расхода стружки с учетом коррекции смещения данных

Построение общей билинейной окрестностной системы на основе уравнений теплового баланса

В силу сложности процессов и недостаточности информации мы не можем записать точные уравнения теплового баланса и потому поступаем следующим образом: сначала мы записываем теоретические уравнения баланса, не учитывающие все детали и точные значения параметров процесса, а затем, используя экспериментальные данные и методы множественной регрессии, уточняем коэффициенты этих уравнений. Автоматическим следствием такого подхода является билинейность итоговой модели. Можно сказать, что формальная билинейная модель в нашем случае привела бы к уравнениям с очень большим количеством идентифицируемых параметров, в то время как при использовании законов сохранения количество параметров билинейной модели значительно уменьшается.

Тепловой баланс технологического процесса составляется на основе закона сохранения энергии. Уравнения теплового баланса для ошпаривателя (18) и диффузионной колонны (19) имеют вид:

$$F_{стр}T_{стр}C_{стр} + F_{мо}T_{мо}C_{мо} + F_{шо}T_{дк}C_{шо} = F_{сс}T_{сс}C_{сс} + F_{дсо}T_{дсо}C_{дсо} + Q_{потерь}; \quad (18)$$

$$F_{сс}T_{сс}C_{сс} + F_{пв}T_{пв}C_{пв} = F_{мо}T_{дк}C_{мо} + F_{шо}T_{дк}C_{шо} + F_{жом}T_{жом}C_{жом} + Q_{потерь}; \quad (19)$$

где $C_{стр}$, $C_{мо}$, $C_{шо}$, $C_{сс}$, $C_{дсо}$, $C_{пв}$, $C_{жом}$ – удельные теплоемкости, $Q_{потерь}$ – потери тепла.

Для ошпаривателя и диффузионной колонны на рис. 5 и 6 представлены диаграммы отклонения теплового баланса (разности левой

и правой частей равенств (18) и (19)), вычисленного по выборкам, от нулевого теоретического, приведенные к среднему значению теплоты сокостружечной смеси. При вычислении отклонений температура стружки $T_{стр}$, данные для которой отсутствуют, принималась равной 20°C; все теплоемкости считались равными единице; потерями тепла пренебрегли.

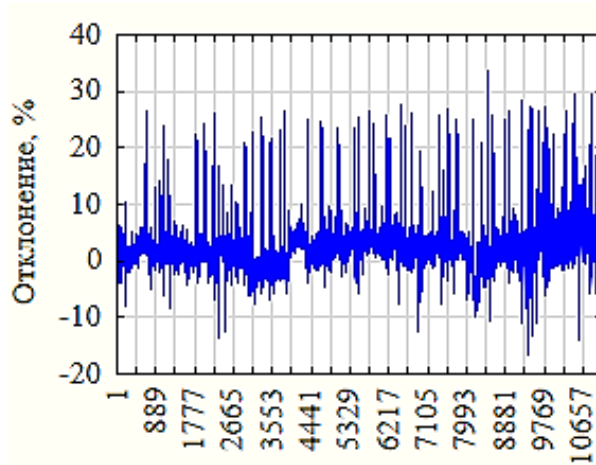


Рис. 5. Диаграмма отклонений расчетного теплового баланса ошпаривателя от нулевого теоретического

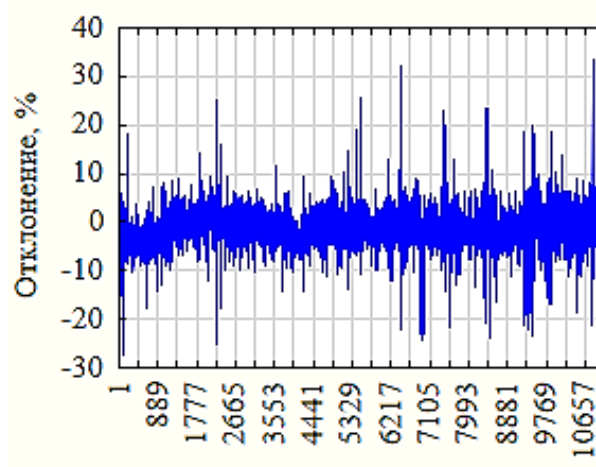


Рис. 6. Диаграмма отклонений расчетного теплового баланса диффузионной колонны от нулевого теоретического

Средняя ошибка отклонений расчетного теплового баланса от нулевого для выборочных данных в предположении равенства всех удельных теплоемкостей единице и нулевых теплотерь составила 2,8% для ошпаривателя и 2,7% для диффузионной колонны. Таким образом, уравнения теплового баланса для выборочных данных могут использоваться для наших целей.

Параметрическая идентификация общей билинейной окрестностной системы

На основании уравнений теплового баланса (18) и (19) можно предложить следующую билинейную реализацию системы (13)-(14):

$$F_{cc}T_{cc} = a_1F_{стр} + a_2F_{мо}T_{мо} + a_3F_{шо}T_{дк} + a_4F_{дсо}T_{дсо}; \quad (20)$$

$$(F_{шо} + F_{мо})T_{дк} = b_1F_{cc}T_{cc} + b_2F_{пв}T_{пв} + b_3F_{жом}T_{жом}. \quad (21)$$

При построении уравнений (20)-(21) удельные теплоемкости не учитывались в предположении их равенства. Числовые значения параметров F_{cc} и $F_{жом}$ выражались из уравнений материального баланса (22)-(23)

$$F_{стр} + F_{мо} + F_{шо} = F_{cc} + F_{дсо}; \quad (22)$$

$$F_{cc} + F_{пв} = F_{мо} + F_{шо} + F_{жом}. \quad (23)$$

Билинейное слагаемое $F_{стр}T_{стр}$ в уравнении (20) заменено на линейное слагаемое $F_{стр}$ из-за отсутствия данных по температуре стружки $T_{стр}$. Фактически мы считаем, что температура стружки постоянна и ее значение неявным образом учитывается в коэффициенте a_1 уравнения (20).

Проведем параметрическую идентификацию системы методами регрессионного анализа. Результаты параметрической идентификации системы приведены ниже. Все независимые переменные уравнений множественной регрессии являются значимыми ($p < 0.05$). Уравнения записаны в естественных единицах измерения, то есть без нормализации.

$$F_{cc}T_{cc} = 58,850F_{стр} - 0,052F_{дсо}T_{дсо} + 0,872F_{мо}T_{мо} + 0,370F_{шо}T_{дк}; \quad (24)$$

$R = 0,99; F_{расч} = 6043E3; F_{табл} = 2,37;$

$$(F_{шо} + F_{мо})T_{дк} = 0,969F_{cc}T_{cc} + 1,048F_{пв}T_{пв} - 0,961F_{жом}T_{жом}; \quad (25)$$

$R = 0,99; F_{расч} = 1653E4; F_{табл} = 2,60.$

Уравнения (24) и (25) можно считать «регрессионно уточненными» уравнениями баланса. Для ошпаривателя и диффузионной колонны на рис. 7 и 8 изображены графики функции ошибок в процентах (разности левых и правых частей) для пар уравнений (18), (24) и (19), (25), приведенные к среднему значению $F_{cc}T_{cc}$.

График ошибок исходной теоретической теплобалансовой модели

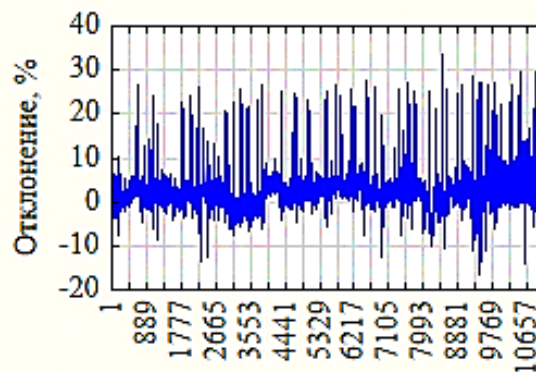


График ошибок уточненной регрессионной модели для ошпаривателя

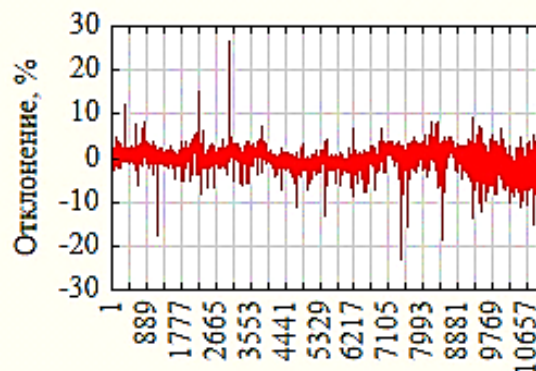


Рис. 7. График ошибок исходной теоретической теплобалансовой модели (18) и уточненной регрессионной модели (24) для ошпаривателя

Средние ошибки в процентах исходной теоретической теплобалансовой модели и уточненной регрессионной модели для ошпаривателя составили 2,8% и 1,58% соответственно. Таким образом, средняя ошибка уточненной регрессионной модели для ошпаривателя приблизительно в 2 раза меньше ошибки исходной теоретической теплобалансовой модели.

Средние ошибки в процентах исходной теоретической теплобалансовой модели и уточненной регрессионной модели для диффузионной колонны составили 2,8% и 0,98% соответственно. Таким образом, средняя ошибка уточненной регрессионной модели для диффузионной колонны приблизительно в 3 раза меньше ошибки исходной теоретической теплобалансовой.

График ошибок исходной теоретической теплобалансовой модели для диффузионной колонны

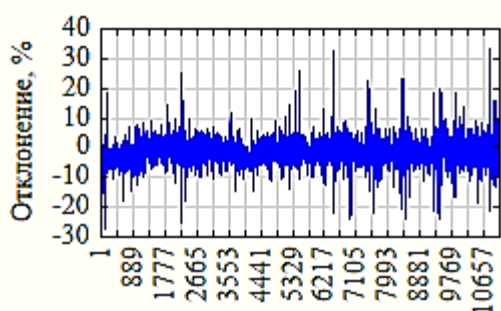


График ошибок уточненной регрессионной модели для диффузионной колонны

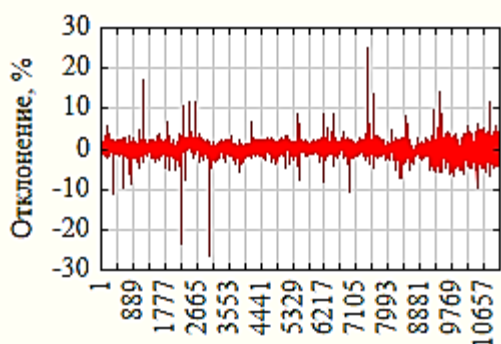


Рис. 8. График ошибок исходной теоретической теплобалансовой модели (19) и уточненной регрессионной модели (25) для диффузионной колонны

На основе коэффициента множественной корреляции $R = 0,99$, проверки независимых переменных на отсутствие коллинеарности, выполнимости критерия Фишера $F_{расч} > F_{табл}$ можно сделать вывод об адекватности построенной билинейной окрестностной системы (24)-(25) на основе уравнений теплового баланса и возможности ее дальнейшего применения для управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара.

Кластеризация данных и идентификация номинальных режимов

Выбор температурного режима стадии диффузии производства сахара определяется качеством свеклы. Качество свеклы зависит от условий ее хранения и факторов внешней среды и меняется в течение сезона переработки сырья. При температуре окружающей среды ниже 0°C наблюдается значительное ухудшение качества свеклы (подмороженность, загнивание), что естественным образом отражается на качестве получаемого диффузионного сока [10].

Произведем идентификацию номинальных температурных режимов по входам на основе кластеризации данных качества свеклы. Для оценки качества свеклы будем использовать значения подмороженности корнеплодов свеклы $P, \%$ и длины 100 г стружки $L, \text{м}$. На рис. 9 приведены точки рассеяния двумерного вектора входных данных $P, \%$ и $L, \text{м}$.

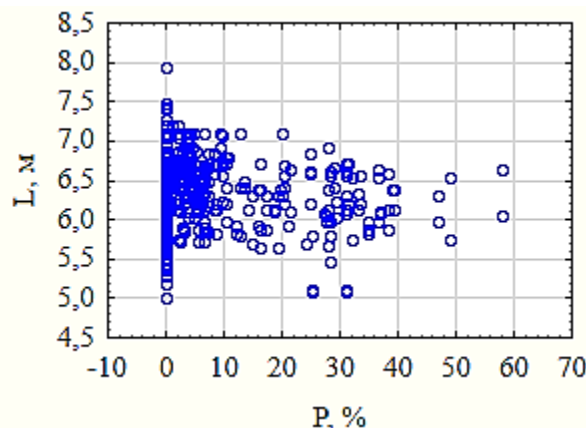


Рис. 9. Точки рассеяния двумерного вектора входных данных

Для идентификации номинальных температурных режимов будем использовать кластеризацию методом k -средних, полагая $k = 3$. На рис. 10 три режима выделены разными обозначениями.

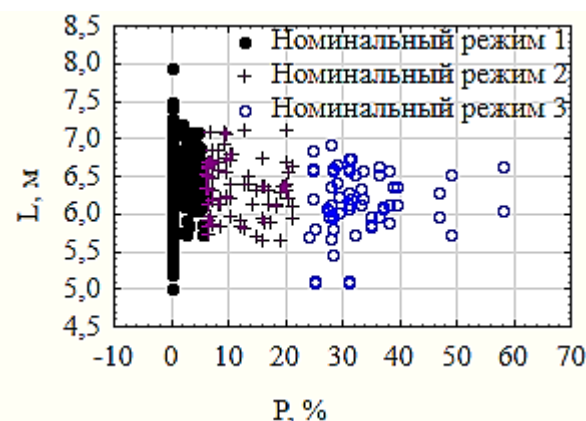


Рис. 10. Номинальные температурные режимы по входам

Из рис. 10 мы видим, что идентификация номинальных режимов проводилась только на основе данных по подмороженности, аппроксимирующие нормальные плотности для режимов являются одномерными. Схожие результаты были получены и при кластеризации данных по подмороженности и дигестии свекловичной стружки. На основе полученных результатов, можно сделать заключение, что показатель

подмороженности корнеплодов свеклы является определяющим при выборе температурного режима стадии диффузии производства сахара.

Выделенные номинальные температурные режимы 1-3 в дальнейших вычислениях используются для управления температурными параметрами стадии диффузии производства сахара.

Построение квазистатической окрестностной системы стадии диффузии с несколькими номинальными режимами процесса экстрагирования

На основе общей билинейной окрестностной системы (24)-(25) построим квазистатическую окрестностную систему стадии диффузии производства сахара с тремя номинальными

режимами и переходными режимами, позволяющую управлять температурными параметрами процесса диффузии. В качестве локальных статических окрестностных систем, описывающих номинальные режимы 1-3, возьмем линейные части тейлоровских разложений уравнений общей билинейной системы (24)-(25) вблизи этих номинальных режимов.

В качестве переменных управлений примем $F_{мо}, T_{мо}, T_{пв}$. Значения остальных переменных $F_{сс}, F_{стр}, F_{дсо}, T_{дсо}, F_{шо}, T_{дк}, F_{шо} + F_{мо}, F_{пв}, F_{жом}, T_{жом}$ заменим соответствующими выборочными средними.

Локальные линеаризации общей билинейной системы вблизи номинальных режимов 1-3, соответствующие локальным статическим окрестностным системам, имеют вид (26)-(28):

$$\begin{cases} T_{сс}^1 = 0,576T_{мо} + 0,179F_{мо} + 0,115T_{дк} - 24,947; \\ T_{дк}^1 = 0,997T_{сс} + 0,231T_{пв} - 15,538; \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} T_{сс}^2 = 0,561T_{мо} + 0,175F_{мо} + 0,108T_{дк} - 23,909; \\ T_{дк}^2 = 1,038T_{сс} + 0,218T_{пв} - 17,312; \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} T_{сс}^3 = 0,558T_{мо} + 0,185F_{мо} + 0,108T_{дк} - 24,387; \\ T_{дк}^3 = 1,041T_{сс} + 0,218T_{пв} - 17,506. \end{cases} \quad (28)$$

Объединим построенные локальные окрестностные системы, описывающие номинальные температурные режимы 1-3, в общую квазистатическую глобальную систему с помощью непрерывных разбиений единицы. Квазистатическая окрестностная система стадии диффузии с тремя номинальными температурными режимами и переходными режимами имеет вид (29)-(33):

$$\begin{cases} T_{сс} = \bar{\varphi}_1 T_{сс}^1 + \bar{\varphi}_2 T_{сс}^2 + \bar{\varphi}_3 T_{сс}^3; \\ T_{дк} = \bar{\varphi}_1 T_{дк}^1 + \bar{\varphi}_2 T_{дк}^2 + \bar{\varphi}_3 T_{дк}^3; \end{cases} \quad (29)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2\pi * 1,456} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(P_1 - 0,675)^2}{1,456^2} \right] \right\}; \quad (30)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2\pi * 5,050} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(P_2 - 11,806)^2}{5,050^2} \right] \right\}; \quad (31)$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{2\pi * 7,149} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(P_3 - 32,995)^2}{7,149^2} \right] \right\}; \quad (32)$$

$$\bar{\varphi}_r = \frac{\varphi_r}{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3}, r = 1, \dots, 3; \quad (33)$$

где $P_r, r = 1, 2, 3$ – средние подмороженности корнеплодов свеклы, соответствующие номинальному режиму r .

Управление температурным режимом стадии диффузии производства сахара на основе квазистатической окрестностной системы

Рассмотрим задачу управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара на основе квазистатической окрестностной системы.

Управление квазистатической системой можно считать линейной комбинацией с коэффициентами $\bar{\varphi}_r, r = \overline{1, 2, 3}$ управлений локальных окрестностных систем вблизи номинальных режимов. Управление вблизи текущего номинального температурного режима осуществляется по принципу пропорционального регулирования. Запишем законы управления для локальных окрестностных систем (26)-(28) в соответствии с формулами (7) и (8):

Закон управления для локальной окрестностной системы (26):

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,115 \\ 0,997 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0,576 & 0,179 \\ 0,231 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix}; \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,576 & 0,179 \\ 0,231 & 0 & 0 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} -1 & 0,115 \\ 0,997 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}; \quad (35)$$

Закон управления для локальной окрестностной системы (27):

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,108 \\ 1,038 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0,561 & 0,175 \\ 0,218 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix}; \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,561 & 0,175 \\ 0,218 & 0 & 0 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} -1 & 0,108 \\ 1,038 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}; \quad (37)$$

Закон управления для локальной окрестностной системы (28):

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,108 \\ 1,041 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0,558 & 0,185 \\ 0,218 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix}; \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,558 & 0,185 \\ 0,218 & 0 & 0 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} -1 & 0,108 \\ 1,041 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Управляемыми переменными ошпаривателя являются $F_{мо}$ и $T_{мо}$, поэтому температура сокостружечной смеси T_{cc} может поддерживаться за счет одновременного управления переменными $F_{мо}$ и $T_{мо}$, либо за счет управления каждой из переменных $F_{мо}$ и $T_{мо}$ по отдельности. Управляемой переменной диффузионной колонны является температура питательной воды $T_{пв}$, посредством которой и регулируется температура в диффузионной колонне.

Таким образом, управление температурным режимом стадии диффузии в диффузионном аппарате колонного типа можно осуществлять в трех вариантах: тремя переменными $T_{пв}$, $T_{мо}$, $F_{мо}$; двумя переменными $T_{пв}$, $T_{мо}$; двумя переменными $T_{пв}$, $F_{мо}$. Вычисляя псевдообратные матрицы, запишем формулы статического управления температурами для каждого из трех случаев:

1. Переменные управления $T_{пв}$, $T_{мо}$, $F_{мо}$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix} = \left(\bar{\varphi}_1 \begin{bmatrix} 4,316 & -4,329 \\ -1,583 & 0,182 \\ -0,492 & 0,056 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_2 \begin{bmatrix} 4,761 & -4,587 \\ -1,624 & 0,175 \\ -0,506 & 0,054 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_3 \begin{bmatrix} 4,775 & -4,587 \\ -1,614 & 0,174 \\ -0,535 & 0,057 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}; \quad (40)$$

2. Переменные управления $T_{пв}$, $T_{мо}$ в предположении $\Delta F_{мо} = 0$:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta T_{мо} \end{bmatrix} = \left(\bar{\varphi}_1 \begin{bmatrix} 4,316 & -4,329 \\ -1,736 & 0,199 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_2 \begin{bmatrix} 4,761 & -4,587 \\ -1,782 & 0,192 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_3 \begin{bmatrix} 4,775 & -4,587 \\ -1,792 & 0,193 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}; \quad (41)$$

3. Переменные управления $T_{пв}$, $F_{мо}$ в предположении $\Delta T_{мо} = 0$:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_{пв} \\ \Delta F_{мо} \end{bmatrix} = \left(\bar{\varphi}_1 \begin{bmatrix} 4,316 & -4,329 \\ -1,736 & 0,199 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_2 \begin{bmatrix} 4,761 & -4,587 \\ -1,782 & 0,192 \end{bmatrix} + \bar{\varphi}_3 \begin{bmatrix} 4,775 & -4,587 \\ -1,792 & 0,193 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Delta T_{cc} \\ \Delta T_{dk} \end{bmatrix}. \quad (42)$$

Выводы

В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Рассмотрен технологический процесс получения диффузионного сока в диффузионном аппарате колонного типа с позиции системного анализа. Для математической формализации технологического процесса использованы окрестностные структуры и системы. Построены окрестностная структура и соответ-

ствующая ее окрестностная система стадии диффузии производства сахара.

2. Проведена предварительная обработка исходных данных с целью повышения достоверности данных наблюдений.

3. Построена общая билинейная окрестностная система. Структурная идентификация системы осуществлена на основании уравнений теплового баланса для ошпаривателя и диффузионной колонны. Параметрическая идентификация коэффициентов системы произведена

стандартными регрессионными методами. Средняя ошибка уточненной регрессионной модели для ошпаривателя приблизительно в 2 раза меньше ошибки исходной теоретической теплобалансовой. Средняя ошибка уточненной регрессионной модели для диффузионной колонны приблизительно в 3 раза меньше ошибки исходной теоретической теплобалансовой.

4. Выполнена идентификация номинальных температурных режимов по входам на основе кластеризации внешних входных данных системы. Выделены три номинальных температурных режима, зависящие от качества свеклы.

5. На основе общей билинейной окрестностной системы построена квазистатическая окрестностная система стадии диффузии производства сахара с тремя номинальными режимами и переходными режимами, позволяющая управлять температурными параметрами процесса диффузии.

6. Рассмотрена задача управления температурными параметрами стадии диффузии производства сахара на основе квазистатической окрестностной системы. Получены формулы статического пропорционального управления температурами.

Литература

1. Кульнева Н.Г., Голыбин В.А., Кульнев А.В. Модель принятия решений по управлению технологическими процессами // Сахар. 2006. № 8. С. 25-29.
2. Канавалов И.А., Уваров С.Г. Математическое моделирование и имитационное исследование процесса получения диффузионного сока в свеклосахарном производстве // Синергия наук. 2017. № 12. С. 813-820.
3. Ляшенко С.А. Построение линейной регрессионной модели диффузионного отделения сахарного производства // Вісник НТУ «ХПІ». – Збірник наукових праць. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Х.: НТУ «ХПІ». 2014. № 55(1097). С. 58-64.
4. Бессонов А.А., Руденко С.О. Управление технологическими процессами при производстве сахара с помощью нейрорезолюционных моделей // Информатика, математическое моделирование, экономика: сб. науч. статей по итогам Третьей Междунар. науч.-практ. конф. Смоленск: Смоленский филиал Российского университета кооперации. 2013. Т. 1. С. 91-95.
5. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М., Канюгина А.С. Квазистатические окрестностные системы // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4. С. 137-142.
6. Канюгина А.С. Квазистатические композиции номинальных режимов распределенных систем // Вестник ЛГТУ. 2018. № 3(37). С. 5-13.
7. Блюмин С.Л., Шмырин А.М. Окрестностные системы: монография. Липецк: ЛЭГИ, 2005. 132 с.
8. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Шмырина О.А. Билинейные окрестностные системы: монография. Липецк: ЛЭГИ, 2006. 131 с.
9. Болл, Стюарт Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. М.: ИМ «Додэка-XXI», 2007. 360 с.
10. Бугаенко И.Ф. Основы сахарного производства. М.: Международная сахарная компания, 2002. 332 с.

Поступила 27.02.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Канюгина Анастасия Сергеевна – аспирант, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: kosarewanastya@yandex.ru

ON THE TASK OF CONTROLLING THE TEMPERATURE MODE OF THE DIFFUSION STAGE OF SUGAR PRODUCTION

A.S. Kanyugina

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: to control distributed production processes with several nominal modes, the actual task is to unite local static neighborhood systems describing nominal modes into a general neighborhood system with a general control law imitating the controller's actions both in stabilizing modes and in transferring a process from one nominal mode to another. Methods of such a combination should take into account, in particular, the variations in the dependence of these local modes and switchings on both external conditions (external inputs) and internal states of the system nodes. The paper proposes a solution to the described actual problem in the framework of the theory of quasistatic neighborhood systems. The developed technique is used to solve the problem of controlling the temperature parameters of the stage of diffusion of sugar production in diffusion apparatus of the column type in terms of the dependence of the nominal temperature on the quality of sugar beet. The obtained formulas of static proportional temperature control can be used to correct the actions of the operator, which contributes to the efficiency of the diffusion process. The studies cited in the study were conducted on the basis of a seasonal sample of data produced by JSC APO Aurora JV Borinsky Sugar Refinery, the sample volume of more than 10,000 observations

Key words: quasistatic neighborhood system, bilinear neighborhood system, clustering, nominal mode, control near nominal mode, control of quasistatic system

References

1. Kul'neva N.G., Golybin V.A., Kulnev A.V. "Model of decision making on management of technological processes", *Sugar (Sakhar)*, 2006, no. 8, pp. 25-29.
2. Kanavalov I.A., Uvarov S.G. "Mathematical modeling and simulation study of the process of obtaining diffusion juice in beet-sugar production", *Synergy of Sciences (Sinergiya nauk)*, 2017, no. 12, pp. 813-820.
3. Lyashenko S.A. "Building a linear regression model of diffusion separation of sugar production", *Bulletin of the NTU "KhPI", Collection of scientific works. Series: System Analysis, Management and Information Technology*, 2014, no. 55 (1097), pp. 58-64.
4. Bessonov A.A., Rudenko S.O. "Management of technological processes in the production of sugar with the help of neuroevolutionary models", *Proc. of the Third International Scientific and Practical Conference: Informatics, Mathematical Modeling, Economics, Smolensk, April 24-26, 2013*, pp. 91-95.
5. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Kanyugina A.S. "Quasistatic neighborhood systems", *Modern High Technologies (Sovremennye naukoymkie tekhnologii)*, 2018, no. 4, pp.137-142.
6. Kanyugina A.S. "Quasistatic compositions of nominal modes of distributed systems", *Bulletin of LSTU (Vestnik LGTU)*, 2018, no. 3 (37), pp. 5-13.
7. Blumin S.L., Shmyrin A.M. "Neighborhood systems: monograph" ("Okrestnostnye sistemy: monografiya"), Lipetsk, LEGI, 2005, 132p.
8. Blumin S.L., Shmyrin A.M., Shmyrina O.A. "Bilinear neighborhood systems: monograph" ("Bilineynyye okrestnostnye sistemy: monografiya"), Lipetsk, LEGI, 2006, 131p.
9. Ball Stuart R. "Analog microcontroller interfaces" ("Analogovye interfeysy mikrokontrollerov"), Moscow, IM "Dodeka-XXI", 2007, 360p.
10. Bugaenko I.F. "Basics of sugar production" ("Osnovy sakharnogo proizvodstva"), Moscow, International Sugar Company, 2002, 332p.

Submitted 27.02.2019; revised 15.04.2019

Information about the author

Anastasiya S. Kanyugina, Graduate student, Lipetsk State Technical University (5a, Internatsional'naya st., Lipetsk 398050, Russia), e-mail: kosarewanastya@yandex.ru

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ИНТЕРВАЛЬНОГО НЕЙРОМОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ЛИТЫХ СЛЯБОВ

Ю.Е. Полозова

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается применение дуальнопараметрической нейронной сети для решения обратной задачи нейромоделирования на примере управления качеством литых слябов. Актуальность исследования обусловлена возможностью повышения качества горячекатаной продукции за счет применения методов интервального анализа. Кроме того, предлагаемый в работе подход позволяет сократить время обучения нейросетевой модели и объем обучающего множества за счет интервализации исходных данных. Дана краткая теоретическая справка, представляющая собой результаты предыдущих исследований, описан используемый подкласс интервальных нейросетевых моделей – дуальнопараметрические нейронные сети. Представлен разработанный алгоритм для решения обратной задачи интервального нейромоделирования, обоснована необходимость применения рандомизированного подхода. Приведены результаты численных экспериментов для различного числа входных параметров модели и слябов в обучающем множестве, описана последовательность этапов моделирования. По результатам экспериментов вычислена вероятность возникновения дефекта для найденных интервальных значений входных параметров и сделаны выводы о возможности практического применения предложенного подхода. Отмечены возможности последующей модификации представленного алгоритма в зависимости от возникающих ограничений для значений входных параметров, связанных с технологическими особенностями производства и обработки литых слябов

Ключевые слова: интервальное нейросетевое моделирование, дуальнопараметрическая нейронная сеть, обратная задача, управление качеством литых слябов, рандомизированный алгоритм

Введение

Интервальные нейронные сети (ИНС) успешно применяются при решении задач, в которых исходные данные или результат представляются в виде диапазона значений. В предыдущих исследованиях был предложен подкласс интервальных нейросетевых моделей – дуальнопараметрическая нейронная сеть (ДНС), в структуре которой, кроме интервальнозначных входов и выходов, присутствуют одновременно интервальные и вещественные веса нейронов. Такая структура позволяет достичь гарантированности включения точного решения в выходной интервал сети, что является отличительной чертой методов интервального анализа.

В данной работе рассматривается решение обратной задачи нейромоделирования с применением ДНС на примере задачи анализа качества литых слябов на основе комплекса технологических параметров разливки стали. Ставится задача определения интервалов значений технологических параметров, при которых вероятность дефекта не выходит за пределы заданных границ.

Постановка задачи

Рассматривается задача повышения качества поверхности горячекатаного проката, за-

ключающаяся в уменьшении вероятности появления видов дефектов «раскатанная трещина» и «плена» при получении горячекатаной продукции из стальных слябов. Предполагается, что дефект горячего проката определяется поверхностными или внутренними дефектами соответствующих слябов.

Сляб изготавливается на машинах непрерывного литья заготовок конвертерного цеха металлургического производства. Качественный сляб характеризует его химический состав, отсутствие пор и трещин. Перед началом прокатки слябы нагреваются, после чего подаются в валки и прокатываются между ними в несколько проходов. Полученная заготовка разделяется на несколько сегментов. Далее проводится анализ каждого сегмента на наличие дефектов. На рис. 1 приведена упрощенная схема прокатки сляба и деления проката на сегменты.

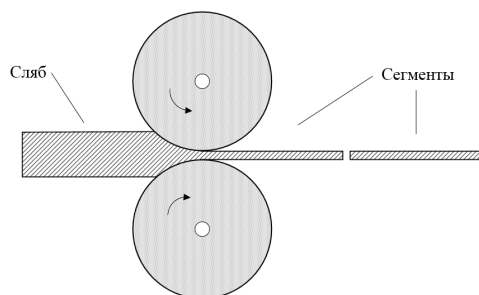


Рис. 1. Упрощенная схема прокатки сляба

По количеству дефектных сегментов оценивается вероятность дефекта сляба. Факторами, определяющими качество поверхности проката, считаются параметры разливки стали, а также параметры внепечной обработки. Входные параметры для каждого сегмента могут иметь незначительные колебания. Минимальное и максимальное значения параметра по сегментам формируют нижнюю и верхнюю границы интервального значения соответствующего параметра сляба.

Ставится задача определения таких интервальных значений входных параметров, при которых вероятность появления дефекта поверхности проката не выходит за пределы заданных границ. Задача анализа качества литых слябов на основе комплекса технологических параметров исследовалась в работах [1–3]. Целью настоящего исследования является анализ возможности применения дуальнопараметрической нейронной сети (ДНС) для решения обратной задачи нейромоделирования при управлении качеством литых слябов.

Методы исследования

1. Дуальнопараметрическая нейронная сеть (ДНС)

ДНС представляет собой интервальную нейросетевую модель, которая содержит параметры двух типов: интервальные и вещественные. При этом интервальные параметры (веса) содержатся только в последнем скрытом слое нейронов. Веса нейронов остальных слоев представляют собой вещественные числа. Вещественные параметры являются частным случаем интервальных, у которых нижняя и верхняя границы совпадают.

Исходные данные представляются обучающим множеством с интервальными значениями: $\{[\tilde{x}_i], [\tilde{y}_i]\}_{i=1}^k$. ДНС реализует интервальнозначную функцию $[y] = f([w], [x])$, где $[w]$ – вектор интервальнозначных параметров (весов) сети. Задача обучения модели ДНС состоит в определении таких значений весов, при которых модельные выходы включают все интервальные выходы, имеющиеся в обучающем множестве.

Ошибка обучения модели ДНС определяется функционалом качества:

$$J([w]) = \sum_{i=1}^k Q_i([w]) = \sum_{i=1}^k p_i b_i, \quad (1)$$

$$b_i = [b_{i1} \quad b_{i2}]^T = \left[\tilde{y}_i - \underline{y}_i([w]) \quad \overline{y}_i([w]) - \tilde{y}_i \right]^T;$$

$$p_i = [p_{i1} \quad p_{i2}],$$

$$p_{iq} = \begin{cases} 1, & b_{iq} \geq 0 \\ -b_{iq} / T, & b_{iq} < 0; \end{cases} \quad q = \overline{1, 2}.$$

Здесь k – число примеров обучающего множества, $[w]$ – интервальный вектор весов, $Q_i([w])$ – значение ошибки обучения на i -м примере обучающего множества, p_i – вектор-строка весовых коэффициентов для отклонения границ интервала выхода сети от границ интервала указания учителя на i -м примере обучающего множества, b_i – вектор отклонений границ интервала выхода сети от указания учителя на i -м примере, \tilde{y}_i – нижняя граница интервала указания учителя на i -м примере, $\underline{y}_i([w])$ – нижняя граница интервала выхода сети на i -м примере, $\overline{y}_i([w])$ – верхняя граница интервала выхода сети на i -м примере, \tilde{y}_i – верхняя граница интервала указания учителя на i -м примере, p_{iq} – q -й элемент вектора-строки p_i , b_{iq} – q -й элемент вектора b_i , q – номер элемента вектора, T – уровень толерантности, показывающий порядок отклонения границы интервала, который признается допустимым (например, 0,1, 0,01, 0,001).

Обучение ДНС производится в два этапа:

1) обучение ИНС с вещественными весами с использованием интервального алгоритма обратного распространения ошибки. Полученные в результате обучения параметры используются на втором этапе для инициализации весов нейронов всех скрытых слоев, кроме последнего;

2) обучение только последнего, интервального, слоя нейронов с использованием одного из алгоритмов для обучения ИНС (бисекции, процедуры расширения интервалов, процедуры на основе алгоритма SIVIA). При этом все предыдущие скрытые слои фиксируются с весами нейронов, полученными на первом этапе алгоритма.

2. Инверсия нейронной сети

Инверсия нейронной сети представляет собой процедуру нахождения набора входных величин x^* , которые воспроизводят желаемый выход y^* для заданного набора синаптических весов w . Задача нейромоделирования включает в себя два этапа:

1) параметрическая идентификация для получения весовых коэффициентов w ;

2) поиск входных величин, которые воспроизводят желаемый выход для установленного набора синаптических весов.

В случае использования ДНС ставится задача нахождения одного из возможных наборов интервальнозначных входных величин, при котором модельный выход сети $y([x])$ полностью включается в заданный интервальнозначный выход $[\tilde{y}]$. Проверка принадлежности выполняется по формуле:

$$Q([x]) = \underline{y}([x]) - \tilde{y} + \overline{\tilde{y}} - \overline{y}([x]).$$

Решение удовлетворяет условию поставленной задачи, если $Q([x]) \geq 0$.

Следует отметить, что для интервальных нейросетевых моделей представляется целесообразным применение оригинального алгоритма SIVIA, используемого для обращения множеств. Однако применение алгоритма к моделям ИНС предполагает перебор большого числа возможных вариантов, даже при относительно небольшой размерности входного вектора. В связи с этим предлагается применение рандомизированного алгоритма для решения обратной задачи. Как известно, алгоритмы, основанные на случайном выборе, позволяют за ограниченное время получить приемлемый результат [4].

Алгоритм решения обратной задачи

Используемые обозначения:

M – величина шага приращения интервала.

Вход: $[w], M$.

Выход: $[x]$.

- 1: $Q \leftarrow -1$.
 - 2: **Пока** $Q < 0$ **выполнять**
 - 3: $[x_i] \leftarrow \text{rnd}[0; 1]$.
 - 4: Вычисление выхода сети y и значения Q .
 - 5: **Конец цикла**
 - 6: **Пока** $Q \geq 0$ **выполнять**
 - 7: $[x^*] \leftarrow [x]$.
 - 8: **Если** $x_i^* - M \geq 0$, **тогда**
 - 9: $[x_i^*] \leftarrow [x_i^* - M, x_i^*]$.
 - 10: **Конец условия**
 - 11: $[x_i^*] \leftarrow [x_i^*, x_i^* + M]$.
 - 12: Вычисление значения Q .
 - 13: **Конец цикла**
-

Рис. 2. Предлагаемый алгоритм решения обратной задачи

Таким образом, на выходе алгоритма будет получен интервальнозначный набор входных параметров с максимально широкими границами, при которых достигается желаемый выход, не превышающий заданных границ.

3. Информационно-аналитическая система

Для интервального нейросетевого моделирования и прогнозирования разработана информационно-аналитическая система, представляющая собой пакет `intervalnn` на языке R, включающий программно-аналитические модули для работы с ИНС и ДНС. Пакет `intervalnn` выполняет следующие основные функции:

- идентификация модели ДНС;
- прогнозирование с использованием полученной модели;
- решение обратной задачи интервального нейромоделирования.

Система состоит из четырех логических блоков:

- `main`, в котором реализованы функции идентификации и прогнозирования на основе обычной искусственной нейронной сети прямого распространения;
- `imain`, в котором реализованы функции идентификации и прогнозирования на основе ДНС;
- `gmain`, в котором реализованы функции идентификации и прогнозирования на основе ИНС с вещественными весами и интервальными входными и выходными параметрами;
- `gmmain`, в котором реализованы функции для решения обратной задачи нейромоделирования с использованием ДНС.

Результаты

Для проведения экспериментов исходные данные были подвергнуты свертке путем интервализации [3], то есть вещественные значения технологических параметров по каждому из сегментов были преобразованы в интервальные значения по слябу в целом. Кроме того, вычислена вероятность появления дефекта для каждого сляба и выполнено предварительное нормирование исходных данных. Из множества технологических параметров в каждом опыте выделено некоторое подмножество для использования в качестве входного вектора при формировании примеров обучающего множества. Для моделирования использована двухслойная ДНС. Требуемая вероятность дефекта не должна превышать 1%.

Рассмотрим основные этапы проведения эксперимента.



Рис. 3. Этапы проведения эксперимента

На шаге 1.1 производится подбор числа нейронов скрытого слоя двухслойной модели ДНС (последовательное добавление нейронов в скрытый слой до тех пор, пока уменьшается ошибка обучения). На шаге 1.2 выполняется вычисление весов модели ДНС (с использованием алгоритма на основе процедуры расширения интервалов). На шаге 2 осуществляется применение предложенного алгоритма (рис. 2) для вычисления допустимых границ входных параметров. На заключительном этапе производится вычисление вероятности появления дефекта проката для найденных входных параметров. В таблице приведены результаты для каждого этапа моделирования.

Результаты моделирования

Опыт	Кол-во параметров	Кол-во скрытых нейронов	Кол-во слябов в обучающем множестве	Ошибка обучения	Вероятность дефекта
1	19	2	20	1,22	[0; 0,0050]
2	19	2	50	1,04	[0; 0,0030]
3	23	1	50	1,95	[0; 0,0020]
4	27	2	50	1,07	[0; 0,0100]
5	30	1	50	1,02	[0; 0,0030]
6	35	1	50	1,00	[0; 0,0002]
7	38	1	30	0,76	[0; 0,0080]
8	19	1	70	1,23	[0; 0,0040]
9	23	2	70	1,22	[0; 0,0040]
10	27	2	70	1,24	[0; 0,0040]
11	30	1	70	1,24	[0; 0,0030]

Выводы

Следует отметить, что в действительности на значения каждого из входных параметров

могут накладываться технологические ограничения, связанные с невозможностью достижения определенных значений, полученных по результатам моделирования. В этом случае потребуется модификация алгоритма с целью учета ограничений по параметрам.

По результатам экспериментов можно сделать вывод о приемлемом качестве обучения модели ДНС. Можно отметить, что решение обратной задачи удовлетворяет заданному интервалу вероятности появления дефекта, что свидетельствует о возможности практического применения.

Заключение

В работе предложен подход к решению обратной задачи интервального нейромоделирования, основанный на применении ДНС. Представлен разработанный алгоритм для решения обратной задачи интервального нейромоделирования, приведены результаты численных экспериментов. По результатам экспериментов вычислена вероятность возникновения дефекта для найденных интервальных значений входных параметров и сделаны выводы о возможности практического применения предложенного подхода в задаче повышения качества литых слябов на основе комплекса технологических параметров разлива стали.

Литература

1. Сараев П.В., Галкин А.В. Нейроструктурное прогнозирование дефектов горячекатаной продукции // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Одиннадцатой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2014. С. 321–326.
2. Pogodaev A., Saraev P. Neurostructural modelling and prediction of hot-rolled production defects by casting parameters // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2015. Vol. 50. Iss. 6. P. 595–599.
3. Сараев П.В. Интервализация в задачах классификации и анализе качества литых слябов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы Двенадцатой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2015. С. 275.
4. Граничин О.Н. Рандомизированные алгоритмы в задачах обработки данных и принятия решений // Системное программирование. 2012. Т. 6. С. 141–162.

Поступила 26.02.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Полозова Юлия Евгеньевна – аспирант, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: julipolozova@yandex.ru

**SOLVING THE INTERVAL INVERSE NEUROMODELING PROBLEM
IN THE CAST SLABS QUALITY CONTROL**

Yu.E. Polozova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the paper is devoted to applying of dual-parametric neural networks for solving the inverse problem of neuromodeling in the cast slabs quality control. The relevance of the study is due to the possibility of hot-rolled products quality improvement by using of interval analysis methods. In addition, the proposed approach allows one to reduce training time of the neural network model and the training set amount due to an initial data intervalization. The article presents a brief theoretical background that represents the results of previous studies, describes the used subclass of interval neural network models – dual-parameter neural networks. The developed algorithm for solving the inverse problem of interval neuron modeling is presented; the necessity of applying a randomized approach is substantiated. The results of numerical experiments for a different number of input parameters of the model and slabs in the training set are given; the sequence of modeling steps is described. According to the experiment results, the probability of defect occurrence for the found interval values of input parameters was calculated and conclusions were drawn about practical application of the proposed approach. Subsequent modification possibilities of the presented algorithm are noted, depending on the input parameters constraints associated with the technological features of the production and processing of cast slabs

Key words: interval neural network modeling, dual-parameter neural network, inverse problem, cast slab quality control, randomized algorithm

References

1. Saraev P.V., Galkin A.V. “Neurostructural prediction of defects in hot-rolled products”, *Proc. of the Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Modern Problems of the Mining and Metallurgical Complex. Science and Production (Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy odinnadtsatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem)*, Stary Oskol, STI MISiS, 2014, pp. 321-326.
2. Pogodaev A., Saraev P. “Neurostructural modelling and prediction of hot-rolled production defects by casting parameters”, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2015, vol. 50, iss. 6, pp. 595-599.
3. Saraev P.V. “Intervalization in classification problems and in analysis of cast slabs quality”, *Proc. of the Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference, with International Participation: Modern Problems of the Mining and Metallurgical Complex. Science and Production (Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy odinnadtsatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem)*, 2015, 275 p.
4. Granichin O. “Randomized algorithms in data processing and decision making”, *System Programming (Sistemnoe programmirovaniye)*, 2012, v. 6, pp. 141-162.

Submitted 26.02.2019; revised 15.04.2019

Information about the author

Yuliya E. Polozova, Graduate student, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk, 398055, Russia), e-mail: julipolozova@yandex.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЛАБОСВЯЗАННЫХ ОКРЕСТНОСТНЫХ СИСТЕМ**В.В. Сёмина****Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия**

Аннотация: задача идентификации моделей систем заключается в определении их структуры и параметров по результатам наблюдений над входными и выходными переменными реальной системы и решается методами оптимизации. Применительно к сложным системам проблема идентификации усложняется: большое число компонентов систем отражается на ресурсоемкости вычислительных процедур и повышенных требованиях к объемам оперативной памяти для хранения структур данных. В связи с этим актуальными являются разработка и анализ на основе окрестностных моделей новых классов моделей, описывающих сложные связанные системы, позволяющих оптимизировать управление сложными системами, повысить эффективность надежности и качества технических систем. Анализируется задача окрестностного моделирования параллельных и слабосвязанных производственных процессов. Вводится понятие слабосвязанных окрестностных систем, приводится алгоритм разделения окрестностной структуры двойной системы, а также рассматриваются задачи идентификации и управления такими системами. Для двойной системы, состоящей из двух слабосвязанных систем, предлагается алгоритм поиска квазиоптимального режима и при дополнительных размерностных ограничениях – алгоритм стабилизации вблизи заданного номинального режима. В качестве примера рассматривается окрестностная система вентиляции и кондиционирования воздуха в производственном помещении цеха обжига клинкера. При производстве цемента возникает проблема превышения допустимой концентрации пыли и температуры воздуха в цехе, а также концентрации пыли в окружающей среде, связанная с неоптимальной работой системы обеспыливающей вентиляции в цехе обжига клинкера. Применение слабосвязанных окрестностных систем позволяет уменьшить число коэффициентов модели системы, подлежащих параметрической идентификации, а также найти оптимальный режим управления системой вентиляции и фильтрации воздуха

Ключевые слова: окрестностная структура, окрестностная система, слабые связи, системы вентиляции, цементное производство, идентификация систем

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00854 а)

Введение

Окрестностные системы (см. [1]) можно интерпретировать как системы на орграфах специального вида, см. [2, 3]. Орграф, с которым ассоциирована окрестностная система, как правило, представляет собой схему моделируемого распределенного процесса, например, некоторого производства. Достаточно часто встречается ситуация, когда моделируемый процесс может быть описан как совокупность нескольких параллельных процессов над одной и той же окрестностной структурой, взаимодействующих через небольшое количество параметров, то есть «слабосвязанных». Пример такой ситуации был рассмотрен в [4, 5], где процесс вентиляции цеха цементного производства был описан как два параллельных процесса фильтрации и кондиционирования, связанных между собой только объемом перемещаемого воздуха. Формализуя подобные ситуации, в данной статье мы определяем понятие слабосвязанных окрестностных си-

стем и обсуждаем задачи моделирования слабосвязанных процессов и управления ими на основе окрестностной модели. Мы рассматриваем только случай двух параллельных процессов и, соответственно, двух слабосвязанных систем. Обобщение на случай нескольких систем будет дано в последующих публикациях.

Гипотеза слабой связанности

Две окрестностные системы S_1 и S_2 над одной и той же окрестностной структурой (см. [2]-[3]) мы называем параллельными. Для записи окрестностной системы в виде абстрактных уравнений, статических или динамических, в дополнение к окрестностной структуре (орграфу), должны быть определены переменные состояния и управления, относящиеся к узлам и входам структуры.

В случае двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$ переменная состояния или входа называется локальной, если она используется только в S_1 или только в S_2 . Переменная состояния или входа, используемая и в S_1 , и в S_2 , называется

глобальной или общей. Напомним, что каждому узлу v окрестностной структуры соответствует одно или несколько уравнений $S^v = \{S_1^v, S_2^v\}$ окрестностной системы S , в которых участвуют переменные состояния узла v , переменные состояний входящих в v узлов и переменные инцидентных узлу v входов. Для двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$ узел v называется сепарабельным, если все переменные состояния узла v являются локальными; если хотя бы одна из этих переменных является глобальной, то узел v называется несепарабельным.

Входы могут быть внешними (неуправляемыми) и управляемыми, последним соответствуют переменные управления. Везде далее S_1 и S_2 – две параллельные системы.

Подсистемы S_1 и S_2 двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$ называются связанными по состояниям, если имеется хотя бы одна глобальная переменная состояния, и связанными по управлениям, если имеется хотя бы одна глобальная переменная управления.

Подсистемы S_1 и S_2 в двойной системе могут быть:

- а) связаны по состояниям и по управлениям;
- б) связаны только по состояниям;
- в) связаны только по управлениям;
- г) не связанными ни по состояниям, ни по управлениям, то есть независимыми.

Связанные системы S_1 и S_2 мы называем слабосвязанными, если количество глобальных переменных можно считать малым по смыслу рассматриваемой задачи. Это определение, конечно, не является строгим и при желании позволяет назвать системы S_1 и S_2 слабосвязанными даже в том случае, когда все переменные состояний и управлений являются глобальными.

Более формально: назовем сигнатурой двойной системы $\{S_1, S_2\}$ последовательность чисел $\{s_1, s_2, s_3; r_1, r_2, r_3\}$, где $\{s_1, r_1\}$ – количества локальных переменных состояния и управления в S_1 , $\{s_2, r_2\}$ – количества локальных переменных состояния и управления в S_2 , и $\{s_3, r_3\}$ – количества глобальных (общих) переменных состояния и управления. Тогда слабую связанность систем S_1 и S_2 можно определить условием

$$\{(s_3 \ll s_1) \& (s_3 \ll s_2)\} \& \{(r_3 \ll r_1) \& (r_3 \ll r_2)\}$$

или в более широком смысле условием

$$\{(s_3 \ll s_1) \& (s_3 \ll s_2)\} \vee \vee \{(r_3 \ll r_1) \& (r_3 \ll r_2)\}$$

Второе условие позволяет относить к классу слабосвязанных систем все пары систем из класса (с), поскольку в этом случае сигнатура $\{s_1, s_2, s_3; r_1, r_2, r_3\} = \{s_1, s_2, 0; r_1, r_2, r_3\}$ и можно считать, что $0 \ll s_1$ и $0 \ll s_2$. Это же верно и для класса (b).

Разделение окрестностных систем

Далее на схемах мы изображаем узлы окрестностных структур овалами, а входы - прямоугольниками. Для наглядности и для удобства кодирования можно представлять окрестностную структуру двойной системы $S = \{S_1, S_2\}$ как две копии исходной окрестностной структуры, склеенные по несепарабельным узлам и общим (глобальным) входам. Локальные входы и сепарабельные узлы, относящиеся только к одной из подсистем, при этом не дублируются, а остаются в соответствующей копии.

Опишем расщепление окрестностной структуры процесса вентиляции из [4, 5] (рис. 1).

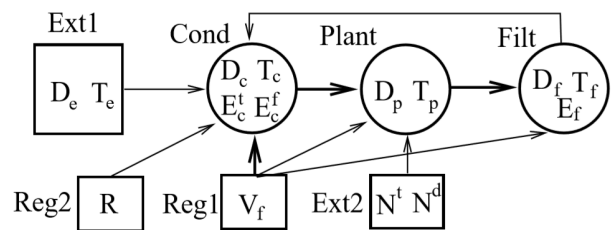


Рис. 1. Окрестностная структура системы вентиляции и фильтрации

Этот процесс включает фильтрацию воздуха от пыли и кондиционирование воздуха по температуре (нагрев или охлаждение), и потому соответствующую окрестностную систему можно считать двойной. Напомним с некоторыми изменениями и уточнениями обозначения переменных состояний и входов. Изменения, по сравнению с [4, 5], связаны с выбором переменных управления; этот выбор, как мы отмечали в [4], в общем случае не является однозначным.

Вход «Ext1»: D_e – концентрация пыли в приточном воздухе, T_e – температура приточного воздуха; после фильтрации, после терморегуляции. Это внешний (неуправляемый) вход.

Вход «Ext2»: N^t, N^d – интенсивности тепловыделения и пылеобразования. Это внешний (неуправляемый) вход; в объемлющей иерархической окрестностной структуре производства переменные N^t, N^d управляемы.

Входы «Reg1» и «Reg2»: V_f – объем фильтруемого воздуха в единицу времени, концентрация пыли, R – коэффициент рециркуляции. Это управляемые входы.

Узел «Cond» фильтрация и терморегуляция приточного воздуха: D_c – концентрация пыли после фильтрации, T_c – температура воздуха, E_c^d и E_c^t – расход энергии в единицу времени на фильтрацию и кондиционирование воздуха.

Узел «Plant» производственный цех, нагрев воздуха и пылеобразование: T_p – установившаяся температура в цехе, D_p – установившаяся концентрация пыли в цехе.

Узел «Filt» вытяжка и фильтрация воздуха перед удалением: D_f, T_f – концентрация пыли и температура после фильтрации, E_f – расход энергии в единицу времени на вытяжку и фильтрацию.

В данном случае все узлы сепарабельны и все управляемые входы (то есть переменные V_f и R) – глобальные. Следовательно, системы, моделирующие фильтрацию и терморегуляцию, являются связанными только по управлениям V_f и R . Общая двойная система относится к классу (с) и имеет сигнатуру $\{5,4,0;2,2,2\}$.

Таким образом, системы фильтрации и кондиционирования являются слабосвязанными, если считать слабосвязанными все пары систем из класса (с). Соответствующая расщепленная окрестностная структура изображена на рис. 2.

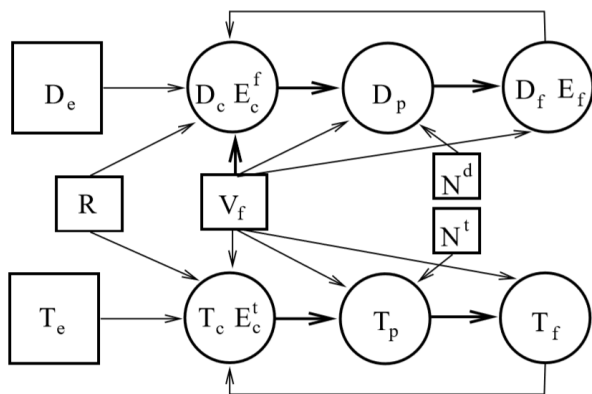


Рис. 2. Окрестностная структура слабосвязанных систем вентиляции и фильтрации

Критерий оптимальности для системы вентиляции (рис. 3) имеет вид:

$$E = E^f + E^t + E_f \rightarrow \min.$$

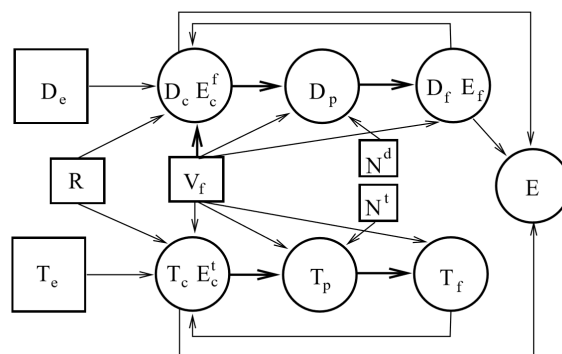


Рис. 3. Окрестностная структура слабосвязанных систем вентиляции и фильтрации с критерием оптимизации E

Идентификация

Структурная идентификация системы, описывающей два слабосвязанных процесса. включает в себя задачу расщепления, то есть представления системы S в виде слабосвязанных подсистем S_1 и S_2 . Это наиболее трудная и, как правило, не формализуемая часть задачи идентификации слабосвязанных систем, даже в тех случаях, когда наличие параллельных процессов не вызывает сомнений. На этом этапе мы фактически имеем дело не с системами уравнений, а с окрестностной структурой процесса и пытаемся расщепить эту структуру на две слабосвязанные.

Основная цель этапа – упрощение уже на абстрактном уровне системы S . Представление S в виде слабосвязанных подсистем автоматически уменьшает количество параметров в аналитических моделях, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации.

В случае двух подсистем после этапа расщепления параметрическая идентификация, как правило, требует примерно вдвое меньше кортежей экспериментальных данных; других существенных отличий на стадии параметрической идентификации нет. Аналогично, при расщеплении на n слабосвязанных подсистем требуется примерно в n раз меньше кортежей экспериментальных данных.

В качестве примера продолжим рассмотрение системы вентиляции. Абстрактные уравнения окрестностной системы S , без информации о разделении на подсистемы, имеют вид (см. также [5]):

$$\begin{cases} D_c = F_{cd}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\ T_c = F_{ct}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\ E_c^f = F_{cef}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, T_f, R) \\ E_c^t = F_{cet}(D_e, T_e, D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, V_f, D_f, N^d, N^t) \\ D_p = F_{pd}(D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, D_p, T_p, V_f, D_f, N^d, N^t) \quad (1) \\ T_p = F_{pt}(D_c, T_c, E_c^f, E_c^t, E_f, D_p, T_p, V_f, D_f, N^d, N^t) \\ D_f = F_{fd}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\ T_f = F_{ft}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\ E_f = F_{ff}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \end{cases}$$

Данные уравнения записаны с некоторыми изменениями по сравнению с [5], соответствующими окрестностной структуре на рис. 1.

В динамической версии переменные в левых частях нужно снабдить индексом $\tau+1$, а переменные в правых частях – индексом τ , где τ – дискретное время. Этим объясняется формальное дублирование переменных в левых и правых частях (например, присутствие D_c в правой части первого уравнения системы): в динамическом случае эти дубли относятся к разным моментам времени.

После расщепления мы получаем связанных по управлениям V_f и R системы:

$$\begin{cases} D_c = F_{cd}(D_e, D_c, E_c^f, E_f, V_f, D_f, R) \\ E_c^f = F_{cef}(D_e, D_c, E_c^f, E_f, V_f, D_f, R) \\ D_p = F_{pd}(D_c, E_c^f, D_p, V_f, N^d) \\ D_f = F_{fd}(D_p, T_p, V_f, E_f, D_f, T_f) \\ E_f = F_{ff}(D_p, V_f, E_f, D_f) \end{cases} \quad (2)$$

и

$$\begin{cases} T_c = F_{ct}(T_e, T_c, E_c^t, V_f, T_f, R) \\ E_c^t = F_{cet}(T_e, T_c, E_c^t, V_f, T_f, R) \\ T_p = F_{pt}(T_c, E_c^t, T_p, V_f, N^t) \\ T_f = F_{ft}(T_p, V_f, T_f) \end{cases} \quad (3)$$

Других общих переменных системы не имеют, поскольку все узлы в данном случае сепарабельны. В линейной реализации систем (2) и (3) содержится около тридцати коэффициентов, подлежащих дальнейшей параметрической идентификации. Напомним, что в [4-5] использование достаточно простых физических соображений позволило дополнительно сократить количество уравнений в системах (2) и (3) и конкретизировать (трилинейную) аналитическую модель, в которой количество идентифицируемых параметров уменьшилось до девяти.

В отличие от задачи параметрической идентификации, в которой условие слабой связанности вносит лишь количественные изменения, в задаче управления слабая связанность подсистем приводит к качественным изменениям. Мы обсудим эти изменения в случае поиска оптимального режима и в случае стабилизации системы вблизи некоторого номинального режима. Далее мы предполагаем, что у двойной системы $\{S_1, S_2\}$ сигнатуры $\{s_1, s_2, s_3; r_1, r_2, r_3\}$ подсистемы S_1 и S_2 слабосвязаны в следующем смысле:

$$\begin{aligned} &(s_3 \ll s_1) \& (s_3 \ll s_2) \& \{(r_3 \ll r_1) \& \\ &\& (r_3 \ll r_2) \& (s_3 + r_3 \neq 0) \end{aligned}$$

В общем виде задачу поиска оптимального (стационарного) режима системы S можно поставить следующим образом. Пусть X^1, X^2, U^1 и U^2 – локальные переменные состояний и управлений систем S_1 и S_2 и пусть X^3, U^3 – глобальные (общие) переменные состояний и управлений. Все обозначения здесь и далее векторные. Систему S можно записать в виде

$$\begin{cases} F_1(X^1, U^1, X^3, U^3) = 0 \\ F_2(X^2, U^2, X^3, U^3) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

В данном случае мы исключаем из рассмотрения переменные внешних входов, считая их константами. Критерий оптимальности в большинстве практически важных случаев аддитивен и может быть записан как

$$K_1(X^1, U^1, X^3, U^3) + K_2(X^2, U^2, X^3, U^3) \rightarrow \min \quad (5)$$

Поиск оптимального режима для S является задачей условной оптимизации:

$$\begin{cases} F_1(X^1, U^1, X^3, U^3) = 0 \\ F_2(X^2, U^2, X^3, U^3) = 0 \\ K_1(X^1, U^1, X^3, U^3) + K_2(X^2, U^2, X^3, U^3) \rightarrow \min \end{cases} \quad (6)$$

Для слабосвязанных систем S_1 и S_2 можно предложить следующий алгоритм приближенного решения (квазиоптимизации) задачи (6), который называем алгоритмом (2 + 1) - оптимизации. Этот алгоритм уменьшает размерность задачи (6) примерно в два раза. Сначала мы находим решения двух задач

$$\begin{cases} F_1(X^1, U^1, X^3, U^3) = 0 \\ K_1(X^1, U^1, X^3, U^3) \rightarrow \min \end{cases} \quad (7)$$

и

$$\begin{cases} F_2(X^2, U^2, X^3, U^3) = 0 \\ K_2(X^2, U^2, X^3, U^3) \rightarrow \min \end{cases} \quad (8)$$

размерностей $s_1 + r_1 + s_3 + r_3$ и $s_2 + r_2 + s_3 + r_3$ соответственно.

Пусть (X^1, U^1, X^3, U^3) и (X^2, U^2, X^3, U^3) – найденные значения переменных. Далее нужно найти решение (X^3, U^3) одной $(s_3 + r_3)$ -мерной задачи минимизации по (X^3, U^3) суммы квадратичных форм

$$\hat{K}_1(X^1, U^1, X^3, U^3) + \hat{K}_2(X^2, U^2, X^3, U^3) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где $\hat{K}_1(X^1, U^1, X^3, U^3)$ и $\hat{K}_2(X^2, U^2, X^3, U^3)$ – квадратичные тейлоровские аппроксимации функций $K_1(X^1, U^1, X^3, U^3)$ и $K_2(X^2, U^2, X^3, U^3)$ в точках соответственно (X^3, U^3) и (X^3, U^3) .

Приближенное решение последней задачи можно получить, решая одномерную задачу минимизации по t :

$$K_1(X^1, U^1, x(t), u(t)) + K_2(X^2, U^2, x(t), u(t)) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $x(t) = tX^3 + (1-t)X^2$ и $u(t) = tU^3 + (1-t)U^2$. Пусть t_* – найденное значение переменной t , тогда $(X^3, U^3) \approx (X^{3*}, U^{3*})$, где

$$X^{3*} = t_*X^3 + (1-t_*)X^2 \text{ и } U^{3*} = t_*U^3 + (1-t_*)U^2.$$

Равенство $(X^3, U^3) = (X^{3*}, U^{3*})$ будет иметь место в том случае, когда каждая из двух квадратичных форм является шаровой (все собственные числа равны). В качестве приближенного решения исходной задачи оптимизации теперь можно взять либо $(X^1, U^1, X^2, U^2, X^{3*}, U^{3*})$, либо более точное $(X^1, U^1, X^2, U^2, X^3, U^3)$.

Замечание.

Можно доказать, что в случае, когда критерий оптимальности

$$K = K_1(X^1, U^1, X^3, U^3) + K_2(X^2, U^2, X^3, U^3)$$

является суммой квадратичных форм, квази-решение $(X^1, U^1, X^2, U^2, X^3, U^3)$ становится точным. Если сужение каждой из этих квадратичных форм на пространство глобальных переменных является шаровой формой, то точным будет и квази-решение $(X^1, U^1, X^2, U^2, X^3, U^3)$.

Задача стабилизации вблизи номинального режима

Раскладывая функции F_1 и F_2 в окрестности номинального режима

$$(X_0^1, X_0^2, X_0^3, U_0^1, U_0^2, U_0^3)$$

в ряды Тейлора и ограничиваясь линейными частями, мы получаем систему двух матричных уравнений относительно приращений $(\Delta X^1, \Delta X^2, \Delta X^3, \Delta U^1, \Delta U^2, \Delta U^3)$:

$$\begin{cases} A_{11}\Delta X^1 + A_{13}\Delta X^3 + B_{11}\Delta U^1 + B_{13}\Delta U^3 = 0 \\ A_{22}\Delta X^2 + A_{23}\Delta X^3 + B_{22}\Delta U^1 + B_{23}\Delta U^3 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Для компенсации отклонений $\Delta X = (\Delta X^1, \Delta X^2, \Delta X^3)$ состояний системы S от номинальных с помощью корректирующих управлений $\Delta U = (\Delta U^1, \Delta U^2, \Delta U^3)$ нужно решить систему линейных уравнений

$$\begin{cases} B_{11}\Delta U^1 + B_{13}\Delta U^3 = -A_{11}\Delta X^1 - A_{13}\Delta X^3 = C_1 \\ B_{22}\Delta U^1 + B_{23}\Delta U^3 = -A_{22}\Delta X^2 - A_{23}\Delta X^3 = C_2 \end{cases} \quad (12)$$

Матрица системы (10) имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} \\ 0 & B_{22} & B_{23} \end{bmatrix}.$$

Пусть k_1 и k_2 – количество уравнений в системах S_1 и S_2 . При выполнении условий $r_1 + r_3 > k_1$ и $r_2 + r_3 > k_2$ система (10) в невырожденном случае имеет бесконечно много решений и, следовательно, искомое управляющее воздействие существует.

Нормальное (минимальное по норме) решение дается формулой $\Delta U_* = B^+[C_1, C_2]^T$. Условие минимальности нормы $\|\Delta U_*\|$ обычно не является критичным для задачи стабилизации, и решение ищется в некоторых технологических пределах, $\Delta U_* \in D = D_1 \times D_2 \times D_3$. Для систем S_1 и S_2 в случае, когда выполнено хотя бы одно из неравенств $r_1 > k_1$ или $r_2 > k_2$ (а условие слабой связанности по управлениям $\{(r_3 \ll r_1) \& (r_3 \ll r_2)\}$ делает вероятность этого достаточно большой), можно предложить следующий алгоритм поиска решения. Пусть для определенности $r_2 > k_2$.

Решая систему уравнений

$$B_{11}\Delta U^1 + B_{13}\Delta U^3 = C_1$$

относительно $(\Delta U^1, \Delta U^3)$ при условии $(\Delta U^1, \Delta U^3) \in D_1 \times D_3$, мы находим вектор $(\Delta U^1, \Delta U^3)$ и затем решаем систему уравнений

$$B_{22}\Delta U^2 = -B_{23}\Delta U^3 + C_2$$

относительно ΔU^2 при условии $\Delta U^2 \in D_2$.

В этом алгоритме найденное из первой системы приращение вектора глобальных управлений ΔU^3 порождает во второй системе дополнительное слагаемое в правой части. Можно еще сказать, что сначала мы используем приращение ΔU^3 вектора глобальных управлений для компенсации отклонений $(\Delta X^1, \Delta X^3)$ первой системы от номинального режима, а затем компенсируем действие этого

приращения на вторую систему, одновременно с компенсацией ее отклонений ($\Delta X^2, \Delta X^3$) от номинального режима. Таким образом, в этом алгоритме вектор глобальных переменных управления первой системы фактически становится дополнительным вектором состояний для второй системы.

Замечания.

1. В случае, когда выполнены оба неравенства $r_1 > k_1$ и $r_2 > k_2$, в задаче стабилизации достаточно использовать только локальные управления и потому две системы можно считать независимыми по управлениям.

2. При отсутствии ограничений на ΔU , то есть когда $D = R^N$, описанный алгоритм при выполнении указанных выше размерностных условий всегда дает решение.

Эксперимент

Разработанная окрестностная модель слабосвязанных систем производственной вентиляции была применена на цементном производстве ОАО «Липецк-цемент» для определения оптимальных параметров воздуха в системе вентиляции и кондиционирования.

Система пылеудаления присутствует на всех этапах производства, так как пыль выделяется при процессах дробления, измельчения извести и угля, при разгрузке печи, при последующей транспортировке и измельчении цемента, его отгрузке. Три основных источника выбросов пыли дымовой трубы – это печь, клинкерный холодильник и цементные мельницы. При производстве цемента возникает проблема превышения допустимой концентрации пыли в цехе и в окружающей среде, связанная с неоптимальной работой системы обеспыливающей вентиляции в цехе обжига клинкера.

Моделирование производилось для цеха, в котором находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера, а также пульт управления вращательной печью, на котором выполняются работы операторского типа.

Внутренние переменные систем (2) и (3), как состояния, так и управления, должны удовлетворять некоторым технологическим ограничениям. В нашем случае

$$\begin{aligned} T_c &\in [T_c^{\min}, T_c^{\max}], T_p \in [T_p^{\min}, T_p^{\max}], \\ D_c &\leq D_c^{\max}, D_p \leq D_p^{\max}, D_f \leq D_f^{\max}, \\ E_c^f &\leq E_c^{f \max}, E_c^t \leq E_c^{t \max}, E_f \leq E_f^{\max}. \end{aligned}$$

Некоторые из этих ограничений могут за-

висеть от внешних переменных. Например, ограничения на температуру и концентрацию пыли могут зависеть от влажности приточного воздуха, которая на данном этапе не учитывается.

Рассмотрим одну из слабосвязанных подсистем для терморегуляции. Простейшую модель терморегуляции можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{cases} E_c^t = \gamma_c^f |V_c(T_e - T_c) + RV_f(T_p - T_c)| \\ T_p = T_c + \gamma_p^t N^t - \gamma_p^f V_f. \end{cases}$$

Первое (кусочно-трилинейное) уравнение описывает расход энергии в узле «Cond» для терморегуляции смешанного подаваемого и рециркулируемого воздуха. Коэффициент γ_c , вообще говоря, может зависеть от режима нагрева / охлаждения. Второе (линейное) уравнение описывает тепловой баланс в узле «Plant».

В результате дальнейшей параметрической идентификации были получены следующие системы.

1. $T_e < T_c$ и $T_c < T_p$

$$\begin{cases} E_c^t = 2.81V_f |T_e - T_c - RT_e + RT_p| \\ T_p = T_c + 1.23N^t - 0.9V_f. \end{cases}$$

2. $T_e > T_c$ и $T_c < T_p$

$$\begin{cases} E_c^t = 0.88V_f |T_e - T_c - RT_e + RT_p| \\ T_p = T_c + 1.4N^t - 0.53V_f. \end{cases}$$

3. $T_e = T_c$

$$\begin{cases} E_c^t = 0.73RV_f(T_p - T_c) \\ T_p = T_c + 0.95N^t - 0.53V_f. \end{cases}$$

Рассмотрим вторую из слабосвязанных подсистем. Простейшая модель фильтрации (приток + фильтрация + экстракция + фильтрация) может быть описана следующими уравнениями:

$$\begin{cases} E_c^f = \beta_c^f V_f + \beta_c^d (V_c S(D_e - D_c) + RV_f S(D_f - D_c)) \\ D_p = \hat{D}_c + \beta_p^d N^d - \beta_p^f V_f \\ E_f = \beta_f^d V_f (D_p - D_f) + \beta_f^f V_f \end{cases},$$

где $\hat{D}_c = (1 - R) \min(D_c, D_e) + R \min(D_c, D_f)$, $S(x) = \max(0, x)$.

Первое (кусочно-трилинейное) уравнение описывает расход энергии в узле «Cond» для притока воздуха и фильтрации смешанного с рециркулируемым воздуха. Второе (кусочно-линейное) уравнение описывает баланс концентрации пыли в узле «Plant». Третье (кусочно-билинейное) уравнение описывает расход

энергии в «Filt» для вытяжки и фильтрации воздуха. Переменная \hat{D}_c означает концентрацию пыли в смешанном подаваемом наружном и рециркулируемом воздухе после фильтрации до необходимого уровня \hat{D}_c .

В зависимости от загрязненности наружного воздуха и рециркуляции были получены следующие модели.

$$1. D_e \geq D_c \text{ и } D_f \geq D_c$$

$$\begin{cases} E_c^f = 0.65V_f + 0.93(V_c(D_e - D_c) + RV_f(D_f - D_c)) \\ D_p = \hat{D}_c \\ E_f = 0.68V_f(D_p - D_f) + 0.72V_f. \end{cases}$$

$$2. D_e \geq D_c \text{ и } D_f \leq D_c$$

$$\begin{cases} E_c^f = 0.84V_f + 0.75(V_c(D_e - D_c)) \\ D_p = (1 - R)D_c + RD_f + 0.6N_d - 0.43V_f \\ E_f = 0.68V_f(D_p - D_f) + 0.72V_f. \end{cases}$$

Предлагаемая система автоматического управления микроклиматом осуществляет свою работу с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК). Параметры воздушной среды снаружи и внутри помещения измеряются с помощью датчиков, поступают в качестве входных сигналов в математическую модель, реализованную на языке программирования ПЛК, далее производится анализ данных, реализуется оптимальный алгоритм автоматического управления [3]

Окрестностное моделирование позволяет оптимизировать работу систем вентиляции, направленную на уменьшение выбросов вредных веществ. Создание энергоэффективной автоматической системы производственной вентиляции, связанной с технологическим процессом, позволяет достигать сбережения энерго- и денежных ресурсов, обеспечивает высокую производительность работы вращательных цементных печей.

Заключение

В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Рассмотрен класс окрестностных моделей слабосвязанных систем, позволяющих адекватно моделировать сложные дискретные системы, обеспечивающих необходимую гибкость при описании структуры и характера связей переменных сложного объекта.

2. Разработаны методы параметрической и структурной идентификации окрестностной модели системы вентиляции и кондиционирования воздуха, отличающейся сложной структурой с иерархическими связями с системой обжига клинкера, совокупно учитывающего специфику представления сложной системы в условиях параметрической связи моделей, специфику данных.

3. Определено понятие слабой связанности двух окрестностных систем над одной окрестностной структурой. Такие системы возникают в задачах моделирования параллельных производственных процессов с достаточно малым количеством общих параметров. Для поиска оптимальных режимов таких систем предложен алгоритм $(2 + 1)$ - квазиоптимизации, использующий условие слабой связанности. Полученные результаты могут быть перенесены на случай произвольного количества слабосвязанных окрестностных систем.

Литература

1. Блюмин С.Л., Шмырин А.М. Окрестностные системы. Липецк: ЛЭГИ, 2005. 131 с.
2. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация // Таврический вестник информатики и математики. 2017. Т. 37. № 4. С. 87-95.
3. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М., Канюгина А.С. Квазистатические окрестностные системы // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4. С. 137-142.
4. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М., Семина В.В. Агрегирование окрестностных систем в модели вентиляции цеха цементного производства // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2017. Т. 22. № 6. С. 1346-1354.
5. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Semina V.V. Structural Identification of Neighborhood Model for Ventilation-Filtration System // International Journal of Applied Engineering Research, 2017. Vol. 12, Number 21. Pp. 11114-11117.
6. Ананьев, В.А. Системы вентиляции и кондиционирования. М.: Евроклимат, 2001. 576 с.

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Сёмина Валерия Владимировна – старший преподаватель кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398000, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: valvlasem@mail.ru

IDENTIFICATION OF WEAKLY CONNECTED NEIGHBORHOOD SYSTEMS

V.V. Semina

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the task of identifying system models is to determine their structure and parameters from the results of observations on the input and output variables of a real system and is solved by optimization methods. With regard to complex systems, the problem of identification becomes more complex: a large number of system components affect the resource-intensive computational procedures and the increased requirements for the amount of RAM for storing data structures. In this connection, the development and analysis on the basis of neighborhood models of new classes of models describing complex connected systems, allowing one to optimize the management of complex systems, increase the efficiency of reliability and quality of technical systems is relevant. The article discusses the problem of neighborhood modeling of parallel and loosely coupled production processes. The concept of weakly coupled neighborhood systems is introduced, an algorithm for separating the neighborhood structure of a binary system is given, and the problems of identification and control of such systems are also considered. For a binary system consisting of two weakly coupled systems, an algorithm is proposed for finding a quasi-optimal mode and, under additional dimensional constraints, an algorithm for stabilization near a given nominal mode. As an example, we consider the local ventilation and air conditioning system in the production area of the clinker burning plant. In the production of cement there is a problem of exceeding the permissible concentration of dust and air temperature in the workshop, as well as the concentration of dust in the environment, associated with the suboptimal operation of the system of dust removal ventilation in the clinker burning shop. The use of weakly coupled neighborhood systems allows one to reduce the number of system model coefficients to be parametric identification, as well as to find the optimal control mode of the ventilation system and air filtration

Key words: neighborhood structure, neighborhood system, weak connections, ventilation systems, cement production, identification of systems

Acknowledgment: The work is carried out with the financial support of the Russian Fund for Basic Research (project 16-07-00854 a)

References

1. Blumin S.L., Shmyrin A.M. "Neighborhood systems" ("Okrestnostnye sistemy"), Lipetsk, LEGI, 2005, 132 p.
2. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. "Neighborhood structures and metastructural identification", *Taurida Journal of Computer Science Theory and Mathematics (Tavrisheskiy vestnik informatiki i matematiki)*, 2017, no. 4, pp. 87-95.
3. Shmyrin A.M., Mishachyev N.M., Kanyugina A.S. "Quasistatic neighborhood systems", *Modern High Technologies (Sovremennye naukoymkie tekhnologii)*, 2018, no. 4, pp.137-142.
4. Shmyrin A.M., Mishachyev N.M., Semina V.V. "Aggregation of neighborhood systems in the ventilation model of the cement production shop", *Tambov University Bulletin. Series: Natural and Technical Sciences (Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki)*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 1346-1354.
5. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Semina V.V. "Structural identification of neighborhood model for ventilation-filtration system", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 21, pp. 11114-11117.
6. Anan'ev B.A. "Ventilation and air-conditioning systems", Moscow, Evroklimat, 2001, 567 p.

Submitted 28.02.2019; revised 15.04.2019

Information about the authors

Valeria V. Syemina, Assistant Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya st., Lipetsk 398000, Russia), e-mail: valvlasem@mail.ru

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОКЛАВНОЙ УСТАНОВКИ

В.Н. Крысанов, Ю.В. Нефедов, А.В. Романов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются вопросы контроля электромагнитной совместимости вновь вводимого в эксплуатацию электротехнического силового оборудования при модернизации участка автоклавной установки по производству полимерно-композитного материала. Станция управления представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы технологического оборудования автоклавной установки, а также сбор информации с технологических датчиков. Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок или помехоустойчивость оборудования недостаточна. В связи с этим нарушением увеличивается число случаев срабатывания ложных команд в автоматических системах управления, что может привести к выходу из строя электротехнических устройств, а также к большим производственным потерям. Вследствие чего контроль параметров электромагнитной совместимости должен быть обязательной стадией при разработке и внедрении новых технических средств (ТС) в производство. Для сокращения сроков внедрения нового оборудования предлагаются методика проведения имитационного моделирования на разработанной математической модели частотно регулируемого электропривода, натурные испытания силового оборудования в основных режимах работы с последующим анализом полученных результатов на предмет контроля электромагнитной совместимости. Полученные результаты анализа позволяют сформировать необходимые рекомендации по комплектации вновь вводимого в эксплуатацию оборудования

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, высшие гармоники, преобразователь частоты, автоклавная установка, имитационное моделирование, математическая модель

Введение

В настоящее время значительно возросло внимание эксплуатационных служб промышленных предприятий к вопросам контроля параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС).

Нарушение требований ЭМС может привести к ложному срабатыванию релейных компонентов, возникновению сбоев в работе систем управления промышленных объектов и системы электроснабжения. Особенно актуальной эта проблема стала при переходе на цифровые системы управления и контроля.¹ Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок или помехоустойчивость оборудования недостаточна. В связи с этим нарушением увеличивается число случаев срабатывания ложных команд в автоматических системах управления, что может привести к выходу из строя электротехнических устройств, а также к большим производственным потерям.

Поэтому необходимо неукоснительное выполнение основных руководящих документов в этой области [1,2], особенно в промышленности, где самым распространенным источником электромагнитных помех являются полупроводниковые преобразователи, в ос-

новном система АД-ПЧ (асинхронный двигатель - преобразователь частоты). Преобразователи частоты применяются для регулирования скорости вращения вала АД. В определенных условиях использования эксплуатации АД, где кабельная линия имеет большое расстояние, возникают паразитные емкости между самими проводниками и землей. Из-за взаимных связей паразитных емкостей и индуктивных сопротивлений проводников возникает колебательный контур. Применение широтно-импульсной модуляции для формирования синусоидального напряжения на выходе ПЧ порождает быстропротекающие переходные процессы в колебательном контуре кабеля и вызывает в проводниках протекание высокочастотных токов, что негативно влияет на систему. Вследствие чего контроль параметров электромагнитной совместимости должен быть обязательной стадией при разработке и внедрении новых ТС в производство.

Постановка задачи

Вышеописанная задача контроля параметров электромагнитной совместимости возникает и при модернизации технологического оборудования производства изделий из полимерно-композитного материала (ПКМ). Формирование изделий и изготовление производится в автоклавной установке. Линия произ-

водит такие компоненты, как лопасти для самолета и вертолета, фюзеляж ракет, закрылки, элементы, где необходимо высокая прочность и наименьшая масса.

Ее станция управления представляет собой комплекс аппаратных и программных

средства, обеспечивающих формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы технологического оборудования автоклавной установки, а также сбор информации с технологических датчиков (рис. 1).

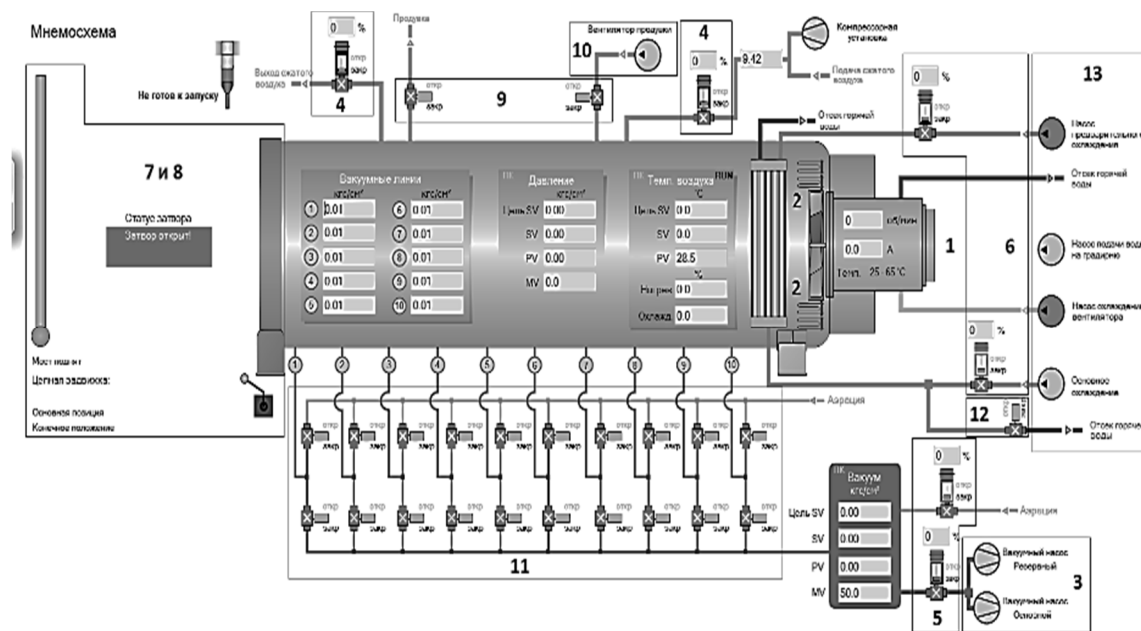


Рис. 1. Технологическая схема исполнительных механизмов автоклавной установки

В состав станции управления автоклавной установки входят:

- вводная секция станции управления;
- секция тиристорного регулирования нагрева;
- секция управления вентилятором;
- секция контроллерного и ручного управления;
- секция промышленного персонального компьютера с сенсорным экраном;
- секция управления пневматическим оборудованием;
- выносной пульт управления крышкой автоклава.

В данной статье рассмотрен один из наиболее важных участков технологического процесса - секция управления вентилятором автоклавной установки. Она предназначена для смешивания рабочей среды внутри автоклава с целью создания равномерного температурного поля (от равномерного смешивания зависит качество детали).

До модернизации данного участка регулирование скорости асинхронного двигателя (АД) вентилятора осуществлялось с помощью резисторов. Внедренная система «ПЧ-АД» должна повысить энергоэффективность АД,

обеспечить его защиту от перегрузки, а также осуществить контроль работы электропривода.

Но при этом необходимо оценить ее влияние на СУ линии и систему электроснабжения в плане ЭМС.

Решение сформулированной задачи

Для сокращения этапа ввода модернизированного оборудования предполагается методика контроля параметров ЭМС, состоящей из 3-х этапов:

- а) проведение имитационного моделирования на разработанной математической модели частотно регулируемого электропривода во всех режимах работы
- б) натурные испытания силового оборудования в основных режимах работы
- в) анализ полученных результатов исследований параметров электромагнитной совместимости и формирование рекомендаций по выбору оборудования.

Была разработана математическая модель частотно регулируемого привода в программной среде MatLab Simulink (рис. 2). С помощью программного блока Fast fourier transform были получены данные спектрального состава тока и напряжения питания электропривода

[3]. Имитационное моделирование во всех режимах работы электропривода (холостого хода и под нагрузкой) было реализовано при типовом законе регулирования $U/f=\text{const}$ (рис. 3-6).

Натурные исследования произведены в двух режимах работы ЭП: холостого хода и под нагрузкой, с различной несущей частотой ШИМ в диапазоне от 5кГц до 15кГц (рис. 7, 8).

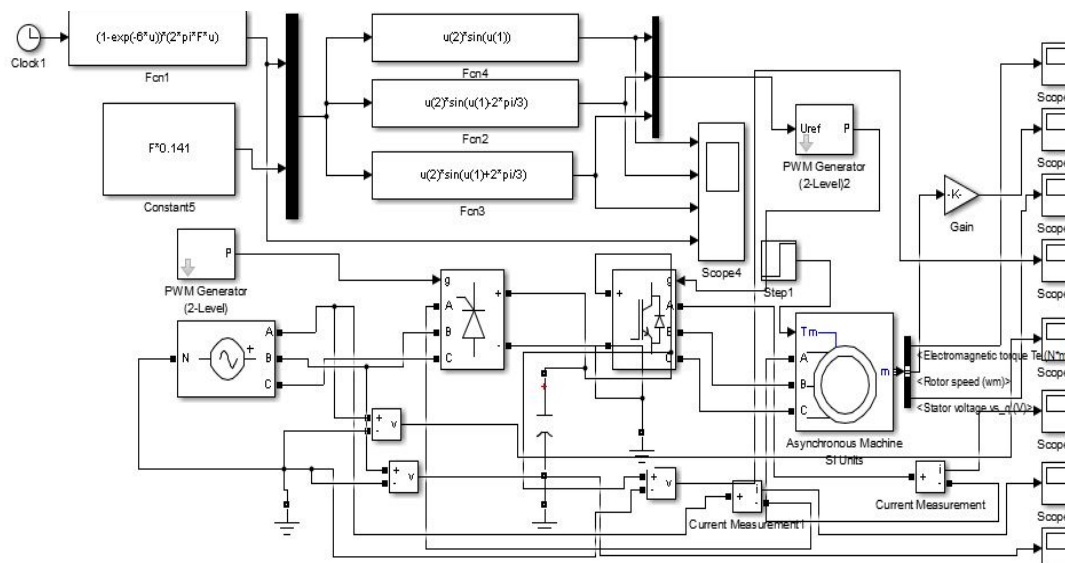


Рис. 2. Математическая модель регулируемого привода в программной среде MatLab Simulink

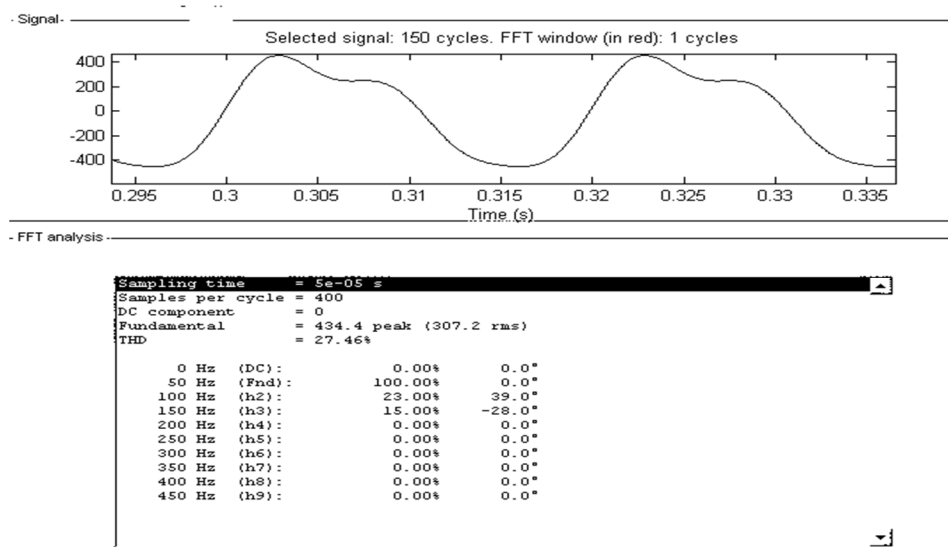


Рис. 3. Форма напряжения и параметры основной и высших гармоник

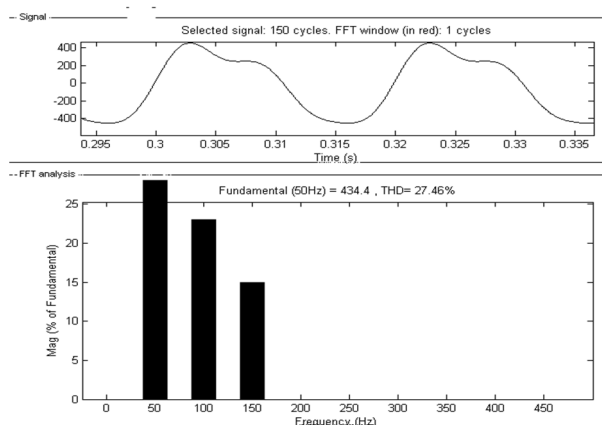


Рис. 4. Спектральный состав гармоник напряжения

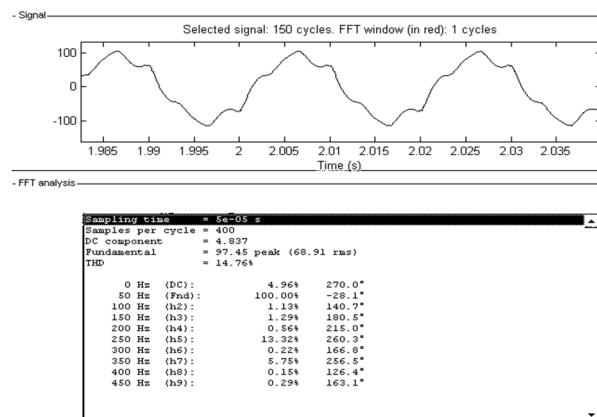


Рис. 5. Форма тока и параметры основной и высших гармоник

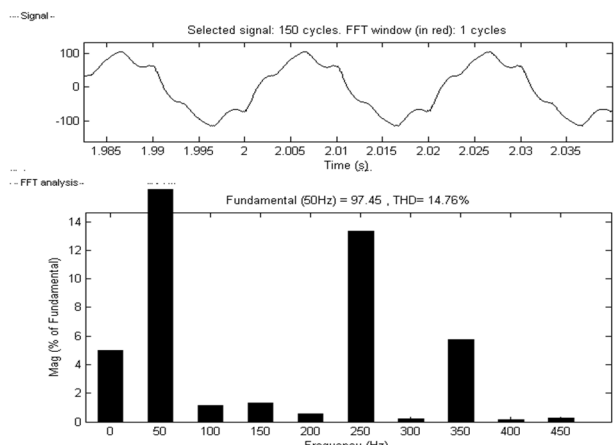


Рис. 6. Спектральный состав гармоник тока сети

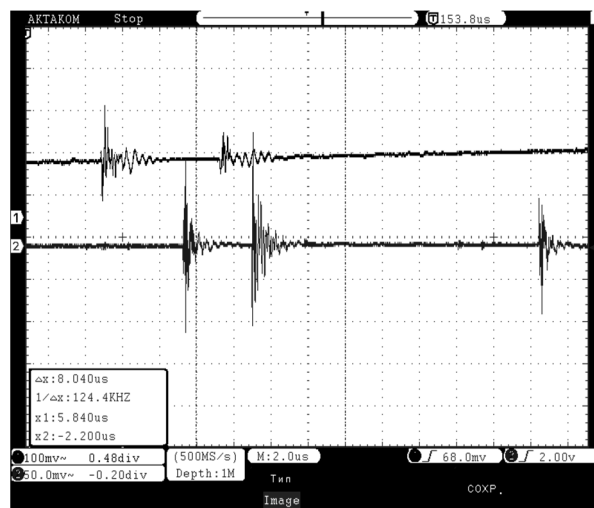


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения, полученные при натуральных испытаниях режима X.X. электропривода (продолжение)

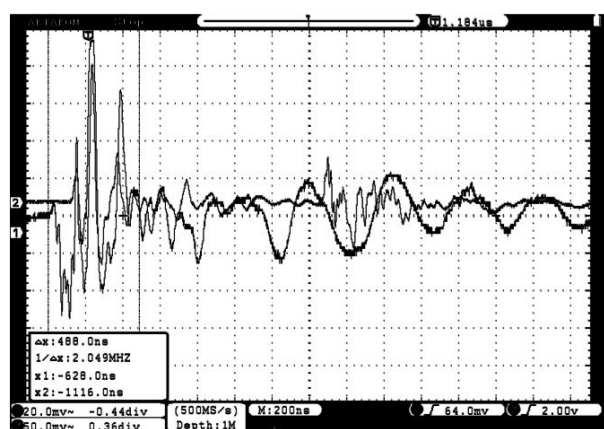


Рис. 7. Осциллограммы тока и напряжения, полученные при натуральных испытаниях электропривода под нагрузкой

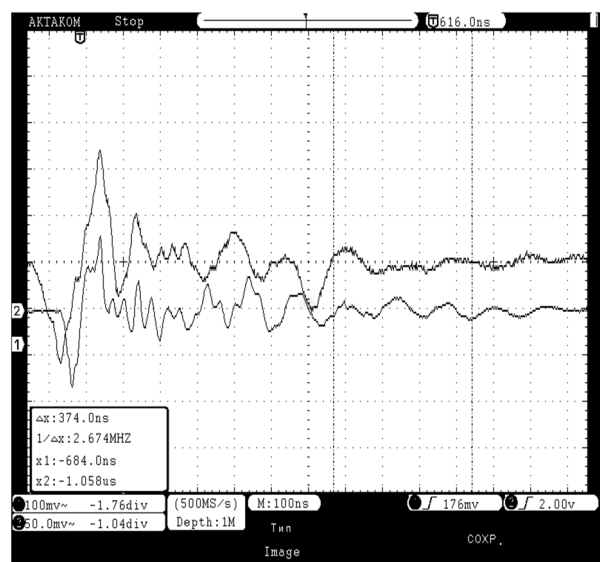


Рис. 8. Осциллограммы тока и напряжения, полученные при натуральных испытаниях режима X.X. электропривода

Из анализа полученных результатов спектрального состава напряжений и токов электропривода, полученных при проведении имитационного моделирования на разработанной математической модели и натуральных испытаниях, можно увидеть, что возникающие высшие гармонические в переходном процессе порождают акустические шумы двигателя и перенапряжения. Зафиксировано среднее превышение нормативных значений высших гармонических напряжений (до 9-й включительно) в 1,5 раза от установленных ГОСТом. Коэффициент нелинейных искажений напряжения достигает 27,46%, наибольшие значения получены у гармоник порядка n-2 (23%), n-3 (15%).

Выводы

1. Исследования вновь вводимого в установку автоклава частотно регулируемого электропривода вентилятора показывают наличие недопустимых параметров ЭМС, влияющих на сеть электроснабжения и станцию управления.
2. Во избежание произвольного срабатывания и выхода из строя аппаратной части станции управления автоклава необходимо предусмотреть установку фильтрокомпенсирующих устройств.
3. Для подавления помех, вызванных переходными процессами в длинных кабелях электродвигателя, необходимо применить дополнительные дроссели.

Литература

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств».

2. ГОСТ Р 50397-2011 «Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения».

3. Нефёдов Ю.В., Козлов А.Р. Влияние преобразователей частоты в электроприводе на форму напряжения в электрической сети // Труды международной научно-технической конференции НТ-2017. Воронеж, 2017. Т. 2. С. 63-66.

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 22.03.2019

Информация об авторах

Крысанов Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sovteh2000@mail.ru, тел. 8920-228-56-06, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

Нефедов Юрий Васильевич – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nefedowjuriij@yandex.ru, тел. 8906-673-44-40

Романов Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: andr-romanov@yandex.ru

EMC PARAMETERS CONTROL OF MODERNIZED EQUIPMENT OF AUTOCLAVE INSTALLATION

V.N. Krysanov, Yu.V. Nefedov, A.V. Romanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the issues of electromagnetic compatibility control of newly commissioned electrical power equipment during the modernization of a section of an autoclave unit for the production of polymer-composite material are considered. The control station is a set of hardware and software tools that provide the formation of control actions on the actuators of the process equipment of the autoclave unit, as well as the collection of information from process sensors. Electromagnetic compatibility is impaired if the level of interference is too high or the immunity of the equipment is insufficient. In connection with this violation, the number of cases of triggering false commands in automatic control systems is increasing, which can lead to failure of electrical devices, as well as to large production losses. As a result, the control of the parameters of electromagnetic compatibility must be a mandatory stage in the development and implementation of new technical means (TS) in production. To reduce the time of introduction of new equipment, a technique is proposed for carrying out simulation modeling on a developed mathematical model of a frequency-controlled electric drive, full-scale tests of power equipment in basic operating modes, followed by analysis of the results obtained for electromagnetic compatibility control. The results of the analysis allow one to form the necessary recommendations for the equipment of the newly commissioned equipment

Key words: electromagnetic compatibility, higher harmonic components, frequency converter, autoclave installation, simulation modeling, mathematical model

References

1. "Electromagnetic compatibility of technical equipment", Technical regulations of the Customs Union ТР ТС 020/2011
2. GOST R 50397-2011 "Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Terms and Definitions"
3. Nefedov Yu.V., Kozlov A.R. "Influence of frequency converters in the electric drive on the voltage form in the electrical network", *Proc. of the International Scientific and Technical Conf. NT-2017 (Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii NT-2017)*, Voronezh, 2017, vol. 2, pp. 63-66.

Submitted 28.02.2019; revised 23.03.2019

Information about the authors

Valeriy N. Krysanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sovteh2000@mail.ru, tel. 8920-228-56-06

Yuriy V. Nefedov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nefedowjuriij@yandex.ru

Andrey V. Romanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: andr-romanov@yandex.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ
СМАЗОК ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ****Д.В. Арапов****Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: описана существенно нелинейная аддитивная математическая зависимость основных характеристик пластичной смазки на основе кальциевых мыл от технологических параметров процесса ее получения. Наиболее важными параметрами процесса являются: содержание кислорода в реакторе, время нагрева реакционной смеси до требуемой температуры, температура обработки смеси, время выдерживания при температуре обработки, скорость охлаждения и масса введенной затравки. Моделировались следующие свойства смазки: 1) пенетрация, 2) коллоидная стабильность, 3) предел прочности при 50 °С, 4) вязкость при 0 °С и скорости сдвига 10 с⁻¹, 5) вязкость при 0 °С и скорости сдвига 100 с⁻¹. Ввиду недостаточной изученности процесса для разработки математических зависимостей использовали регрессионный анализ. От опубликованных регрессий модель отличается наличием слагаемых в виде квадратов значений технологических параметров и слагаемого в виде их произведения, а также свободным коэффициентом. Ошибка модели составляет соответственно по свойствам: 1) ±1,15 % отн., 2) ±1,18 % отн., 3) ±4,32 % отн., 4) ±3,0 % отн., 5) ±2,46 % отн. Модели – аналоги имеют погрешности 20 – 30 % отн. и более, хотя и удовлетворяют критерию Фишера. Оперативный анализ качества полученной смазки реализуется посредством математической зависимости свойств смазки от пенетрации, как наиболее достоверной и доступной для измерения характеристики качества. Относительная ошибка определения характеристик смазки в зависимости от пенетрации составляет не более ±3,5 %. Разработан критерий, выбраны ограничения и сформулирована задача оптимизации процесса изготовления смазки на основе кальциевых мыл. Задача решена посредством генетического алгоритма. Результат решения – информация об оптимальных значениях технологических параметров, которые позволяют получить смазку с наибольшими значениями пенетрации и предела прочности и наименьшими значениями коллоидной стабильности и вязкости. Разработанная на языке С# программа может быть использована для оптимизации промышленного процесса получения пластичной смазки на основе кальциевых мыл

Ключевые слова: мыльная смазка, математическая модель, оптимизация процесса получения

Введение

Технологический процесс (ТП) изготовления пластичных смазок относится к малотоннажным нефтехимическим производствам и характеризуется высокой энергоемкостью, широким ассортиментом выпускаемой продукции и многовариантностью протекающих технологических процессов [1, 2]. Свойства получаемых смазок определяются образующимися при их производстве структурированными системами, условия структурообразования которых многофакторны, а сами системы отличаются высокой чувствительностью к небольшим изменениям, возникающим практически на любой стадии процесса их изготовления [2]. В этой связи, технология производства структурированных смазочных материалов должна обеспечивать оптимальный состав и структуру дисперсной системы, её устойчивость, высокие вязкостные и механические характеристики [3].

Пластичные смазки на основе кальциевых мыл марки «Униол» способны работать в широком температурном диапазоне. Они исполь-

зуются в агрегатах, работающих в тяжелых условиях в нефтяной, газовой, горнодобывающей, металлургической и других отраслях промышленности. Загущающей основой смазки является адсорбционный комплекс, состоящий из кальциевого мыла жирных кислот (ЖК) углеводородов C₁₀ – C₁₆, C₁₇ – C₂₀ и кальциевой соли уксусной кислоты.

Поэтому проблема моделирования и оптимизации процесса изготовления пластичных смазок марки «Униол» актуальна, её внедрение в промышленность позволит существенно повысить качество вырабатываемых смазок, стабильность их эксплуатационных свойств, снизить количество бракованной продукции.

Постановка задачи

ТП изготовления кальциевой смазки «Униол» заключается в нагреве сырьевых компонентов до требуемой температуры, их дозировании в реакционный блок в заданных соотношениях, в получении в реакционном блоке загущающей основы смазки и ее температурной и механической обработке в аппаратах термического и механического воздействия

(ТМВ), в охлаждении полученного полупродукта, достижении его однородности методом активного перемешивания (гомогенизации), в удалении растворенных газов, созревании и упаковке смазки [2,4,5]. Важнейшим этапом ТП, определяющим качество образующегося адсорбционного мыльного комплекса, является этап ТМВ. Формирование структурированного комплекса осуществляется за счет встраивания молекул ацетата кальция в кристаллическую решетку мыла. Этот процесс происходит от момента удаления воды из системы до достижения температуры термической обработки [2]. В [6] установлено, что только в начальный промежуток времени, пока образующийся комплекс имеет коагуляционное строение, возможно эффективное управление процессом образования структуры коллоидной системы.

Путем системного анализа производства пластичных смазок, подтвержденным экспериментами многих исследователей [1,2,4-15], выявлено, что самыми влиятельными на процесс структурообразования параметрами служат: 1) количество кислорода в не занятом пространстве реактора, $10^{-3} \cdot \text{м}^3 / \text{ч}$ (X_1); 2) время нагревания реакционной смеси до требуемой температуры, ч (X_2); 3) максимальное значение температуры нагревания смеси, $^{\circ}\text{C}$ (X_3); 4) время воздействия максимальной температуры на реагирующую смесь, ч (X_4); 5) скорость охлаждения полупродукта до требуемой температуры, $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ (X_5); 6) количество затравки, внесенной в реактор, % масс. (X_6). Затравкой служит небольшая часть готовой смазки, рециклом подаваемая в реактор.

Критерием оптимальности ТП изготовления пластичной смазки является совокупность характеристик полученного продукта [16,17], которые должны соответствовать ГОСТ или ТУ. В этом качестве выступают характеристики, которые без потери информативности измеряются достаточно просто. Этим требованиям удовлетворяют следующие свойства:

- пенетрация при 25°C , $10^{-4} \cdot \text{м}$ (Z_1), интервал значений по ГОСТ или ТУ $280 \leq Z_1 \leq 380$;

- коллоидная стабильность, % (Z_2), интервал значений по ГОСТ или ТУ $2,0 \leq Z_2 \leq 12,0$;

- предел прочности при температуре 50°C , Па (Z_3), диапазон изменения по ГОСТ или ТУ $250 \leq Z_3 \leq 600$;

- предел прочности при температуре 80°C , Па (Z_4'), диапазон изменения по ГОСТ или ТУ $100 \leq Z_4' \leq 400$;

- вязкость эффективная при 0°C и среднем градиенте скорости деформации 10 с^{-1} , $\text{Па} \cdot \text{с}$ (Z_4''), диапазон изменения по ГОСТ или ТУ $30 \leq Z_4'' \leq 160$;

- вязкость эффективная при 0°C и среднем градиенте скорости деформации 100 с^{-1} , $\text{Па} \cdot \text{с}$ (Z_5), диапазон изменения по ГОСТ или ТУ $30 \leq Z_5 \leq 160$.

Экспериментальная часть

В отечественной и зарубежной литературе [1,2,4-15,18-21] опубликованы многочисленные экспериментальные данные по зависимости свойств пластичных смазок от значений технологических параметров. В их число входят смазки на основе кальциевых мыл. Но результатом регрессионного анализа этих опытов чаще всего являются линейные регрессии или для однофакторных моделей квадратные или кубические уравнения [18-21]. Для нахождения зависимостей качественных показателей кальциевой смазки типа «Униол» и литиевой смазки от параметров технологического процесса в [6,14,15,18] многофакторное математическое описание представлено в виде системы уравнений неполного квадратичного вида. Расчеты свойств по опубликованным зависимостям, адекватность которых проверена авторами с помощью критерия Фишера, имеют, как правило, большие расхождения с экспериментальными данными. Относительные ошибки моделирования характеристик достигают 20-30 % и даже более по сравнению со значениями опытов. С целью существенного уменьшения погрешности описания свойств кальциевой смазки марок «Униол» с помощью регрессионных уравнений была реализована идентификация структуры моделей и найдены регрессионные коэффициенты [22] на базе известных [4-6, 8-11,13-15, 20] опытов. Количество использованных опытов составило 31. Для опытов экспериментаторами был предварительно изготовлен обезвоженный полупродукт в необходимом количестве, что позволило уменьшить погрешности в рецептуре, порядке загрузки исходных компонентов, а также в стадиях нейтрализации и обезвоживания смазки. Исходная смесь имела следующий состав (% масс.):

-масло нефтяное МС-20	77,45 %;
-СЖК фракции $C_{10} - C_{16}$	9,10 %;
-СЖК фракции $C_{17} - C_{20}$	3,35 %;
-уксусная кислота	4,55 %;
-щелочь $Ca(OH)_2$ (в виде 30% водного раствора)	5,55 %.

Осушенный полупродукт смазки имел такие характеристики:

-вязкость при 20 °С и скорости сдвига 10 c^{-1}	5,90 Па·с ;
-вязкость при 20 °С и скорости сдвига 100 c^{-1}	4,55 Па·с ;
-вязкость при 50 °С и скорости сдвига 10 c^{-1}	1,34 Па·с ;
-вязкость при 50 °С и скорости сдвига 100 c^{-1}	0,81 Па·с ;
-концентрация свободной щелочи $NaOH$	0,1 %

$NaOH$.

Экспериментальные данные сняты путем проведения на пилотной установке пассивного эксперимента с элементами активного вмешательства, которое заключалось в том, что для включения граничных значений или уточнения воздействия в отдельной области исследований проводился активный эксперимент с шаговым изменением всех фиксируемых параметров одновременно.

Моделирование свойств смазки

Полученные оценки зависимости свойств смазки от параметров технологического режима имеют вид:

$$\begin{aligned}
 Z_i = & a_{i1} + a_{i2} \cdot X_1 + a_{i3} \cdot X_2 + a_{i4} \cdot X_3 + \\
 & a_{i5} \cdot X_4 + a_{i6} \cdot X_5 + a_{i7} \cdot X_6 + a_{i8} \cdot X_1 \cdot X_2 + \\
 & + a_{i9} \cdot X_1 \cdot X_3 + a_{i10} \cdot X_1 \cdot X_4 + a_{i11} \cdot X_1 \cdot X_5 + \\
 & + a_{i12} \cdot X_1 \cdot X_6 + a_{i13} \cdot X_2 \cdot X_3 + a_{i14} \cdot X_2 \cdot X_4 + \\
 & + a_{i15} \cdot X_2 \cdot X_5 + a_{i16} \cdot X_2 \cdot X_6 + a_{i17} \cdot X_3 \cdot X_4 + \\
 & + a_{i18} \cdot X_3 \cdot X_6 + a_{i19} \cdot X_4 \cdot X_5 + a_{i20} \cdot X_4 \cdot X_6 + \\
 & + a_{i21} \cdot (X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6) + \\
 & + a_{i22} \cdot (X_5 / X_3)^2 + a_{i23} \cdot X_5 \cdot X_6 + \\
 & + a_{i24} \cdot X_1^2 + a_{i25} \cdot X_2^2 + a_{i26} \cdot X_4^2 + a_{i27} \cdot X_6^2 + \\
 & + a_{i28} \cdot X_3 / X_2^2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где a_{ij} – регрессионные параметры моделей; i, j – соответственно номер моделируемой характеристики и регрессионного параметра. Ошибка модели (1) равна для: пенетрации $\pm 1,15$ % отн., коллоидной стабильности $\pm 1,18$ %

отн., предела прочности при 50 °С $\pm 4,32$ % отн., вязкости при 0 °С и скорости сдвига $10 \text{ c}^{-1} \pm 3,0$ % отн., вязкости при 0 °С и скорости сдвига $100 \text{ c}^{-1} \pm 2,46$ % отн.

В оценку (1) по сравнению с опубликованными регрессиями добавлены слагаемые с первым коэффициентом и с коэффициентами $a_{i21} - a_{i28}$. Хотя эта модернизация усложнила модель, но в результате ошибка моделирования свойств смазки уменьшилась на порядок.

Важная роль в производстве пластичных смазок отводится быстрому и простому анализу основных качественных характеристик изготавливаемой смазки. В этой связи большой интерес представляет определение математической зависимости характеристик смазки от одного ключевого свойства, измеряемого достаточно оперативно и с небольшой погрешностью. Этим свойством может служить пенетрация, так как она определяется простым вдавливанием металлического заостренного стержня в пробу смазки и имеет минимальную погрешность оценки, равную $\pm 1,15$ % отн. Согласно исследованиям [5,6,16,17], эта характеристика обладает достаточной информативностью для расчета остальных свойств. Понижение значения пенетрации продукта в большинстве случаев характеризует повышение загущающих свойств мыла, что позволяет при определенных условиях улучшить экономическую эффективность процесса за счет введения дополнительного количества дисперсионной среды. Зависимость свойств смазки от пенетрации определена на основе экспериментальных данных, снятых на реальном производстве и на пилотном реакторе [5,6,8-12,14-16]. Разработанная математическая зависимость i – го свойства от пенетрации имеет следующий вид:

$$Z_i = \alpha_{1i} + \alpha_{2i} \cdot Z_1 + \alpha_{3i} \cdot Z_1^{\alpha_{4i}} + \alpha_{5i} \times \exp(-\alpha_{6i} \cdot Z_1) \cdot Z_1^{\alpha_{7i}} + \alpha_{8i} \exp(-\alpha_{9i} Z_i) \cdot Z_1^{\alpha_{10i}}, \tag{2}$$

где $\alpha_{1i} - \alpha_{10i}$ – параметры регрессии (2); $Z_i, i = \overline{2,5}$ – значение i -й характеристики смазки.

Конкретные выражения для рассчитываемых характеристик описываются формулами (3)-(6):

$$\begin{aligned}
 Z_2 = & 0,31736072 \cdot 10^2 + 5,0878119 \cdot \Delta Z_1 - \\
 & - 0,10483383 \cdot 10^4 / (\Delta Z_1)^{10,878224} - \\
 & - 0,12705278 \cdot 10^2 \cdot \exp(-0,29072908 \cdot \Delta Z_1) \times \\
 & \times (\Delta Z_1)^{1,6675532} - 0,26812218 \cdot 10^3 \times \\
 & \times \exp(-3,5400671 \cdot \Delta Z_1) \cdot (\Delta Z_1)^{6,2768385};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$Z_3 = 0,1161161 \cdot 10^2 - 6,4203042 \cdot \Delta Z_1 + 0,21882685 \cdot 10^2 \cdot (\Delta Z_1)^{0,21902865} + 0,34978554 \cdot 10^3 \times \exp(-1,5791199 \cdot \Delta Z_1) \times (\Delta Z_1)^{2,7691376} - 0,29853237 \cdot 10^3 \times \exp(-1,165426 \cdot \Delta Z_1) \cdot (\Delta Z_1)^{1,9861611};$$

$$Z_4 = -5,552078 + 1,0707842 \cdot \Delta Z_1 - 0,27391228 \cdot 10^7 / (\Delta Z_1)^{15,345488} + 0,6498747 \cdot 10^{10} \times \exp(-10,825071 \cdot \Delta Z_1) \cdot (\Delta Z_1)^{4,4677986} + 0,22031673 \cdot 10^3 \times \exp(-1,0218744 \cdot \Delta Z_1) / (\Delta Z_1)^{0,58435826};$$

$$Z_5 = 0,81483682 \cdot 10^3 - 0,47135673 \cdot 10^2 \cdot \Delta Z_1 - 0,24808647 \cdot 10^{10} / (\Delta Z_1)^{15,171819} + 0,98719157 \cdot 10^{12} \times \exp(-8,0617864 \cdot \Delta Z_1) / (\Delta Z_1)^{0,77666729} + 10,926467 \cdot 10^7 \times \exp(-8,7852304 \cdot \Delta Z_1) \cdot (\Delta Z_1)^{12,0193},$$

где $\Delta Z_1 = 0,01 \cdot Z_1$.

Относительная погрешность регрессий (3)–(6) составляет не более $\pm 3,5\%$. Оценка регрессионных коэффициентов моделей (1)–(6) реализована модифицированным методом конфигураций Хука-Дживса.

Оптимизация процесса и ее результаты

Исходя из регрессий типа (1) поставлена и решена задача оптимизации процесса получения смазок марок «Униол 1» и «Униол 2», позволяющая получить продукт в соответствии с ГОСТ или ТУ [16]. На основе требований стандартов [16,17] к качеству этих смазок критерием оптимизации служит аддитивное выражение, включающее основные характеристики:

$$R(\bar{X}) = \gamma_1 / Z_1^*(\bar{X}) + \gamma_2 \cdot Z_2^*(\bar{X}) + \gamma_3 / Z_3^*(\bar{X}) + \gamma_4 \cdot Z_4^*(\bar{X}) + \gamma_5 \cdot Z_5^*(\bar{X}),$$

где $R(\bar{X})$ – многокритериальный показатель качества; γ_i – определяемые опытным или экспертным путем коэффициенты веса каждого свойства, $\sum_{i=1}^5 \gamma_i = 1,0$; Z_i^* – приведенная к без-

размерному виду величина i -го свойства смазки:

$$Z_i^* = \frac{2 \cdot Z_i}{Z_i^{\min} + Z_i^{\max}}. \tag{8}$$

На критерий (8) накладываются ограничения на минимальные и максимальные значения технологических параметров и качественных показателей, обусловленные соответственно требованиями технологического регламента и действующих стандартов:

$$X_j^{\min} \leq X_j \leq X_j^{\max}; \tag{9}$$

$$Z_i^{\min} \leq Z_i \leq Z_i^{\max}, \tag{10}$$

где X_j^{\min} , Z_i^{\min} , X_j^{\max} , Z_i^{\max} – соответственно минимальное и максимальное значение j -го технологического параметра X_j или i -го свойства смазки Z_i .

Оптимизационная модель решения задачи включает критерий (7), ограничения (9), (10), коэффициенты штрафов, равные 10^{20} , и с использованием метода штрафных функций записывается следующим образом:

$$R(\bar{X}) + 10^{20} \cdot \sum_{j=1}^6 (|X_j^{\min} - X_j| - X_j + X_j^{\min})^2 + 10^{20} \cdot \sum_{j=1}^6 (|X_j^{\max} - X_j| + X_j - X_j^{\max})^2 + 10^{20} \cdot \sum_{i=1}^5 (|Z_i^{\min} - Z_i| - Z_i + Z_i^{\min})^2 + 10^{20} \cdot \sum_{i=1}^5 (|Z_i^{\max} - Z_i| + Z_i - Z_i^{\max})^2 \xrightarrow{\bar{X}} \min. \tag{11}$$

В результате ее решения находятся оптимальные значения технологических параметров $X_1 - X_6$, которые позволяют получить смазку с максимальными по ГОСТ значениями пенетрации и предела прочности (Z_1, Z_3) и минимальными по ГОСТ значениями коллоидной стабильности (Z_2) и коэффициентов динамической вязкости (Z_4, Z_5). Решение задачи (11) выполнено генетическим алгоритмом [22].

На рис. 1 и 2 приведены скриншоты интерфейсов разработанной программы для вывода результатов решения оптимизационной задачи (11) для процесса изготовления смазок марок «Униол 1» и «Униол 2». Пользователь программы задает величины весов каждой из характеристик смазок, запускает программу на выполнение и получает результаты оптимизации в виде оптимальных значений технологических параметров, целевой функции и свойств смазок.

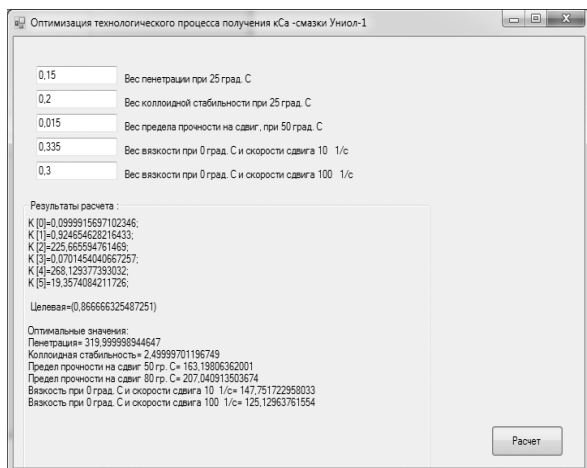


Рис. 1. Интерфейс программы для оптимизации процесса изготовления смазки «Униол 1»

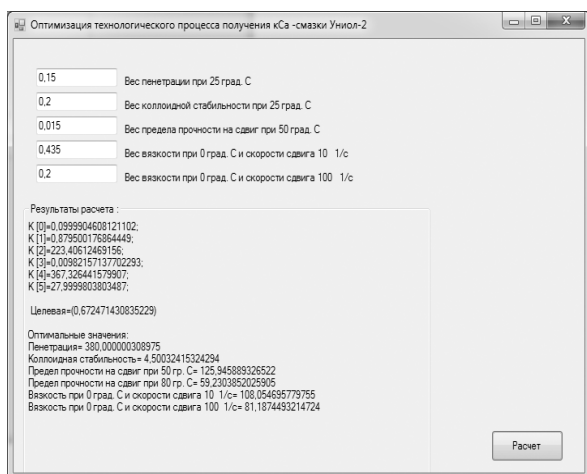


Рис. 2. Интерфейс программы для оптимизации процесса изготовления смазки «Униол 2»

На рис. 3–5 приведены результаты моделирования зависимости пенетрации от значений технологических параметров в виде 3D-графиков, рассчитанных по модели (1).

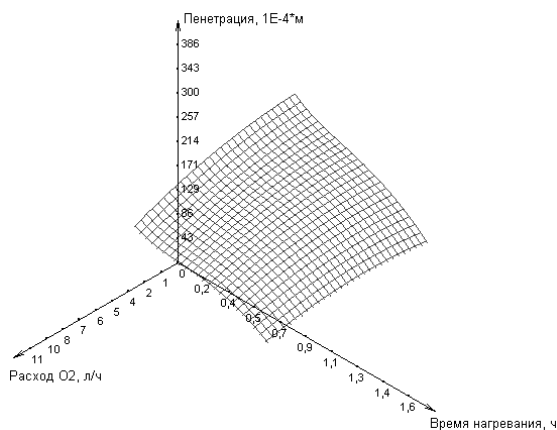


Рис. 3. Графическая 3D-зависимость пенетрации от расхода кислорода и времени нагревания при $X_3 = 222 \text{ }^\circ\text{C}$, $X_4 = 0,25 \text{ ч}$, $X_5 = 250 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, $X_6 = 13,3 \text{ } \%$ мас.

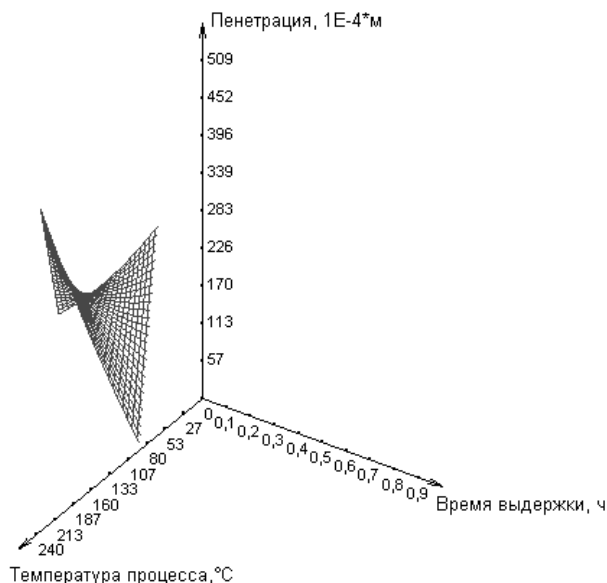


Рис. 4. Графическая 3D-зависимость пенетрации от температуры процесса и времени выдержки при температуре реакции при $X_1 = 6 \text{ л/ч}$, $X_2 = 1,3 \text{ ч}$, $X_5 = 250 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, $X_6 = 13,3 \text{ } \%$ мас.

Выводы

1. Впервые разработаны нелинейные математические модели, позволяющие с высокой точностью описывать основные качественные характеристики пластичных смазок на основе кальциевых мыл марок «Униол 1» и «Униол 2» в зависимости от технологических параметров процесса термомеханического диспергирования мыльно-масляного концентрата. Для экспресс-анализа готовых смазок определено ключевое, наиболее просто измеряемое и информативное свойство – пенетрация. Разработаны нелинейные математические модели для описания свойств смазок в зависимости от пенетрации. Относительная погрешность разработанных моделей на порядок меньше известных аналогов.

2. Разработана и исследована оптимизационная модель процесса изготовления мыльных смазок на основе кальция, позволяющая рассчитать оптимальные значения технологических параметров процесса. Определены оптимальные значения технологических параметров при производстве смазок марок «Униол 1» и «Униол 2», подобраны весовые коэффициенты для качественных показателей смазок.

3. Результаты исследования, включая разработанную программу оптимизации, могут использоваться при управлении промышлен-

ным процессом получения пластичных смазок на основе кальциевых мыл.

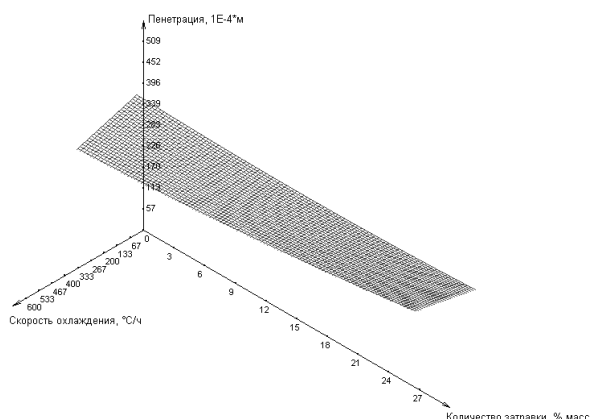


Рис. 5. Графическая 3D-зависимость пенетрации от скорости охлаждения и количества введенной затравки при $X_1 = 6$ л/ч, $X_2 = 1,3$ ч, $X_3 = 222$ °С, $X_4 = 0,25$ ч

4. Создана методика моделирования и оптимизации процесса получения большого класса пластичных мыльных смазок на основе щелочных и щелочно-земельных металлов.

Литература

1. Фукс И.Г. Пластичные смазки. М.: Химия, 1972. 158 с.
2. Ищук Ю.Л. Технология пластичных смазок. Киев: Наукова Думка, 1986. 248 с.
3. Фукс Г.И., Фукс И.Г. Вопросы коллоидной химии в производстве и применении смазочных материалов // Химия и технология топлив и масел. 1984. № 3. С. 10-12.
4. Ищук Ю.Л., Синицын В.В., Степанянц С.А. Новые пластичные смазки общего назначения на основе кСа-мыл // Химия и технология топлив и масел. 1974. № 11. С. 6-9.
5. Кузьмичев С.П., Ищук Ю.Л., Степанянц С.А. Опыт эксплуатации промышленной установки полунепрерывного действия по производству смазок типа «Униол» // Химия и технология топлив и масел. 1977. №3. С. 19-22.
6. Урьев Н.Б., Ребиндер П.А. Основные стадии образования и разрушения коагуляционных структур и их роль в оптимизации технологических процессов при структурообразовании дисперсных систем // Докл. АН СССР. 1972. 205. № 5. С. 1164-1167.
7. Романютин А.А., Триликий К.К., Лендзел И.В. Роль стадии термомеханического диспергирования в формировании структуры кСа-смазки // Химия и технология топлив и масел. 1989. № 7. С. 34-35.
8. Краснокутская М.Е., Наконечная М.Б., Кузьмичёв С.П. Влияние скорости нагрева и режима охлаждения на свойства комплексных кальциевых смазок // Химия и технология смазочных материалов: сб. науч. тр. Киев: Наукова Думка, 1977. С. 75-79.
9. Куандыков Б.Б., Арапов Д.В. Программа моделирования качественных показателей в производстве пластичных смазок // Материалы студенческой научной конференции за 2016 год: сб. Воронеж: ВГУИТ, 2016. С. 410.
10. Арапов Д.В., Куандыков Б.Н. Моделирование качественных показателей производства пластичных смазок // Материалы LIV отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2015 год: сб. Воронеж: ВГУИТ, 2016. С. 99.
11. Ищук Ю.Л., Новодед Р.Д., Жебровская Н.В. Влияние максимальной температуры приготовления и времени термообработки на термоокислительную стабильность комплексных кальциевых смазок // Нефтепереработка и нефтехимия. Киев, 1980. Вып. 18. С. 41-44.
12. Шибряев С.Б., Фукс И.Г. Технологические ПАВ в мыльных смазках. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. 64 с.
13. Чередниченко Г.И., Зряков И.Н., Тамбиева Б.И. Математическое моделирование связей между составом дисперсионной среды, количеством загустителя и свойствами литевых смазок // Нефтепереработка и нефтехимия. Киев, 1983. Вып. 24. С. 3-6.
14. Рудович Н.М., Манойло А.М. Математическое описание процесса омыления в производстве пластичных смазок как многомерного объекта автоматизированного управления // Нефтепереработка и нефтехимия. Киев, 1986. Вып. 31. С. 40-42.
15. Рудович И.М., Манойло А.М. Оптимизация стационарных режимов процесса омыления в производстве пластичных смазок // Нефтепереработка и нефтехимия. Киев, 1988. Вып. 34. С. 59-63.
16. ГОСТ 23510-79.
17. Синицын В.В. Пластичные смазки и оценка их качества. М.: Изд. стандартов, 1975. 190 с.
18. Романютин А.А. Использование математических методов при отработке технологии получения литевой смазки с наполнителем // Нефтепереработка и нефтехимия. Киев, 1986. Вып. 30. С. 62-66.
19. Palacios J.M., Palacios M.P. Rheological properties of greases in EHD contacts// Tribology International. 1984. V. 17(3). P. 167-171.
20. Манойло А.М., Ищук Ю.Л., Рудович И.М. Автоматическое регулирование вязкостно-прочностных характеристик пластичных смазок в процессе их производства // Химическая технология. Киев, 1985. Вып. 2. С. 48-50.
21. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. М.-Л.: Химия, 1971. 824 с.
22. Тихомиров С.Г., Арапов Д.В., Курицын В.А. Моделирование и оптимизация процесса получения комплексной кальциевой смазки // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2016): материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 349-352.

Поступила 28.02.2019; принята к публикации 22.03.2019

Информация об авторах

Арапов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: arapovdv@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8726-5279>

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF OBTAINING VISCOUS LUBRICANTS FOR HEAVY-LOADED MECHANISMS

D.V. Arapov

Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: a substantially non-linear additive mathematical dependence of the main characteristics of grease based on calcium soaps on the technological parameters of its production is described. The most important technological parameters of the process are: the oxygen content in the reactor, the heating time of the reaction mixture to the required temperature, the processing temperature of the mixture, the aging time at the treatment temperature, the cooling rate and the mass of the injected seed. The following lubricant properties were modeled: 1) penetration, 2) colloidal stability, 3) tensile strength at 50 °C, 4) viscosity at 0 °C and shear rate 10 s⁻¹, 5) viscosity at 0 °C and shear rate 100 s⁻¹. In view of the insufficient knowledge of the process, regression analysis was used to develop mathematical dependencies. The developed model differs from published regressions by the presence of terms in the form of squares of the values of technological parameters and the term in the form of their product, as well as by a free coefficient. The error of the model is respectively: 1) ±1.15% rel., 2) ±1.18% rel., 3) ±4.32% rel., 4) ±3.0% rel., 5) ±2.46% rel. Models-analogues have errors of 20 - 30% rel. and more, although they satisfy the Fisher criterion. Operational analysis of the quality of the lubricant obtained is implemented through the mathematical dependence of the properties of the lubricant on penetration as the most reliable and accessible quality measurement. The relative error in determining the characteristics of the lubricant depending on the penetration is no more than ± 3.5%. On the basis of the created model, a criterion was developed, limitations were chosen and the task of optimizing the process of manufacturing a lubricant based on calcium soaps was formulated. The problem was solved by means of a genetic algorithm. The result of its solution is information on the optimal values of the technological parameters, which make it possible to obtain a lubricant with the highest values of penetration and strength and the lowest values of colloidal stability and viscosity. Developed in C #, the program can be used to optimize the industrial process for producing a calcium-based grease lubricant

Key words: soap lubrication, mathematical model, optimization of the process of obtaining

References

1. Fuchs I.G. "Plastic lubricants" ("Plastichnye smazki") Moscow, Chemistry, 1972, 158 p.
2. Ishchuk Yu.L. "Grease technology" ("Tekhnologiya plastichnyh smazok") Kiev, Naukova Dumka, 1986, 248 p.
3. Fuchs G.I., Fuchs I.G. "Questions of colloid chemistry in the production and use of lubricants", *Chemistry and Technology of Fuels and Oils (Khimiya i tekhnologiya topliv i masel)*, 1984, no. 3, pp.10-12.
4. Ishchuk Yu.L., Sinitsyn V.V., Stepanyants S.A. "New greases of general purpose based on kCa-soap", *Chemistry and Technology of Fuels and Oils (Khimiya i tekhnologiya topliv i masel)*, 1974, no. 11, pp. 6-9.
5. Kuzmichev S.P., Ishchuk Yu.L., Stepanyants S.A. "Operating experience of an industrial semi-continuous unit for the production of Uniol type lubricants", *Chemistry and Technology of Fuels and Oils (Khimiya i tekhnologiya topliv i masel)*, 1977, no. 3, pp. 19-22.
6. Ur'ev N.B., Rebinder, P.A. "The main stages of formation and destruction of coagulation structures and their role in optimizing technological processes during the structure formation of dispersed systems", *Report of Academy of Sciences of the USSR (Dokl. AN SSSR)*, 1972, vol. 205, no. 5, pp. 1164-1167.
7. Romanyutin A.A., Triliskiy K.K., Lendiel I.V. "The role of the stage of thermomechanical dispersion in the formation of the structure of kCa – lubricant", *Chemistry and Technology of Fuels and Oils (Khimiya i tekhnologiya topliv i masel)*, 1989, no. 7, pp. 34-35.
8. Krasnokutskaya M.E., Nakonechnaya M.B., Kuzmichyov S.P. "Effect of heating rate and cooling mode on the properties of complex calcium greases", *Chemistry and Technology of Lubricants. Coll. Sci. Papers (Khimiya i tekhnologiya smazochnykh materialov: sb. nauch. tr.)*, Kiev, Naukova Dumka, 1977, pp. 75-79.
9. Kuandykov B.B., Arapov D.V. "The program of modeling quality indicators in the production of greases", *Proc. of the Student Scientific Conference 2016 (Materialy studencheskoy nauchnoy kon-ferentsii za 2016 god: sb.)*, Voronezh, VSUIT, 2016, pp. 410.
10. Arapov D.V., Kuandykov B.N. "Simulation of quality indicators for the production of plastic lubricants", *Proc. of the LIV Reporting Scientific Conference of Teachers and Research Workers of VSUIT 2015 (Materialy LIV otchetnoy nauchnoy konferentsii prepodavateley i nauchnykh sotrudnikov VGUIT za 2015 god: sb.)*, Voronezh, VSUIT, 2016, pp. 99.
11. Ishchuk Yu.L., Novoded R.D., Zhebrovskaya N.V. "Effect of maximum cooking temperature and heat treatment time on the thermo-oxidative stability of complex calcium greases", *Oil Processing and Petrochemistry (Neftepererabotka i neftekhimiya)*, Kiev, 1980, vol. 18, pp. 41-44.
12. Shibryaev S.B., Fuchs I.G. "Technological surfactants in soap lubricants" ("Tekhnologicheskie PAV v myl'nyh smazkah"), Moscow, TsNIITNeftekhim, 1983, 64 p.
13. Cherednichenko G.I., Zryakov I.N., Tambiyeva B.I. "Mathematical modeling of the relationship between the composition of the dispersion medium, the amount of thickener and the properties of lithium greases", *Oil Processing and Petrochemistry (Neftepererabotka i neftekhimiya)*, Kiev, 1983, vol. 24, pp. 3-6.
14. Rudovich N.M., Manoylo A.M. "Mathematical description of the saponification process in the production of greases as a multi-dimensional object of automated control", *Oil Processing and Petrochemistry (Neftepererabotka i neftekhimiya)*, Kiev, 1986, vol. 31, pp. 40-42.
15. Rudovich I.M., Manoylo A.M. "Optimization of stationary modes of the saponification process in the production of greases", *Oil Processing and Petrochemistry (Neftepererabotka i neftekhimiya)*, Kiev, 1988, vol. 34, pp. 59-63.
16. GOST 23510-79.
17. Sinitsyn V.V. "Plastic lubricants and evaluation of their quality" ("Plastichnye smazki i otsenka ikh kachestva"), Moscow, Izd. standartov, 1975, 190 p.

18. Romanyutin A.A. "The use of mathematical methods in the development of technology for lithium grease with a filler", *Oil Processing and Petrochemistry (Neftepererabotka i neftekhimiya)*, Kiev, 1986, vol. 30, pp. 62-66.
19. Palacios J.M., Palacios M.P. "Rheological properties of greases in EHD contacts", *Tribology International*, 1984, vol. 17(3), pp. 167-171.
20. Manoylo A.M., Ishchuk Yu.L., Rudovich I.M. "Automatic control of the viscosity-strength characteristics of greases during their production", *Chemical Technology (Khimicheskaya tekhnologiya)*, Kiev, 1985, vol. 2, pp. 48-50.
21. Batuner L.M., Pozin M.E. "Mathematical methods in chemical engineering" ("Matematicheskie metody v khimicheskoy tekhnike"), Moscow-Leningrad, Khimiya, 1971, 824 p.
22. Tikhomirov S.G., Arapov D.V., Kuritsyn V.A. "Simulation and optimization of the process of obtaining complex calcium grease", *Modern Methods of Applied Mathematics, Control Theory and Computer Technologies (PMTUKT-2016): proc. of the IX International Scientific and Practical Conference (Sovremennye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternykh tekhnologiy (PMTUKT-2016): materialy IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2016, pp. 349-352.

Submitted 28.02.2019; revised 22.03.2019

Information about the author

Denis V. Arapov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 prospekt Revolyutsii, Voronezh 394036, Russia), e-mail: arapovdv@gmail.com

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОДОЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ВРЕМЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

С.Ю. Алексеев

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация: рассмотрен метод организации вычислений и построения программных систем, реализующих задачи моделирования для повышения качества функционирования технических систем. Он рассматривает программную систему как совокупность взаимодействующих элементов, каждый из которых описывает свойства и реализует функциональность отдельного элемента технической системы. Принципиальным отличием рассматриваемого метода от существующих является то, что программная система не реализует алгоритм решения общей математической задачи. Представленный в работе метод основывается на аналитических решениях при решении задач моделирования. Это обусловлено меньшим объемом вычислений и меньшим временем расчета. Для задач моделирования, решаемых на этапах функционирования технических систем, время получения результата является одной из определяющих характеристик. Рассмотрен пример использования такого метода организации вычислений на примере расчета закона изменения состава газовой смеси во времени при ее движении через обечайку, в которой расположен змеевик. На примере показано использование контейнерных объектов при моделировании ячеечной структуры областей течения процессов. Исследованы два варианта построения контейнеров: на основе связанных списков и на основе массива. В ходе исследований оценивалась структура программного элемента, представляющая ячейку аппарата и время расчета. Для оценки времени расчета было проведено несколько серий экспериментов, каждая отличалась длиной ячейки аппарата и, как следствие, количеством ячеек

Ключевые слова: компьютерное моделирование, контейнерные классы, полиморфные объекты

Введение

Математическое моделирование используется в технических системах для повышения качества их функционирования в задачах анализа, совершенствования управления, оптимизации и принятия решений. Эти задачи решаются на базе встраиваемых вычислительных систем, одной из составляющих которой является подсистема, реализующая решения задач математического моделирования. Она напрямую взаимодействует с другими подсистемами, предоставляя им данные, обеспечивающие решение перечисленных выше задач.

Основное значение в этом случае имеют не сами решения задач моделирования, а программно-аппаратные комплексы, которые их реализуют. Для них время получения результата является такой же характеристикой системы, как точность расчетов и надежность [1, 2, 3].

Использование аналитических решений при решении задач моделирования, для которых время получения результата является одной из определяющих характеристик, имеет ряд преимуществ перед использованием конечно-разностных методов. В первую очередь это меньший объем вычислений, и, соответственно,

меньшее время расчета, простота реализации, высокая точность получения результата.

Реализация существующих методик решения задач моделирования сводится к выполнению последовательных действий, направленных на решение систем дифференциальных уравнений, составляющих математическое описание моделируемых процессов. Физические особенности и взаимодействие моделируемых процессов при реализации не рассматриваются напрямую. Программная система выступает только как средство реализации полученных решений систем дифференциальных уравнений.

Использование такого метода ограничивает возможности повышения эффективности и скорости вычислений в системах реального времени. Вопросы оптимизации вычислений становятся актуальными в случае, когда время выполнения вычислений ограничено временем протекания физических процессов в оборудовании, работу которого программная система обеспечивает. Реализация решений на основе линейных, последовательных вычислений затрудняет организацию взаимодействия с другими подсистемами технической системы. Это могут быть, например, система представления данных, система генерации управляющих воздействий для исполнительных механизмов, работающих в составе оборудования.

Актуальным является поиск новых эффективных методов организации вычислений, направленных на решение задач моделирования и методов построения программных систем, их реализующих.

Материалы и методы

Описанный в статье метод предлагает представление программной системы, реализующей решения задач моделирования, как совокупность активных и параллельно работающих объектов [4 - 9], описывающих свойства и функции конструктивных единиц технической системы. Принципиальным отличием рассматриваемого метода от существующих является то, что программная система не реализует алгоритм решения общей математической задачи.

Вычисление характеристик процессов, протекающих в технической системе, осуществляется посредством децентрализованного, асинхронного взаимодействия параллельно работающих объектов. Каждый объект, описывает отдельный элемент технической системы и обеспечивает расчет параметров процессов, протекающих в ней. Учет взаимного влияния процессов осуществляется посредством обмена сообщениями между объектами.

Под объектом понимается размещенный в памяти экземпляр абстрактного типа данных, описывающего возможные состояния и функции конструктивной единицы технической системы. Расширением классического объектно-ориентированного подхода является то, что объекты не выполняют действия по запросу его методов, а реализуют как минимум один процесс, длительность которого совпадает со временем работы соответствующего ему элемента технической системы. Этот процесс, обеспечивает контроль времени работы, вычисления параметров, ожидание сообщений от других объектов.

Такое построение программных систем, реализующих задачи моделирования, позволяет упростить логику (например, уменьшить количество логических операторов и операций выбора), сократить объем выполняемого кода. Это происходит за счет того, что часть операций реализуется автоматически, на уровне отношений типов

данных, конструкций языка программирования, объектного или байт-кода. При этом уменьшается степень зацепления объектов и повышается их связанность [10].

Такая архитектура обеспечивает возможность параллельных вычислений, в том числе организации вычислений на базе распределенной вычислительной сети. Благодаря этому, можно сохранить режим реального времени при решении задач, требующих большого объема вычислений [11].

Результаты и их обсуждение

Описанный выше метод был использован для расчета состава двухкомпонентной газовой смеси на выходе из цилиндрической обечайки, в которой расположен змеевик. Газовая смесь двигалась в межтрубном пространстве змеевика (рис. 1). Змеевик, расположенный в обечайке, рассматривался как турбулизатор потока, и причина возникновения дополнительного продольного перемешивания, изменяющего состав газовой смеси.



Рис. 1. Аппарат со змеевиком

Представленная реализация метода универсальна - расчет может быть выполнен для газовой смеси, состоящей из любых двух компонентов. В работе они рассматриваются в общем виде — компоненты C_1 и C_2 . Основная цель расчета определить объемную долю компонента C_2 на выходе из обечайки и закон изменения ее содержания в газовой смеси во времени. В расчетах было принято, что объемная доля компонента C_2 на входе в обечайку изменяется по периодическому закону, а для одного периода - скачкообразно (рис. 2а). Принималось, что расход газовой смеси изменяется во времени также по периодическому закону (рис. 2б).

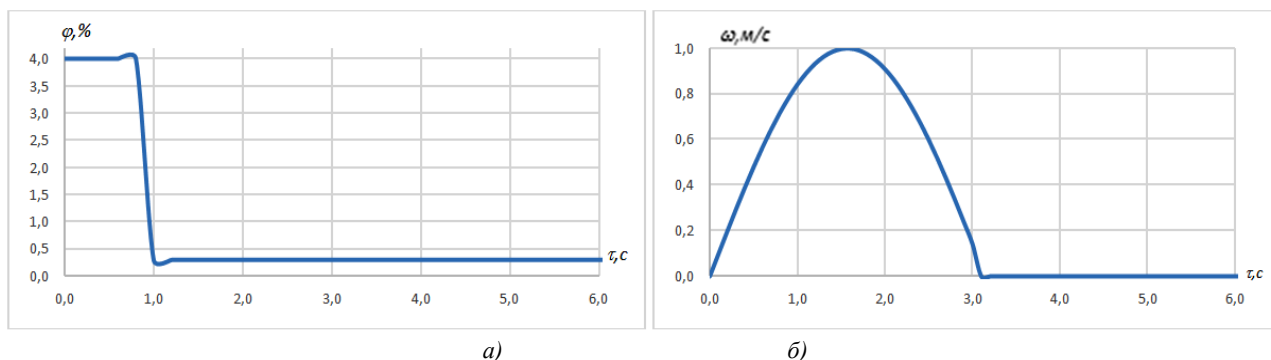


Рис. 2. Изменение входных параметров газовой смеси (показан период, равный 6 секундам):
 а – изменение объемной доли целевого компонента в газовой смеси на входе в аппарат,
 б – изменение расхода газовой смеси

При обтекании расположенного внутри цилиндрической обечайки змеевика происходит продольное перемешивание газовой смеси. Поток газовой смеси в обечайке рассматривался как набор элементарных областей, каждая из которых представляется в виде цилиндра с основанием, совпадающим с сечением обечайки аппарата, длиной, равной расстоянию, которое проходит поток за время $\Delta\tau$. При моделировании принималось допущение, что при обтекании змеевика осуществляется полное перемешивание двух соседних элементарных областях потока. Значение объемной доли целевого компонента на выходе аппарата определялось в результате последовательного расчета всех элементарных областей потока. Для каждых двух соседних элементарных областей решалось уравнение:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{G(\tau)}{V} \cdot (C_{\text{ex}}(\tau) - C(\tau)), C(0) = C_0, \quad (1)$$

где $G(\tau)$ — изменение расхода газовой смеси на входе в элементарную область, кг/м³;
 V — объем элементарной области, м³;
 $C_{\text{ex}}(\tau)$ — изменение объемной доли целевого компонента в газовой смеси на входе в элементарную область, кг/м³.

Для упрощения вида аналитического решения [11] этого уравнения на этапе компьютерной реализации было использовано представление времени процесса в виде совокупности элементарных временных интервалов $\Delta\tau$. В течение одного интервала значения расхода газовой смеси и объемная доля целевого компонента принимались не как функции времени $G(\tau)$, $C(\tau)$, а как константы. При переходе к следующему временному интервалу они изменялись скачкообразно. Также такое представление времени позволило оценивать время прохождения газовой смеси че-

рез аппарат и синхронизировать работу программы с реальным процессом.

Аппарат представлялся в программной системе объектом-контейнером [10], в котором расположены объекты, описывающие свойства его участков. Можно выделить два типа участков – со змеевиком и без него. Для описания свойств этих участков используются два типа объектов *WormCell* – ячейка аппарата со змеевиком и *NullCell* – ячейка аппарата без змеевика. Объекты, описывающие ячейки аппарата, могут быть размещены в контейнере в различном порядке. Благодаря этому, без изменения алгоритмов, структуры программы могут быть рассчитаны аппараты с различными положениями змеевика.

Каждый объект, описывающий свойства ячейки аппарата, содержит внутри себя объект, который описывает свойства, находящегося в ячейке фрагмента потока газовой смеси. Эти объекты являются экземплярами определенного типа *Flow*. Он описывает свойства фрагмента потока с точки зрения содержания в нем целевого компонента. Его объемная доля в газовой смеси представлена в переменной *_conc*. Таким образом, моделируется физическое присутствие в каждом участке аппарата фрагмента потока и заполнение его газовой смесью. При этом обеспечивается описание уникального состояния газового потока по длине аппарата и описание уникального состояния каждой ячейки аппарата.

Для того чтобы гарантировать одинаковое поведение объектов, описывающих ячейки аппарата, типы *NullCell* и *WormCell* унаследованы от общего базового типа *Cell*. Таким образом, с экземплярами этих двух классов можно работать одинаково без выполнения дополнительных операций по динамической проверке типов объектов. При реализации для каждого экземпляра ячейки аппарата предусмотрена возможность хранения экземпляра класса *Flow*.

Объекты классов *NullCell* и *WormCell* участвуют в расчетах одинаково. Они абсолютно взаимозаменяемы, можно также везде использовать объекты класса *Cell*. Разделение типов объектов необходимо для описания конструкции аппарата и его областей, в которых змеевик присутствует и в которых нет. При таком способе упрощается логика процедуры пересчета состояния ячеек аппарата по длине. Появляется возможность избежать операций и введения дополнительных переменных, направленных на определение обла-

сти аппарата, для которой выполняется расчет. Просто осуществляется определение типа текущей ячейки и исходя из этого делается вывод о необходимых действиях с ней.

В работе рассмотрено использование двух вариантов контейнерных объектов – массива и списка. Тип данных, описывающий аппарат в сборе, получен в результате операции наследования от типов *Array* и *List*.

На рис. 3 показана диаграмма классов этой программной системы:

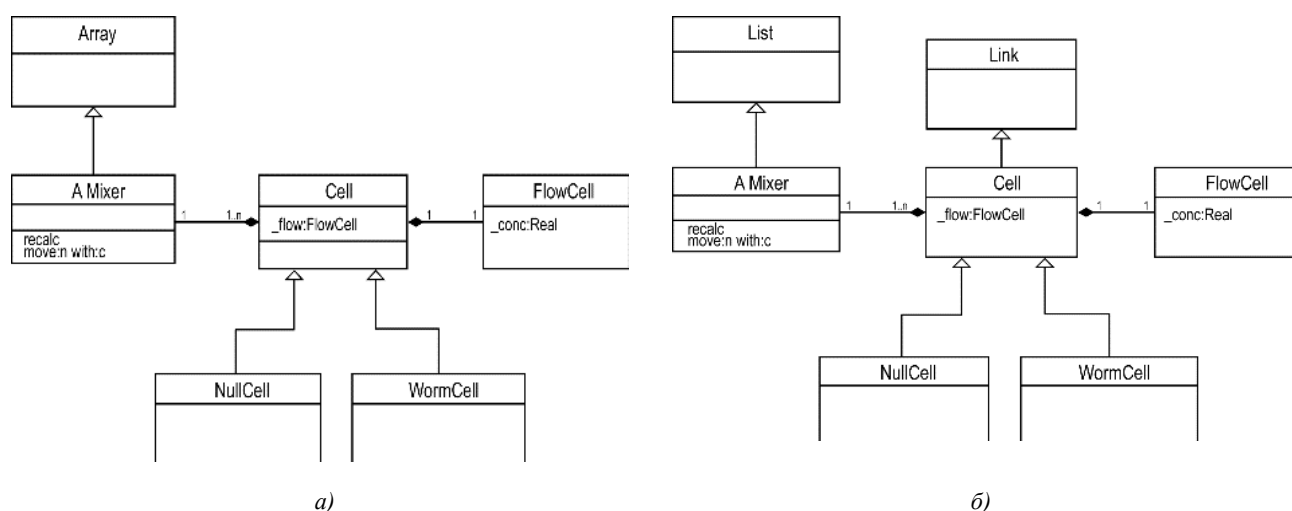


Рис. 3. Диаграмма классов:

a – контейнер выполнен на основе индексированного массива, *б* – контейнер выполнен на основе списка

Для рассматриваемой программной системы агрегатные ассоциации классов определены в соответствии с конструкцией и устройством аппарата. Объект класса *Mixer* включает в себя объекты класса *Cell*, а класс *Cell* включает в себя по одному объекту класса *Flow*. В отличие от обычной агрегатной ассоциации, когда составляющие одного объекта могут одновременно принадлежать нескольким другим объектам, здесь составляющие одного объекта принадлежат только ему. Связи классов *Mixer* и *Cell*, *Cell* и *Flow* определены, как сказано выше, устройством аппарата и сильны настолько, что уничтожение объектов классов *Mixer* или *Cell* приводит к уничтожению всех их составных частей.

Из диаграммы видно, что между классами отсутствуют связи, изменение в спецификации одного класса может повлиять на поведение другого класса, использующего первый класс. Отсутствие таких взаимопроникающих связей между классами является признаком того, что классы

обладают высокой степенью связанности и малой степенью зацепления. Связанность показывает меру того, насколько отдельный класс образует логически законченную, осмысленную единицу [10]. Зацепление характеризует взаимозависимость между компонентами программы. В общем случае желательно уменьшать степень зацепления, как только возможно, так как наличие дополнительных связей между объектами усложняет процессы обмена данными между ними и синхронизацию их работы [10].

Ядром программы является процедура, осуществляющая расчет содержания целевого компонента в газовой смеси по длине аппарата и моделирующая движение ее потока внутри аппарата. Движение моделируется за счет сдвига экземпляров объектов, описывающих свойства фрагмента газовой смеси, в ячейках аппарата (рис. 4). Объект из последней ячейки удаляется из памяти. В первую ячейку подается новый, только что размещенный в памяти объект.

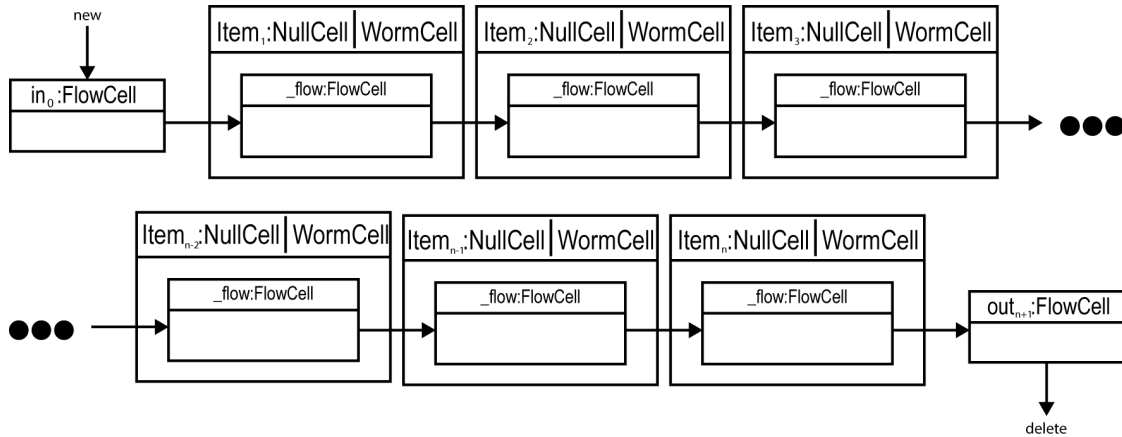


Рис. 4. Моделирование движения газовой смеси в аппарате

Время работы аппарата представляется набором элементарных интервалов. Для каждого временного интервала осуществляются операции сдвига содержимого контейнера, генерации нового объекта, описывающего свойства газовой смеси, размещения его в первой ячейке контейнера и пересчета значений объемной доли по длине аппарата [12]. Так моделируется движение газовой смеси во времени. Для стационарного режима течения газа величину временного интервала удобно выбирать как отрезок времени, за

которое газовая смесь проходит одну ячейку. Для нестационарного режима величина временного интервала задается так, чтобы его величина обеспечивала прохождение потоком одной ячейки аппарата. В противном случае циклы операций сдвига будут выполняться, но присваивания переменных производиться не будет. Картина будет такая, что газовый поток не движется по аппарату.

Алгоритм расчета состава газовой смеси по длине и на выходе аппарата представлен на рис. 5.

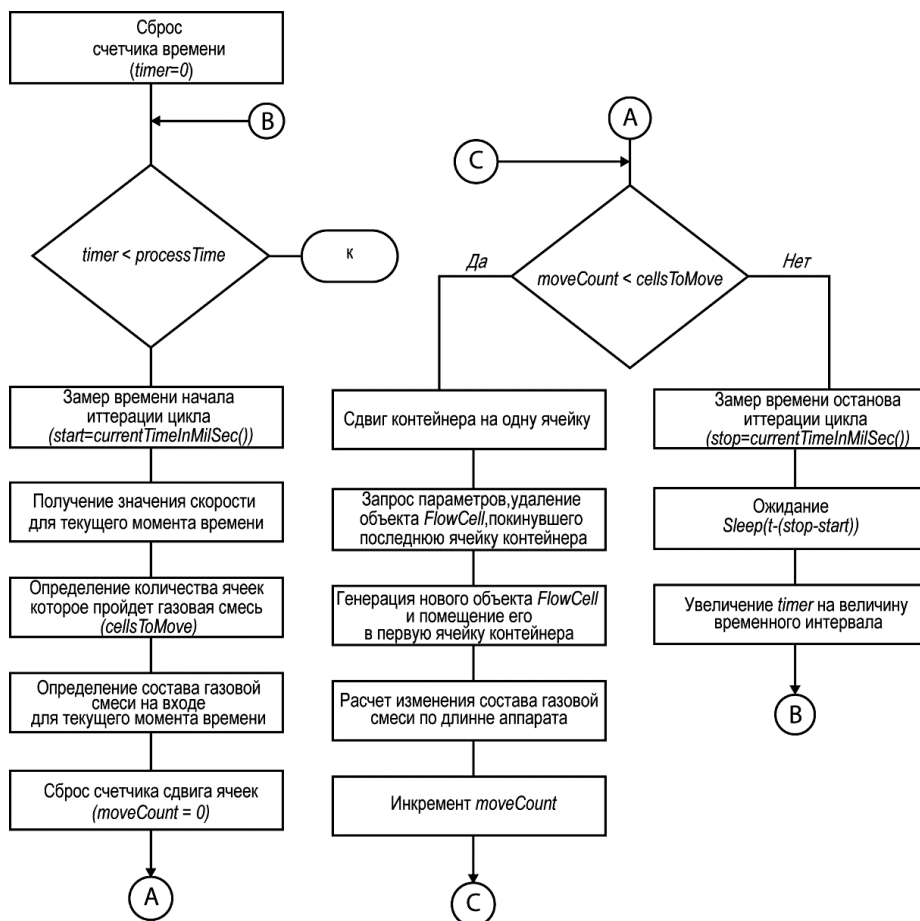


Рис. 5. Алгоритм расчета изменения состава газовой смеси по длине аппарата

Сначала вычисляется количество ячеек, которое пройдет газовая смесь за единицу времени, затем осуществляются операции сдвига объектов на рассчитанное количество ячеек. Операции сдвига выполняются последовательно, в цикле. Один оборот цикла соответствует сдвигу объектов на одну ячейку. Для каждой операции сдвига выполняется процедура расчета состава газовой смеси по длине аппарата.

Программа реализована на языке *Small*

talk/Squeak 5.1. Ниже представлены результаты расчетов. Параметры аппарата, используемые в расчете: длина аппарата - 300 мм, диаметр цилиндра - 60 мм, диаметр трубки змеевика - 10 мм, количество витков змеевика – 8.

Зависимости изменения состава газовой смеси на входе в аппарат и ее скорости показаны на рис. 2. Зависимости изменения состава газовой смеси на выходе из аппарата показаны на рис. 6.

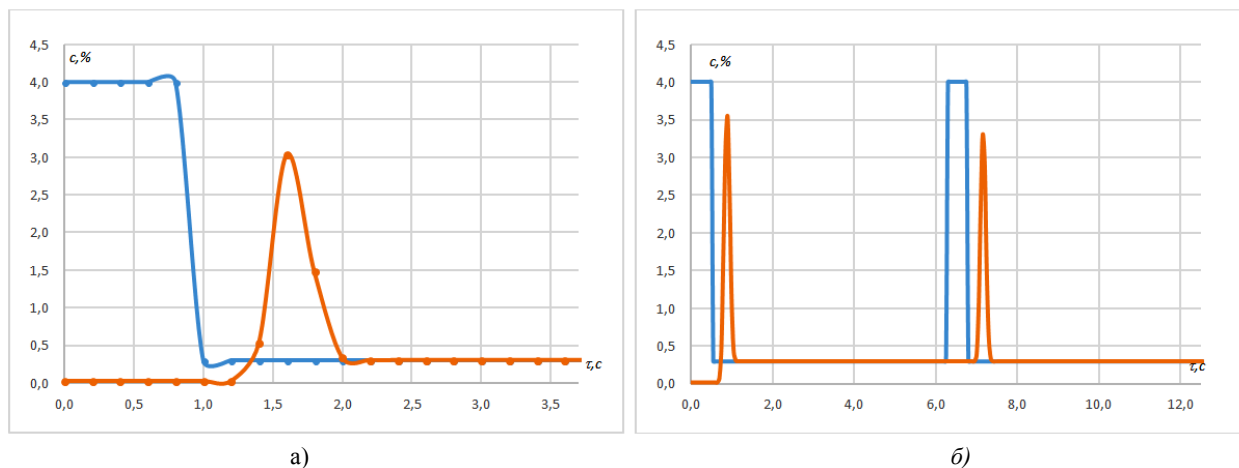


Рис. 6. Изменение состава газовой смеси на выходе аппарата во времени: а – за один период, б – за два периода

Изменение состава газовой смеси по длине аппарата при прохождении участка смеси с вы-

соким содержанием целевого компонента через аппарат показано на рис. 7.

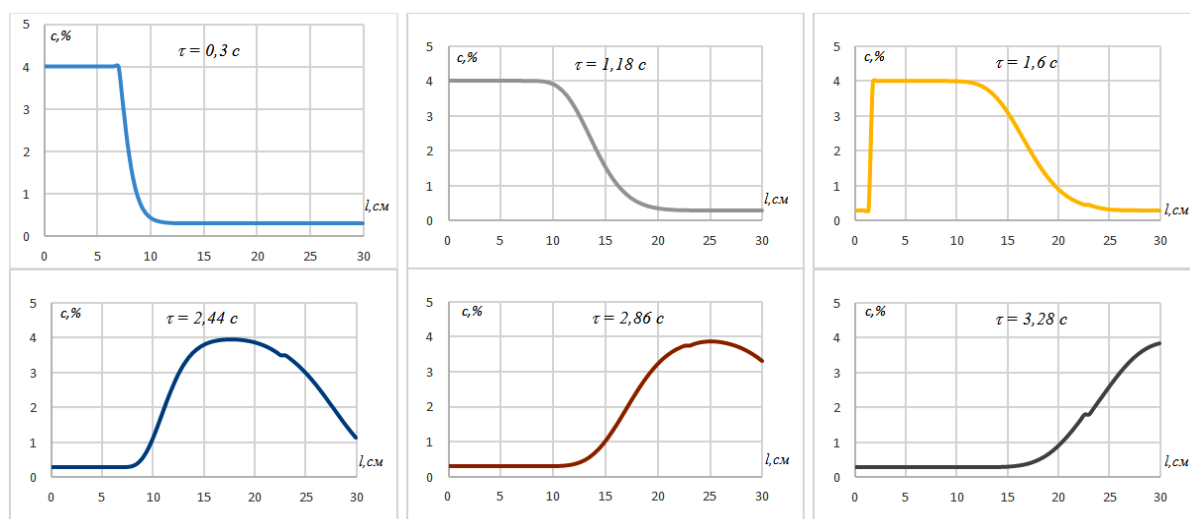


Рис. 7. Изменение содержания целевого компонента в газовой смеси по длине аппарата

В работе были использованы два варианта расчета: когда контейнерный класс выполняется на основе индексированного массива и связанных списков. Для каждого варианта на одной машине были проведены сравнительные измерения скорости ра-

боты программы. Измерения проводились в зависимости от длины ячейки. Уменьшение длины ячейки сопровождалось увеличением количества ячеек. Во всех случаях использование списков дает увеличение скорости работы программы (рис. 8).

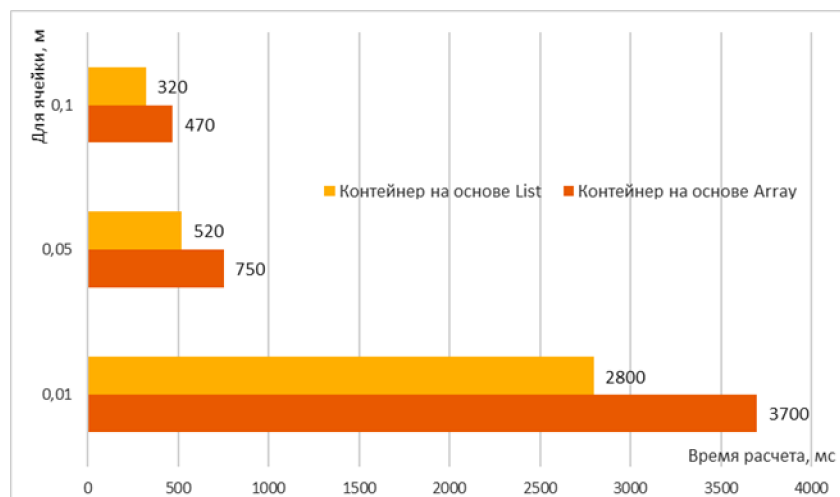


Рис. 8. Сравнительное время выполнения программы для массива и списка

Заключение

1. Проиллюстрировано использование подхода, когда программная система представлена совокупностью активных, параллельно работающих объектов, описывающих свойства и функции конструктивных единиц технического комплекса, в котором протекают нестационарные процессы гидродинамики, тепло- и массообмена.

2. Показана возможность использования активных, взаимодействующих объектов, являющихся программными абстракциями элементов технической системы для разработки программного обеспечения, реализующего расчет нестационарных полей температур, концентраций и давлений в режиме реального времени и функционирующего в составе встроенных систем.

3. Исследовано использование контейнерных объектов для моделирования области протекания процессов, рассмотрены два варианта их построения: на основе индексированных массивов и связанных списков. Измерены скорости работы программы при использовании двух вариантов построения контейнеров. Показано, что при использовании контейнеров на основе связанных списков, время выполнения расчетов характеристик процессов по длине области их протекания уменьшается.

4. Ввиду того, что последовательный расчет ячеек осуществляется от первой ячейки к последней, а операции сдвига осуществляются от последней ячейки к первой, для построения контейнеров необходимо использовать двусвязные списки, обеспечивающие навигацию по контейнеру в обе стороны. На скорость выполнения программы не влияет использование двусвязных списков по сравнению с односвязными.

Литература

1. Повышение качества конфигураций распределенной информационно-управляющей системы посредством выравнивания вычислительной нагрузки / Э.В. Мельник, А.Б. Клименко, В.В. Клименко, А.Ю. Таранов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 11. С. 33 - 38.
2. Павский В.А., Павский К.В. Применение математического ожидания и дисперсии при оценке обслуживания потока пакетов задач в вычислительных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 5. С. 41 - 44.
3. Смешанное планирование заданий в распределенных системах реального времени / Н.В. Колесов, А.М. Грузликов, Ю.М. Скородумов, М.В. Толмачева // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 5. С. 34 - 40.
4. The Failure Trace Archive: Enabling the comparison of failure measurements and models of distributed systems / B. Javadia, D. Kondo, A. Iosupc, D. Epemac // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2013. 15 p.
5. Distributed model based event-triggered control for synchronization of multi-agent systems / L. Davide, D. Dimarogonasa, M. Bernardob, K. Johanssona // Automatica. 2016. 7 p.
6. Diekhake P., Kurczveil T., Becker U. Modelling and simulation of distributed time critical communication and control systems in vehicles or vehicle networks // IFAC-PapersOnLine. 2016. 5 p.
7. Liu X., Shi Y., Constantinescu D. Distributed model predictive control of constrained weakly coupled nonlinear systems // Systems & Control Letters. 2014. 8 c.
8. Grotha P., Moreaub L., Representing distributed systems using the Open Provenance Model // Future Generation Computer Systems. 2011. 8 p.
9. Distributed consensus of multi-agent systems using distributed time delayed protocols / C. Xiea, Y. Xub, S. Mengc, D. Tongd, A. Daie // Optik - International Journal for Light and Electron Optics. 4 p.
10. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / G. Booch, R. Maksimchuk, M. Engel, B. Young, J. Conallen, K. Houston // Addison-Wesley. 2007. 691 c.
11. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. СПб.: Издательство «Лань», 2003. 576 с.
12. Data transfer between asynchronously operating program subsystems in case of computer simulation of technological processes / S. Alexeev, A. Zakharov, V. Nemtinov, I. Dyakov, D. Davydova // 16th International multidisciplinary scientific GEOconference SGEM 2016: conference proceedings.

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 15.04.2019

Информация об авторах

Алексеев Сергей Юрьевич - канд. техн. наук, научный сотрудник, департамент фундаментальных и прикладных исследований, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: sergej.alexjew@gmail.com

COMPUTER MODEL OF LONGITUDINAL MIXING IN A GAS FLOW AT RESTRICTIONS FOR CALCULATION TIMES

S.Yu. Alekseev

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: the paper discusses the method of organizing calculations and building software systems that implement modelling tasks to improve the performance of technical systems. It considers the software system as a set of interacting elements, each of which describes properties and implements the functionality of a separate element of the technical system. The principal difference of the considered method from the existing ones is that the software system does not implement the algorithm for solving a general mathematical problem. The method considered in the work is based on analytical solutions to solving modelling problems. This is due to the smaller amount of calculations, and a shorter calculation time. For modelling problems that are solved at the stages of the operation of technical systems, the time for obtaining the result is one of the defining characteristics. The paper considers an example of using such a method of organizing calculations on the example of calculating the law of change in the composition of a gas mixture over time as it moves through the shell in which the coil is located. The example shows the use of container objects in modelling the cell structure of flow areas of processes. Two options for constructing containers based on linked lists and based on an array are investigated. In the course of the research, the structure of the program element was estimated, representing the cell of the apparatus and the time of calculation. To estimate the calculation time, several series of experiments were carried out, each with a different cell length of the apparatus and, as a result, the number of cells

Key words: computer modeling, container classes, polymorphic objects

References

1. Mel'nik E.V., Klimentko A.B., Klimentko V.V., Taranov A.Yu. "Improving the quality of the configurations of a distributed information management system by balancing the computational load", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2016, no. 11, p. 33-38.
2. Pavskiy V.A., Pavskiy, V.V. "Application of expectation and dispersion in estimating service of a flow of task packets in computing systems", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2016, no. 5, pp. 41-44.
3. Kolesov N.V., Gruzlikov A.M., Skorodumov Yu.M., Tolmacheva M.V. "Mixed task planning in distributed real-time systems", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2016, no. 5, pp. 34-40.
4. Javadia B., Kondo D., Iosupc A., Epemac D. "The failure trace archive", *The Journal of Parallel and Distributed Computin.*, 2013, 15 p.
5. Davide L., Dimarogonasa D., Bernardob M., Johanssona K. "Distributed model-based event-triggered control", *Automatica*, UK, ISSN: 0005-1098, 2016, 7 p.
6. Diekhake P., Kurzveil T., Becker U. "Modeling", *IFAC-PapersOnLine*, Turkey, ISSN: 2405-8963, 2016, 5 p.
7. Liu X., Shi Y., Constantinescu D. "Distributed model", *Systems & Control Letters*, Canada, ISSN: 0167-6911, 2014, 8 p.
8. Grotha P., Moreaub L. "Representing distributed systems using the Open Provenance Model", *Future Generation Computer Systems*, UK, ISSN: 0167-739X, 2011, 8 p.
9. Xiea C., Xub Y., Mengc S., Tongd D., Daie A. "Distributed consensus of multi-agent systems using distributed time delayed protocols", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 4 p.
10. Booch G., Maksimchuk R., Engel M., Young B., Conallen J., Houston K. "Object-oriented analysis and design with applications", Addison-Wesley, 2007
11. Kamke E. "Handbook of ordinary differential equations" ("Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam"), St. Petersburg, Lan, 2003, 576 p.
12. Alexeev S., Zakharov A., Nemtinov V., Dyakov I., Davydova D. "Data transfer between technological processes and computer processes", *Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, ISSN 1314-2704, 2016, book-2, vol. 1, pp. 157-164.

Submitted 22.02.2019; revised 15.04.2019

Information about the author

Sergey Yu. Alekseev, Cand. Sc. (Technical), Researcher, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: sergej.alexjew@gmail.com

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО СКАЧКООБРАЗНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ГАУССОВСКОГО ПРОЦЕССА

Б.В. Матвеев¹, Л.А. Голпайегани², М.М. Шахморadian²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Аннотация: предложен максимально правдоподобный алгоритм обнаружения разладки ширины полосы частот быстрофлуктуирующего гауссовского случайного процесса, допускающий техническую реализацию, существенно более простую по сравнению с получаемыми на основе известных подходов. С использованием мультипликативно-аддитивной локально-марковской аппроксимации решающей статистики и ее приращений представлена методика расчета характеристик синтезированного обнаружителя и записаны замкнутые аналитические выражения для вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода. Установлено, что алгоритм обнаружения разладки обеспечивает лучшее качество функционирования при скачкообразном увеличении ширины полосы частот по сравнению со случаем ее скачкообразного уменьшения. С помощью статистического моделирования подтверждено, что рассмотренная методика статистического анализа резкопротекающих случайных процессов, характеристики которых описываются ступенчатыми функциями, является работоспособной, а аналитические формулы, описывающие качество и эффективность обнаружения разладки ширины полосы частот, хорошо описывают соответствующие экспериментальные данные в широком диапазоне значений параметров наблюдаемой реализации. Дополнительный анализ показывает, что синтезированные на основе предложенного подхода обнаружители без заметных потерь в качестве функционирования могут использоваться также при приеме низкочастотных быстрофлуктуирующих негауссовских случайных процессов с неизвестными кусочно-постоянными частотными параметрами

Ключевые слова: разладка случайного процесса, неизвестная ширина полосы частот, метод максимального правдоподобия, разрывный параметр, метод локально-марковской аппроксимации, вероятность ложной тревоги, вероятность пропуска сигнала, статистическое моделирование

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проектной части государственного задания по проекту № 2.3208.2017/4.6

Введение

Задача статистического анализа скачкообразного изменения (разладки) значений параметров случайного процесса в некоторый момент времени рассмотрена в ряде работ [1-3 и др.]. Как правило, в известных публикациях, помимо предположения о гауссовском характере наблюдаемой реализации при ее постановке, накладываются некоторые дополнительные ограничения, связанные, например, с некоррелированностью (а следовательно, статистической независимостью) обрабатываемых отсчетов [1], классом стохастических моделей анализируемого сигнала [2, 3] и пр.

В настоящей работе предложен технически простой способ обнаружения момента неизвестного скачкообразного изменения ширины полосы частот гауссовского случайного

процесса при выполнении условий быстроты его флуктуаций и равномерности его спектральной плотности в рабочей полосе частот. Теоретически и экспериментально найдены характеристики синтезированного обнаружителя.

Постановка задачи

Определим аналитически полосовой быстрофлуктуирующий низкочастотный процесс со скачкообразным изменением в момент λ_0 ширины полосы частот как

$$\xi(t) = [1 - \theta(t - \lambda_0)]v_1(t) + \theta(t - \lambda_0)v_2(t), \quad (1)$$

где $\theta(t)$ – функция Хевисайда: $\theta(t) = 0$ при $t < 0$ и $\theta(t) = 1$ при $t \geq 0$, а $v_i(t)$, $i = 1, 2$ – статистически независимые стационарные гауссовские случайные процессы со средними значениями a и спектральными плотностями [4]

$$G_i(\omega) = \frac{d}{2} \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \Omega_{0i}/2, \\ 0, & |\omega| > \Omega_{0i}/2. \end{cases}$$

Здесь Ω_{0i} – ширина полосы частот, а d – интенсивность (величина спектральной плотности) процесса $v_i(t)$, определяющая его среднюю мощность $D_i = d\Omega_{0i}/4\pi$, причем в общем случае $\Omega_{01} \neq \Omega_{02}$.

Помехи и погрешности регистрации процесса (1) аппроксимируем гауссовским белым шумом $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 . Таким образом, на интервале $t \in [0, T]$ наблюдается аддитивная смесь вида

$$x(t) = \xi(t) + n(t). \quad (2)$$

Параметры λ_0 и Ω_{02} являются неизвестными и принимают значения из априорных интервалов $[\Lambda_1, \Lambda_2]$, $[Y_1, Y_2]$. При этом будем считать, что $Y_1 < \Omega_{01} < Y_2$, а условие «быстрых» флуктуаций процесса $\xi(t)$ запишем в виде

$$\mu_{\min} = T_{\min} Y_1 / 4\pi \gg 1, \quad (3)$$

где $T_{\min} = \min(\lambda_0, T - \lambda_0)$.

На основе наблюдаемой реализации (2) и имеющейся априорной информации необходимо вынести решение о наличии или отсутствии r ширины полосы частот процесса $\xi(t)$.

Синтез алгоритма обнаружения

При синтезе алгоритма обнаружения разладки ширины полосы частот процесса $\xi(t)$ сформулируем две возможных гипотезы: 1) гипотеза H_0 : $\Omega_{01} = \Omega_{02}$, т.е. разладка отсутствует; 2) гипотеза H_1 : $\Omega_{01} \neq \Omega_{02}$. Воспользуемся методом максимального правдоподобия [4, 5], в соответствии с которым найдем выражения логарифмов функционалов отношения правдоподобия (ФОР) для сформулированных альтернатив. Используя результаты [4, 6], при гипотезах H_0 и H_1 против альтернативы H : $x(t) = n(t)$ для логарифмов ФОР имеем

$$L_0 = \frac{d}{N_0(N_0+d)} \int_0^T y^2(t, \Omega_{01}) dt + \frac{2a}{N_0+d} \int_0^T x(t) dt -$$

$$H_0: \quad - \frac{a^2 T}{N_0+d} - \frac{\Omega_{01} T}{4\pi} \ln \left(1 + \frac{d}{N_0} \right), \quad (4)$$

$$L_1(\lambda, \Omega) = L_0 + \frac{d}{N_0(N_0+d)} \left[\int_{\lambda}^T y^2(t, \Omega) dt - \int_{\lambda}^T y^2(t, \Omega_{01}) dt \right] - \frac{(T-\lambda)(\Omega-\Omega_{01})}{4\pi} \ln \left(1 + \frac{d}{N_0} \right).$$

Здесь $y(t, \Theta) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') h(t-t', \Theta) dt'$ – отклик фильтра на наблюдаемую реализацию $x(t)$ (2), такого, что его передаточная функция $H(\omega, \Theta)$ удовлетворяет условию $|H(\omega, \Theta)|^2 = 1$, если $|\omega| \leq \Theta/2$, и $|H(\omega, \Theta)|^2 = 0$, если $|\omega| > \Theta/2$, а λ, Ω – текущие значения неизвестных параметров λ_0, Ω_{02} соответственно. Тогда обобщенный максимально правдоподобный алгоритм обнаружения разладки запишется как [4, 5]

$$\max_{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2], \Omega \in [Y_1, Y_2]} L_1(\lambda, \Omega) - L_0 > c, \quad (5)$$

где c – порог, рассчитываемый согласно выбранному критерию оптимальности. С учетом (4) решающее правило (5) можно переписать следующим образом:

$$\max_{\substack{\lambda \in [\Lambda_1, \Lambda_2] \\ \Omega \in [Y_1, Y_2]}} \left\{ \int_{\lambda}^T [y^2(t, \Omega) - y^2(t, \Omega_{01})] dt - A(\Omega)(T-\lambda) \right\} > c', \quad (6)$$

где $A(\Omega) = [N_0(N_0+d)(\Omega-\Omega_{01})/4\pi d] \ln(1+d/N_0)$, $c' = cN_0(N_0+d)/d$.

Характеристики обнаружения

В качестве характеристик эффективности функционирования обнаружителя (5) будем рассматривать вероятности ошибки 1-го рода (ложной тревоги) α и 2-го рода (пропуска разладки) β [4, 5]. Не нарушая общности рассуждений, положим $a = 0$ и перепишем решающее правило (6) в виде

$$\max_{l \in [\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2], v \in [\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]} M(l, v) > \tilde{c}, \quad (7)$$

$$M(l, v) = M_1(l, v) - M_2(l) - S_3(l, v),$$

где

$$M_1(l, v) = \frac{T}{\mu_1 N_0} \int_l^1 y^2(\tilde{t}, \Omega_{01} v) d\tilde{t},$$

$$M_2(l) = \frac{T}{\mu_1 N_0} \int_l^1 y^2(\tilde{t}, \Omega_{01}) d\tilde{t}, \quad (8)$$

$$S_3(l, v) = (1-l)(v-1)(1+q)\ln(1+q)/q,$$

$$\tilde{t} = t/T, \quad l = \lambda/T, \quad v = \Omega/\Omega_{01}, \quad \tilde{\Lambda}_{1,2} = \Lambda_{1,2}/T,$$

$$\tilde{Y}_{1,2} = Y_{1,2}/\Omega_{01}, \quad \mu_1 = T\Omega_{01}/4\pi, \quad q = d/N_0,$$

$$\tilde{c} = c(1+q)/\mu_1 q - \text{нормированный порог.}$$

При выполнении (3) функционалы $M_1(l, v)$, $M_2(l)$ (а следовательно, и функционал $M(l, v)$) являются приближенно гауссовскими [4], т.е. допускают полное статистическое описание с помощью моментных или корреляционных функций первых двух порядков. С этой целью представим их в виде суммы регулярных и флуктуационных составляющих:

$$M_1(l, v) = S_1(l, v) + N_1(l, v), \quad M_2(l) = S_2(l) + N_2(l).$$

Здесь $S_1(l, v) = \langle M_1(l, v) \rangle$, $S_2(l) = \langle M_2(l) \rangle$ – регулярные, $N_1(l, v) = M_1(l, v) - \langle M_1(l, v) \rangle$, $N_2(l) = M_2(l) - \langle M_2(l) \rangle$ – флуктуационные составляющие, а усреднение $\langle \cdot \rangle$ осуществляется по всем возможным реализациям $x(t)$ при фиксированных значениях λ_0 , Ω_{02} . Путем непосредственного усреднения (8) находим

$$S_1(l, v) = v(1-l) + q \max(0, l_0 - l) \min(1, v) + q[1 - \max(l_0, l)] \min(v_{02}, v), \quad (9)$$

$$S_2(l) = 1 - l + q \max(0, l_0 - l) + q[1 - \max(l_0, l)] \min(1, v_{02}),$$

$$\langle N_1(l_1, v_1) N_1(l_2, v_2) \rangle = [\min(v_1, v_2)(1 - \max(l_1, l_2)) + q(2+q)\min(1, v_1, v_2)\max(0, l_0 - \max(l_1, l_2)) + q(2+q)\min(v_{02}, v_1, v_2)(1 - \max(l_0, l_1, l_2))] / \mu_1, \quad (10)$$

$$\langle N_2(l_1) N_2(l_2) \rangle = [1 - \max(l_1, l_2) + q(2+q)\max(0, l_0 - \max(l_1, l_2)) + q(2+q)\min(1, v_{02})(1 - \max(l_0, l_1, l_2))] / \mu_1,$$

где $l_0 = \lambda_0/T$, $v_{02} = \Omega_{02}/\Omega_{01}$.

Положим вначале, что разладка по ширине полосы частот процесса $\xi(t)$ (1) отсутствует, т.е. $\Omega_{01} = \Omega_{02}$. Тогда, используя (7)-(10), вероятность ложной тревоги

$$\alpha = P[\max M(l, v) > \tilde{c} | \Omega_{01} = \Omega_{02}], \quad l \in [\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2],$$

$v \in [\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]$ можно представить как

$$\alpha = P[\max_{l \in [\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2], v \in [\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]} M(l, v) > \tilde{c}]. \quad (11)$$

Здесь $M(l, v)$ – асимптотически (с увеличением μ_{\min} (3)) гауссовское случайное поле с регулярной составляющей

$$S(l, v) = \langle M(l, v) \rangle = (1-l) \times [(v-1)(1-(1+q)\ln(1+q)/q) + q \min(0, v-1)] \quad (12)$$

и корреляционной функцией флуктуационной составляющей $N(l, v) = M(l, v) - \langle M(l, v) \rangle$ вида

$$\langle N(l_1, v_1) N(l_2, v_2) \rangle = \min(1-l_1, 1-l_2) \times \{ \min(v_1-1, v_2-1) - \min(0, v_1-1, v_2-1) + (1+q)^2 [\min(0, v_1-1, v_2-1) - \min(0, v_1-1) - \min(0, v_2-1)] \} / \mu_1. \quad (13)$$

Из (12), (13) следует, что гауссовское случайное поле $M(l, v)$, $l \in [\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2]$, $v \in [\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]$ в статистическом смысле эквивалентно произведению

$$U(l') V(v'), \quad l' \in [1 - \tilde{\Lambda}_1, 1 - \tilde{\Lambda}_2], \quad v' \in [\tilde{Y}_1 - 1, \tilde{Y}_2 - 1] \quad (14)$$

статистически независимых гауссовских случайных процессов $U(l')$ и $V(v')$ с характеристиками

$$\langle U(l') \rangle = l', \quad \langle U(l'_1) U(l'_2) \rangle = \min(l'_1, l'_2), \quad (15)$$

$$\langle V(v') \rangle = v'(1 - (1+q)\ln(1+q)/q) + q \min(0, v'),$$

$$\langle V(v'_1) V(v'_2) \rangle = \{ \min(v'_1, v'_2) - \min(0, v'_1, v'_2) + (1+q)^2 \times [\min(0, v'_1, v'_2) - \min(0, v'_1) - \min(0, v'_2)] \} / \mu_1.$$

С учетом последнего замечания перепишем вероятность (11) в виде

$$\alpha = P[\max_{l' \in [1 - \tilde{\Lambda}_1, 1 - \tilde{\Lambda}_2]} U(l') \max_{v' \in [\tilde{Y}_1 - 1, \tilde{Y}_2 - 1]} V(v') > \tilde{c}]. \quad (16)$$

Введем для случайных процессов $U(l')$ и $V(v')$ функции распределения их наибольших максимумов

$$F_U(x) = P[\max_{l' \in [1 - \tilde{\Lambda}_1, 1 - \tilde{\Lambda}_2]} U(l') < x], \quad (17)$$

$$F_V(y) = P[\max_{v' \in [\tilde{Y}_1 - 1, \tilde{Y}_2 - 1]} V(v') < y]$$

на интервалах $[1 - \tilde{\Lambda}_1, 1 - \tilde{\Lambda}_2]$ и $[\tilde{Y}_1 - 1, \tilde{Y}_2 - 1]$ соответственно. Используя далее свойство статистической независимости процессов $U(l')$ и $V(v')$, представим вероятность α (16) как

$$\alpha = \int_0^{\infty} [1 - F_V(\tilde{c}/x)] dF_U(x). \quad (18)$$

Найдем функции $F_U(x)$, $F_V(y)$ (17). Согласно (15) $U(l')$ представляет собой гауссовский марковский (винеровский) случайный процесс с коэффициентами сноса K_{U1} и диффузии K_{U2} : $K_{U1} = 1$, $K_{U2} = 1$.

Функция распределения наибольшего максимума гауссовского марковского случайного процесса диффузионного типа с постоянными коэффициентами сноса и диффузии найдена в [4,7]. Используя результаты [7], для функции $F_U(x)$ (17) получаем

$$F_U(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\tilde{\Lambda}_1)}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\zeta-x+1-\tilde{\Lambda}_1)^2}{2(1-\tilde{\Lambda}_1)}\right] \times \\ \times \left[\Phi\left(\frac{\zeta-1+\tilde{\Lambda}_2}{\sqrt{1-\tilde{\Lambda}_2}}\right) - \exp(2\zeta) \left(1 - \Phi\left(\frac{\zeta+1-\tilde{\Lambda}_2}{\sqrt{1-\tilde{\Lambda}_2}}\right)\right) \right] d\zeta. \quad (19)$$

Для определения функции $F_V(y)$ (17) представим корреляционную функцию (15) процесса $V(v')$ в виде

$$\langle V(v'_1)V(v'_2) \rangle = \frac{1}{\mu_1} \begin{cases} b_1 \min(|v'_1|, |v'_2|), & v'_1 < 0, v'_2 < 0, \\ b_2 \min(v'_1, v'_2), & v'_1 > 0, v'_2 > 0, \\ 0, & v'_1 v'_2 \leq 0, \end{cases} \quad (20)$$

где $b_1 = (1+q)^2$, $b_2 = 1$. Из (20) можно видеть, что 1) на интервалах $[\tilde{Y}_1 - 1, 0)$ и $[0, \tilde{Y}_2 - 1]$ реализации процесса $V(v')$ являются некоррелированными, а следовательно, и асимптотически статистически независимыми как асимптотически гауссовские; 2) на каждом из интервалов $[\tilde{Y}_1 - 1, 0)$ и $[0, \tilde{Y}_2 - 1]$ корреляционная функция процесса $V(v')$ удовлетворяет условиям теоремы Дуба [8]; таким образом, случайный процесс $V(v')$ можно считать марковским, для коэффициентов сноса K_{V1} и диффузии K_{V2} которого находим

$$K_{V1} = \begin{cases} a_1, & v' < 0, \\ -a_2, & v' > 0, \end{cases} \quad K_{V2} = \frac{1}{\mu_1} \begin{cases} b_1, & v' < 0, \\ b_2, & v' > 0. \end{cases}$$

Здесь $a_1 = (1+q)[1 - \ln(1+q)/q]$, $a_2 = (1+q)\ln(1+q)/q - 1$, а b_1, b_2 определяются также как в (20).

Общее выражение для функции распределения наибольшего максимума гауссовского марковского случайного процесса со скачкообразно изменяющимися коэффициентами сноса и диффузии получено, например, в [9]. Используя результаты [9], для функции $F_V(y)$ (17) имеем

$$F_V(y) = \sqrt{\frac{\mu_1}{4\pi b_1(1-\tilde{Y}_1)}} \int_0^\infty \left\{ \exp\left[-\frac{\mu_1(y-\xi)^2}{4b_1(1-\tilde{Y}_1)}\right] \times \right. \\ \times \Phi\left[\sqrt{\mu_1} \frac{2a_2(1-\tilde{Y}_1)+y+\xi}{\sqrt{2b_1(1-\tilde{Y}_1)}}\right] - \exp\left(-\frac{2\mu_1 a_1 \xi}{b_1}\right) \times \\ \times \exp\left[-\frac{\mu_1(y-\xi)^2}{4b_1(1-\tilde{Y}_1)}\right] \Phi\left[\sqrt{\mu_1} \frac{2a_2(1-\tilde{Y}_1)+y-\xi}{\sqrt{2b_1(1-\tilde{Y}_1)}}\right] \left. \right\} \times \\ \times \left\{ \Phi\left[\sqrt{\mu_1} \left(a_2\sqrt{\tilde{Y}_2-1} + \frac{\xi}{\sqrt{\tilde{Y}_2-1}}\right)\right] - \exp(-2\mu_1 a_2 \xi) \times \right. \\ \left. \times \Phi\left[\sqrt{\mu_1} \left(a_2\sqrt{\tilde{Y}_2-1} - \frac{\xi}{\sqrt{\tilde{Y}_2-1}}\right)\right] \right\} d\xi. \quad (21)$$

Погрешность расчета значений вероятности ложной тревоги (11) с использованием формул (18), (19), (21) уменьшается с увеличением μ_{\min} (3).

Рассмотрим теперь случай, когда $\Omega_{01} \neq \Omega_{02}$, и представим вероятность пропуска разрядки как

$$\beta = P\left[\sup_{l \in [\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2], v \in [\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]} M(l, v) < \tilde{c} \mid \Omega_{01} \neq \Omega_{02} \right], \quad (22)$$

Перейдем к новым переменным $l' = 1 - l$, $v' = v - 1$ (14) и с учетом (9), (10) представим регулярную составляющую $S(l, v) = \langle M(l, v) \rangle$ и корреляционную функцию флуктуационной составляющей $N(l, v) = M(l, v) - \langle M(l, v) \rangle$ решаемой статистики $M(l, v)$ (7) в виде

$$S(l', v') = [1 - (1+q)\ln(1+q)/q] l' v' - \\ - q \min(0, l'_0 - l') \min(0, v') + \\ + q \min(l'_0, l') [\min(v'_{02}, v') - \min(0, v'_{02})], \quad (23)$$

$$\langle N(l'_1, v'_1) N(l'_2, v'_2) \rangle = (1/\mu_1) \{ \min(l'_1, l'_2) [\min(v'_1, v'_2) - \\ - \min(0, v'_1) - \min(0, v'_2)] + q(2+q) \times \\ \times \max(0, \min(l'_1, l'_2) - l'_0) [\min(0, v'_1, v'_2) - \\ - \min(0, v'_1) - \min(0, v'_2)] + q(2+q) \min(l'_0, l'_1, l'_2) \times \\ \times [\min(v'_{02}, v'_1, v'_2) + \min(0, v'_{02}) - \\ - \min(0, v'_{02}, v'_1) - \min(0, v'_{02}, v'_2)] \}.$$

Здесь $l'_0 = 1 - l_0$, $v'_{02} = v_{02} - 1$.

Заметим, что регулярная составляющая $S(l', v')$ имеет наибольший максимум в точке (l'_0, v'_{02}) . При этом реализации флуктуационной составляющей $N(l', v')$ непрерывны с вероятностью

стью 1. Тогда выходное отношение сигнал/шум для алгоритма (7) определится как [4,5]

$$z^2 = \frac{S^2(l'_0, v'_0)}{\langle N^2(l'_0, v'_0) \rangle} = \mu_1 l'_0 |v'_{02}| \left[1 - \frac{1+c_q}{q} \ln(1+q) \right]^2, \quad (24)$$

где $c_q = 0$ для $v'_{02} > 0$ и $c_q = q$ для $v'_{02} < 0$.

При не слишком малых значениях q и выполнении (3) из (24) следует, что $z^2 \gg 1$, а координаты (l'_m, v'_m) положения наибольшего максимума функционала $M(l', v')$ находятся в малой δ -окрестности точки (l'_0, v'_{02}) . С увеличением z^2 ($z^2 \rightarrow \infty$) величина этой окрестности $\delta = \max(|l' - l'_0|, |v' - v'_{02}|) \rightarrow 0$ [4,5], и для регулярной составляющей и корреляционной функции флуктуационной составляющей (23) справедливы асимптотические представления

$$S(l', v') = S_0 + S_1(l' - l'_0) + S_2(v' - v'_{02}) + o(\delta), \quad (25)$$

$$\langle N(l'_1, v'_1) N(l'_2, v'_2) \rangle = \sigma^2 + R_1(l'_1 - l'_0, l'_2 - l'_0) + R_2(v'_1 - v'_{02}, v'_2 - v'_{02}) + o(\delta),$$

где

$$S_0 = l'_0 v'_{02} \begin{cases} (1+q)[1 - \ln(1+q)/q], & v'_{02} > 0, \\ 1 - (1+q)\ln(1+q)/q, & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$S_1(x) = v'_{02} \begin{cases} x[1 - (1+q)\ln(1+q)/q] + q \min(0, x), & v'_{02} > 0, \\ x[1 - (1+q)\ln(1+q)/q] + q \max(0, x), & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$S_2(y) = l'_0 [y(1 - (1+q)\ln(1+q)/q) + q \min(0, y)],$$

$$\sigma^2 = \frac{l'_0 |v'_{02}|}{\mu_1} \begin{cases} (1+q)^2, & v'_{02} > 0, \\ 1, & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$R_1(x_1, x_2) = \frac{|v'_{02}|}{\mu_1} \begin{cases} \min(x_1, x_2) + q(2+q) \times \\ \times \min(0, x_1, x_2), & v'_{02} > 0, \\ \min(x_1, x_2) + q(2+q) \times \\ \times \max(0, \min(x_1, x_2)), & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$R_2(y_1, y_2) = \frac{l'_0}{\mu_1} \begin{cases} q(2+q) \min(0, y_1, y_2) + \\ + \min(y_1, y_2), & v'_{02} > 0, \\ q(2+q) [\min(0, y_1, y_2) - \min(0, y_1) - \\ - \min(0, y_2)] - \max(y_1, y_2), & v'_{02} < 0. \end{cases}$$

Следуя [5,10], введем в рассмотрение разностный функционал

$$\Delta(l', v') = M(l', v') - M_0,$$

где $M_0 = M(l'_0, v'_{02})$ – асимптотически (с ростом μ_{\min} (3)) гауссовская случайная величина с ха-

рактеристиками $\langle M_0 \rangle = S_0$, $\langle M_0^2 \rangle = \sigma^2$ (25), и

перепишем вероятность пропуска разладки (22) следующим образом

$$\beta = P \left[\sup_{\substack{l' \in [1-\tilde{\Lambda}_1, 1-\tilde{\Lambda}_2], \\ v' \in [\tilde{Y}_1-1, \tilde{Y}_2-1]}} \Delta(l', v') < \tilde{c} - M_0 \mid \Omega_{01} \neq \Omega_{02} \right] \quad (26)$$

Из (25) следует, что первые два момента функционала $\Delta(l', v')$ при $\delta \rightarrow 0$ определяются как

$$\langle \Delta(l', v') \rangle = S_{\Delta 1}(l' - l'_0) + S_{\Delta 2}(v' - v'_{02}) + o(\delta), \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \langle [\Delta(l'_1, v'_1) - \langle \Delta(l'_1, v'_1) \rangle] [\Delta(l'_2, v'_2) - \langle \Delta(l'_2, v'_2) \rangle] \rangle = \\ & = B_{\Delta 1}(l'_1 - l'_0, l'_2 - l'_0) + B_{\Delta 2}(v'_1 - v'_{02}, v'_2 - v'_{02}) + o(\delta), \end{aligned}$$

где

$$S_{\Delta 1}(x) = -|v'_{02}| \begin{cases} S_{11}|x|, & x < 0, \\ S_{12}x, & x \geq 0, \end{cases} \quad S_{\Delta 2}(y) = -l'_0 \begin{cases} S_{21}|y|, & y < 0, \\ S_{22}y, & y \geq 0, \end{cases}$$

$$B_{\Delta 1}(x_1, x_2) = \begin{cases} \sigma_{11}^2 \min(|x_1|, |x_2|), & x_1 < 0, x_2 < 0, \\ \sigma_{12}^2 \min(x_1, x_2), & x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \\ 0, & x_1 < 0, x_2 > 0 \text{ или } x_1 > 0, x_2 < 0, \end{cases} \quad (28)$$

$$B_{\Delta 2}(y_1, y_2) = \begin{cases} \sigma_{21}^2 \min(|y_1|, |y_2|), & y_1 < 0, y_2 < 0, \\ \sigma_{22}^2 \min(y_1, y_2), & y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, \\ 0, & y_1 < 0, y_2 > 0 \text{ или } y_1 > 0, y_2 < 0, \end{cases}$$

а

$$S_{11} = \begin{cases} S_{21}, & v'_{02} > 0, \\ S_{22}, & v'_{02} < 0, \end{cases} \quad S_{12} = \begin{cases} S_{22}, & v'_{02} > 0, \\ S_{21}, & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$S_{21} = (1+q)[1 - \ln(1+q)/q], \quad S_{22} = (1+q)\ln(1+q)/q - 1,$$

$$\sigma_{11}^2 = \frac{|v'_{02}|}{\mu_1} \begin{cases} (1+q)^2, & v'_{02} > 0, \\ 1, & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$\sigma_{12}^2 = \frac{|v'_{02}|}{\mu_1} \begin{cases} 1, & v'_{02} > 0, \\ (1+q)^2, & v'_{02} < 0, \end{cases}$$

$$\sigma_{21}^2 = l'_0 (1+q)^2 / \mu_1, \quad \sigma_{22}^2 = l'_0 / \mu_1.$$

Введем в рассмотрение статистически независимые гауссовские случайные процессы $r_1(l')$, $r_2(v')$ со средними значениями $\langle r_1(l') \rangle = S_{\Delta 1}(l' - l'_0)$, $\langle r_2(v') \rangle = S_{\Delta 2}(v' - v'_{02})$ (27) и корреляционными функциями (27)

$$\begin{aligned} & \langle [r_1(l'_1) - \langle r_1(l'_1) \rangle] [r_1(l'_2) - \langle r_1(l'_2) \rangle] \rangle = \\ & = B_{\Delta 1}(l'_1 - l'_0, l'_2 - l'_0), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \langle [r_2(v'_1) - \langle r_2(v'_1) \rangle] [r_2(v'_2) - \langle r_2(v'_2) \rangle] \rangle = \\ & = B_{\Delta 2}(v'_1 - v'_{02}, v'_2 - v'_{02}). \end{aligned}$$

При $\delta \rightarrow 0$ характеристики (27) функционала $\Delta(l', v')$ совпадают с соответствующими характеристиками суммы $r_1(l') + r_2(v')$. Тогда в условиях высокой апостериорной точности, когда $z^2 \gg 1$ (24), вероятность (26) можно приближенно представить следующим образом

$$\beta \approx P\left[\sup_{l' \in [l'_0 - \delta, l'_0 + \delta]} r_1(l') + \sup_{v' \in [v'_{02} - \delta, v'_{02} + \delta]} r_2(v') < \tilde{c} - M_0\right] = \int_{-\infty}^{\tilde{c}} w_0(u) \left[\int_0^{\tilde{c}-u} F_1(\tilde{c}-u-x) w_2(x) dx \right] du. \quad (29)$$

Здесь

$$w_2(x) = dF_2(x)/dx, \\ F_1(x) = P\left[\sup_{l' \in [l'_0 - \delta, l'_0 + \delta]} r_1(l') < x\right], \\ F_2(x) = P\left[\sup_{v' \in [v'_{02} - \delta, v'_{02} + \delta]} r_2(v') < x\right]$$

– функции распределения величин абсолютных максимумов случайных процессов $r_1(l')$ и $r_2(v')$,

$$w_0(u) = \exp\left[-(u - S_0)^2 / 2\sigma^2\right] / \sigma\sqrt{2\pi} = \exp\left[-(u/\sigma - z)^2 / 2\right] / \sigma\sqrt{2\pi} \quad (30)$$

– плотность вероятности случайной величины M_0 , а z и σ определяются из (24), (25), соответственно. В (29) учтено, что $w_2(x) = 0$ и $F_1(x) = 0$ при $x < 0$, так как $r_1(l'_0) = 0$ и $r_2(v'_{02}) = 0$.

Согласно (27), (28), значения гауссовского процесса $r_1(l')$ на интервалах $[l'_0 - \delta, l'_0]$ и $[l'_0, l'_0 + \delta]$, а также значения гауссовского процесса $r_2(v')$ на интервалах $[v'_{02} - \delta, v'_{02}]$ и $[v'_{02}, v'_{02} + \delta]$ некоррелированы и, следовательно, статистически независимы. Тогда

$$F_1(x) = F_{11}(x)F_{12}(x), \quad F_2(x) = F_{21}(x)F_{22}(x),$$

где

$$F_{11}(x) = P\left[\sup_{l' \in [l'_0 - \delta, l'_0]} r_1(l') < x\right], \\ F_{12}(x) = P\left[\sup_{l' \in [l'_0, l'_0 + \delta]} r_1(l') < x\right], \\ F_{21}(x) = P\left[\sup_{v' \in [v'_{02} - \delta, v'_{02}]} r_2(v') < x\right], \\ F_{22}(x) = P\left[\sup_{v' \in [v'_{02}, v'_{02} + \delta]} r_2(v') < x\right]. \quad (31)$$

Введем в рассмотрение случайные процес-

сы

$$\Delta_{11}(l') = x - r_1(l'_0 - l'), \quad \Delta_{21}(v') = x - r_2(v'_{02} - v'), \\ \Delta_{12}(l') = x - r_1(l' + l'_0), \quad \Delta_{22}(v') = x - r_2(v' + v'_{02}).$$

Из (27), (28) следует, что процессы $\Delta_{1i}(l')$, $\Delta_{2i}(v')$ при $l' \geq 0$, $v' \geq 0$ удовлетворяют условиям теоремы Дуба [8] и являются гауссовскими марковскими процессами с коэффициентами сноса $a_{li} = |v'_{02}|S_{li}$, $a_{vi} = l'_0S_{2i}$ и коэффициентами диффузии $b_{li} = \sigma_{li}^2$, $b_{vi} = \sigma_{2i}^2$. При этом согласно [5,10] искомые функции распределения (31) можно представить в виде

$$F_{1i}(x) = P\left[\sup_{l' \in [0, \delta]} \Delta_{1i}(l') > 0\right] = \int_0^{\infty} w_{1i}(y, \delta) dy, \\ F_{2i}(x) = P\left[\sup_{v' \in [0, \delta]} \Delta_{2i}(v') > 0\right] = \int_0^{\infty} w_{2i}(y, \delta) dy,$$

где плотности вероятности $w_{1i}(y, l')$, $w_{2i}(y, v')$ определяются из решения уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова [11] с коэффициентами сноса a_{li} , a_{vi} и диффузии b_{li} , b_{vi} с начальными условиями $w_{1i}(y, 0) = w_{2i}(y, 0) = \delta(x - y)$ и граничными условиями $w_{1i}(0, l') = w_{1i}(\infty, l') = w_{2i}(0, v') = w_{2i}(\infty, v') = 0$.

Решая эти уравнения и интегрируя решение как описано, например, в [10], с учетом (31) получаем

$$F_1(x) = f(x, S_{11}, \sigma_{11}^2) f(x, S_{12}, \sigma_{12}^2), \\ F_2(x) = f(x, S_{21}, \sigma_{21}^2) f(x, S_{22}, \sigma_{22}^2), \quad (32)$$

$$w_2(x) = v(x, S_{21}, \sigma_{21}^2) f(x, S_{22}, \sigma_{22}^2) + \\ + v(x, S_{22}, \sigma_{22}^2) f(x, S_{21}, \sigma_{21}^2)$$

при $x \geq 0$ и $F_1(x) = F_2(x) = 0$, $w_2(x) = 0$ при $x < 0$. Здесь величины S_{ij} , σ_{ij}^2 определяются из (28), а

$$f(x, a, b) = \Phi\left(\frac{a\delta + x}{\sqrt{b\delta}}\right) - \exp\left(-\frac{2ax}{b}\right) \Phi\left(\frac{a\delta - x}{\sqrt{b\delta}}\right), \quad (33)$$

$$v(x, a, b) = \frac{2a}{b} \exp\left(-\frac{2ax}{b}\right) \Phi\left(\frac{a\delta - x}{\sqrt{b\delta}}\right) + \\ + \sqrt{\frac{2}{\pi b\delta}} \exp\left[-\frac{(a\delta + x)^2}{2b\delta}\right].$$

Расчет вероятности (22) по формуле (29) с использованием (32), (33) на практике представляется весьма затруднительным (в силу сложности определения величины δ). Однако,

если выполняется условие $z^2 \gg 1$ (24), то в (32) без заметной потери в точности можно использовать асимптотические аппроксимации функций (33) вида [10]

$$f(x, a, b) = 1 - \exp(-2ax/b), \quad (34)$$

$$v(x, a, b) = (2a/b)\exp(-2ax/b).$$

Подставляя (34) в (32), затем (30), (32) в (29) и далее выполняя интегрирование по переменным x, u , после соответствующих преобразований имеем

$$\begin{aligned} \beta \approx & \Phi\left(\frac{\tilde{c} - S_0}{\sigma}\right) - \frac{2\chi_1^2 + \chi_1\chi_2 + 2\chi_2^2}{\chi_1\chi_2} X_1(\chi_1 + \chi_2) - \\ & - \frac{2\chi_1^2 - \chi_1\chi_2 + \chi_2^2}{\chi_2(\chi_2 - \chi_1)} X_1(\chi_1) - \frac{2\chi_2^2 - \chi_1\chi_2 + \chi_1^2}{\chi_1(\chi_1 - \chi_2)} X_1(\chi_2) - \\ & - X_2(\chi_1 + \chi_2) - X_2(\chi_1) - X_2(\chi_2). \end{aligned} \quad (35)$$

Здесь

$$\chi_1 = \frac{2\mu_1}{1+q} \left[1 - \frac{\ln(1+q)}{q} \right],$$

$$\chi_2 = 2\mu_1 \left[\frac{1+q}{q} \ln(1+q) - 1 \right],$$

$$X_1(x) = \exp\left[-x\left(\tilde{c} - S_0 - \frac{\sigma^2 x}{2}\right)\right] \Phi\left(\frac{\tilde{c} - S_0}{\sigma} - \sigma x\right),$$

$$\begin{aligned} X_2(x) = & x \left\{ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tilde{c} - S_0)^2}{2\sigma^2}\right] + \right. \\ & \left. + (\tilde{c} - S_0 - \sigma^2 x) X_1(x) \right\}. \end{aligned}$$

Точность формулы (35) возрастает с увеличением μ_{\min} (3) и z (24).

Результаты статистического моделирования

С целью определения погрешностей найденных приближенных формул для характеристик синтезированного алгоритма обнаружения выполнялось статистическое имитационное моделирование работы обнаружителя (6) на ЭВМ. В процессе моделирования на интервале $\tilde{t} \in [0, 1]$ (8) в дискретные моменты времени $\tilde{t}_k = k\Delta\tilde{t}$, $k = 0, \text{int}\{1/\Delta\tilde{t}\}$ для каждого значения $v_m = m\Delta\nu$ нормированной ширины полосы частот ν (8) формировались отсчеты $\tilde{y}_{km} = \tilde{y}(\tilde{t}_k, \Omega_{01}\nu_m) \sqrt{T/N_0}$ (8), как описано в [10]. По сформированным отсчетам \tilde{y}_{km} , следуя [10], вычислялись отсчеты

$M_{1nm} = M_1(n\Delta l, m\Delta\nu)$, $M_{2m} = M_1(n\Delta l, m_0\Delta\nu)$, $S_{3nm} = S_3(n\Delta l, m\Delta\nu)$ случайных полей $M_1(l, \nu)$, $M_2(l)$ (8) и детерминированной функции $S_3(l, \nu)$ (8) на интервалах $[\tilde{\Lambda}_1, \tilde{\Lambda}_2]$, $[\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2]$. Здесь значение m_0 соответствует частоте Ω_{01} , так что $m_0\Delta\nu = 1$. Шаг дискретизации по переменной \tilde{t} выбирался равным $\Delta\tilde{t} = 0,05/\mu_{\min}$, а по переменным l и ν – равным $\Delta l = \Delta\nu = 0,001$. В результате относительная среднеквадратическая погрешность ступенчатой аппроксимации функционала $M(l, \nu)$ (7) на основе сформированных отсчетов, рассчитанная по методике [12], не превышала 10 %.

В качестве эмпирической оценки вероятности ложной тревоги α (11) использовалась относительная частота превышения порога \tilde{c} (8) наибольшим из отсчетов $M_{nm} = M(n\Delta l, m\Delta\nu)$ при отсутствии разладки ширины полосы частот случайного процесса $\xi(t)$ (1). В качестве эмпирической оценки вероятности пропуска β (22) принималась относительная частота непревышения порога \tilde{c} наибольшим из отсчетов решающей статистики M_{nm} при наличии разладки ширины полосы частот.

На рис. 1, 2 представлены некоторые полученные в процессе статистического моделирования результаты, а также соответствующие им теоретические кривые. Для получения каждого экспериментального значения обрабатывалось не менее 10^4 реализаций $x(t)$ (2) при $\tilde{\Lambda}_1 = 0,1$, $\tilde{\Lambda}_2 = 0,9$, $\tilde{Y}_1 = 0,5$, $\tilde{Y}_2 = 2$. Это позволило с вероятностью 0,9 обеспечить отклонение границ доверительных интервалов от полученных экспериментальных данных не более чем на 15 %.

На рис. 1 сплошными линиями изображены рассчитанные по формулам (18), (19), (21) теоретические зависимости вероятности ложной тревоги α от величины порога c . Кривая 1 построена для $\mu_1 = 500$, $q = 0,75$, кривая 2 – $\mu_1 = 500$, $q = 0,25$, кривая 3 – $\mu_1 = 1000$, $q = 0,25$. Соответствующие экспериментальные значения вероятности ложной тревоги нанесены квадратами, крестиками и ромбами.

На рис. 2 сплошными линиями показаны рассчитанные по формуле (35) теоретические зависимости вероятности пропуска разладки β от величины параметра μ_1 (8). Расчет величин

ны порога s осуществлялся на основе (18), (19), (21) в соответствии с критерием Неймана-Пирсона при выбранном уровне вероятности ложной тревоги, равном 0,01. Кривая 1 построена для $q=3$, $l_0=0,5$, $v_{02}=1,5$, кривая 2 – $q=1$, $l_0=0,25$, $v_{02}=1,75$, кривая 3 – $q=3$, $l_0=0,5$, $v_{02}=1,75$, кривая 4 – $q=3$, $l_0=0,25$, $v_{02}=1,75$. Соответствующие экспериментальные значения вероятности пропуска разрядки нанесены квадратами, крестиками, ромбами и кружочками.

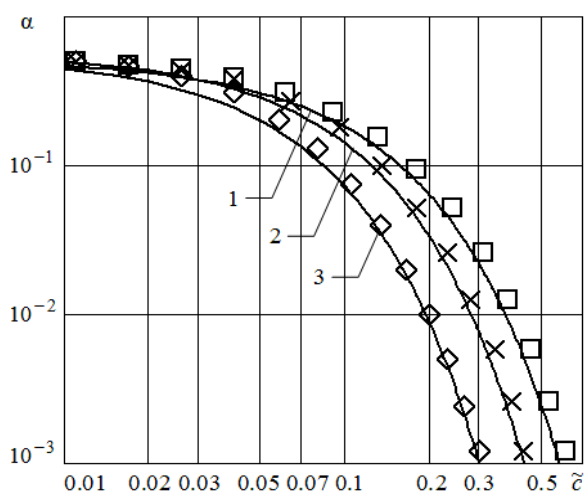


Рис. 1. Вероятность ложной тревоги

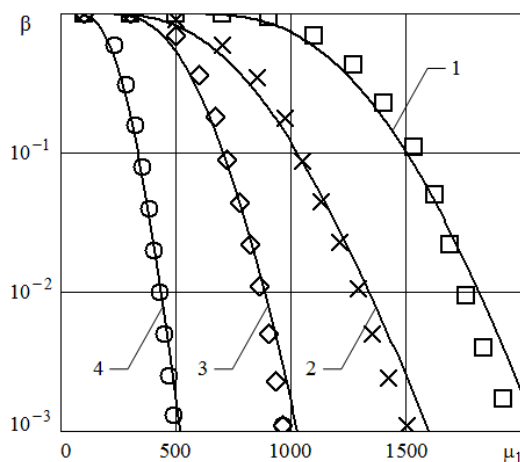


Рис. 2. Вероятность пропуска разрядки

Как следует из рис. 1, 2 и дополнительного проведенного анализа, полученные теоретические зависимости для вероятностей α (18), (19), (21) и β (35) хорошо соответствуют экспериментальным данным, по крайней мере, при $\mu_1 \geq 100$, $q \geq 0,1$, $\tilde{\Lambda}_1 \geq 0,1$, $\tilde{\Lambda}_2 \leq 0,9$, $|\Omega_{02} - \Omega_{01}|/\Omega_{01} \geq 0,1$.

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Синтезированный с использованием метода максимального правдоподобия и условия быстрых флуктуаций реализации наблюдаемых данных алгоритм обнаружения неизвестного скачкообразного изменения ширины полосы частот анализируемого случайного процесса допускает техническую реализацию, существенно более простую по сравнению с алгоритмами, получаемыми на основе известных подходов.

2. Характеристики алгоритмов обнаружения неизвестной разрядки ширины полосы частот быстрофлуктуирующего случайного процесса аналитически могут быть найдены с помощью мультипликативно-аддитивных обобщений метода локальной марковской аппроксимации на случай нескольких неизвестных разрывных параметров. При этом, в частности, отметим, что алгоритм обнаружения разрядки обеспечивает лучшее качество функционирования при скачкообразном увеличении ширины полосы частот.

3. Представленные теоретические результаты в широком диапазоне значений параметров случайного процесса хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными, полученными в ходе статистического компьютерного моделирования.

4. Как показывает дополнительный анализ, синтезированные на основе предложенного подхода обнаружители без заметных потерь в качестве функционирования могут использоваться также при приеме низкочастотных быстрофлуктуирующих негауссовских случайных процессов с неизвестными кусочно-постоянными частотными параметрами.

Литература

1. Жиглявский А.А., Красковский А.Е. Обнаружение разрядки случайных процессов в задачах радиотехники. Л.: ЛГУ, 1988. 224 с.
2. Клигене Н., Телькснис Л. Методы обнаружения моментов изменения свойств случайных процессов // Автоматика и телемеханика. 1983. Вып. 10. С. 5-56.
3. Basseville M., Nikiforov I.V., Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 447 p.
4. Трифионов А.П., Нечаев Е.П., Парфенов В.И. Обнаружение стохастических сигналов с неизвестными параметрами. Воронеж: ВГУ, 1991. 246 с.

5. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.

6. Chernoyarov O.V., Shahmoradian M.M., Kalashnikov K.S. The decision statistics of the Gaussian signal against correlated Gaussian interferences // 2016 International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences and Engineering (MCSEE2016): proceedings. Shenzhen, China, October 30-31, 2016. P. 426-431.

7. Литвиненко В.П., Черноярв О.В., Голпайегани Л.А. Вероятностные характеристики абсолютного максимума гауссовского случайного процесса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 59-62.

8. Kailath T. Some integral equations with nonrational kernels // IEEE Transactions on Information Theory. 1966. Vol. 12. No. 4. P. 442-447.

9. Statistical characteristics of the magnitude and location of the greatest maximum of Markov random process with piecewise constant drift and diffusion coefficients / O.V. Chernoyarov, A.V. Salnikova, A.E. Rozanov, M. Marcokova // Applied Mathematical Sciences. 2014. Vol. 8. No. 147. P. 7341-7357.

10. Application of the local Markov approximation method for the analysis of information processes processing algorithms with unknown discontinuous parameters / O.V. Chernoyarov, Sai Si Thu Min, A.V. Salnikova, B.I. Shakh-tarin, A.A. Artemenko // Applied Mathematical Sciences. 2014. Vol. 8. No. 90. P. 4469-4496.

11. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.

12. Захаров А.В., Трифонов А.П., Проняев Е.В. Обнаружение скачкообразного случайного возмущения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 6. С. 29-37.

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 21.03.2019

Информация об авторах

Матвеев Борис Васильевич – канд. техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: matveevzavkaf@mail.ru

Голпайегани Лейла Абдолмаджид – аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: leila.golpaiegany@gmail.com

Шахморadian Махди Мохмаджафар – аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: mehdi_shahmoradian@yahoo.com

DETECTING THE UNKNOWN STEPWISE CHANGE OF THE GAUSSIAN PROCESS BANDWIDTH

B.V. Matveev¹, L.A. Golpaiegani², M.M. Shahmoradian²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Abstract: the maximum likelihood algorithm is introduced for detecting the abrupt change of the bandwidth of a fast-fluctuating Gaussian random process. This algorithm can be technically implemented much simpler than the ones obtained by means of common approaches. The technique for calculating the characteristics of the synthesized detector is presented and the closed analytical expressions for the type I and II error probabilities are found through the multiplicative and additive local Markov approximation of the decision statistics and its increments. It is established that the presented algorithm for detecting the abrupt change provides a better performance when the bandwidth is stepwise increasing in contrast with when it is stepwise decreasing. By statistical simulation methods, it is confirmed that the considered method of the statistical analysis of the random processes with the abrupt changing characteristics is operable, while the theoretical formulas describing the quality and efficiency of detecting the bandwidth of abrupt change approximate satisfactorily the corresponding experimental data in a wide range of the parameters of the analyzed process. The additional analysis demonstrates that the detectors synthesized by means of the proposed approach can also be used when receiving low-frequency fast fluctuating non-Gaussian random processes with the unknown piecewise constant frequency parameters, without conspicuous losses in the performance

Key words: abrupt change of random process, unknown bandwidth, maximum likelihood method, discontinuous parameter, local-Markov approximation method, false alarm probability, missing probability, statistical simulation

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the project part of the state task for project No. 2.3208.2017 / 4.6.

References

1. Zhiglyavskiy A.A., Kraskovskiy A.E. "Detection of the abrupt change of random processes in radio engineering problems" ("Obnaruzhenie razladki sluchainykh protsessov v zadachakh radiotekhniki"), Leningrad, Leningrad State University, 1988, 224 p.
2. Kligene N., Telksnis L. "Methods to determine the times when the properties of random processes change", *Automation and Remote Control (Avtomatika i tememkhanika)*, 1983, vol. 41, no. 10, pp. 1241-1283.
3. Basseville M., Nikiforov I.V. "Detection of abrupt changes: theory and application", New Jersey, Prentice-Hall, 1993, 447 p.

4. Trifonov A.P., Nechaev E.P., Parfenov V.I. "Detection of stochastic signals with unknown parameters" ("Obnaruzhenie stokhasticheskikh signalov s neizvestnymi parametrami"), Voronezh, Voronezh State University, 1991, 246 p.
5. Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. "Joint discrimination of signals and estimation of their parameters against background" ("Sovmestnoe razlichenie signalov i otsenka ikh parametrov na fone pomekh"), Moscow, Radio i Svyaz', 1986, 264 p.
6. Chernoyarov O.V., Shahmoradian M.M., Kalashnikov K.S. "The decision statistics of the Gaussian signal against correlated Gaussian interferences", *Proceeding of the 2016 International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences and Engineering (MCSEE2016)*, Shenzhen, China, October 30-31, 2016, pp. 426-431.
7. Litvinenko V.P., Chernoyarov O.V., Golpaiegani L.A. "Probability characteristics of the absolute maximum of Gaussian random process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 59-62.
8. Kailath T. "Some integral equations with nonrational kernals", *IEEE Transactions on Information Theory*, 1966, vol. 12, no. 4, pp. 442-447.
9. Chernoyarov O.V., Salmnikova A.V., Rozanov A.E., Marcokova M. "Statistical characteristics of the magnitude and location of the greatest maximum of Markov random process with piecewise constant drift and diffusion coefficients", *Applied Mathematical Sciences*, 2014, vol. 8, no. 147, pp. 7341-7357.
10. Chernoyarov O.V., Sai Si Thu Min, Salmnikova A.V., Shakhtarin B.I., Artemenko A.A. "Application of the local Markov approximation method for the analysis of information processes processing algorithms with unknown discontinuous parameters", *Applied Mathematical Sciences*, 2014, vol. 8, no. 90, pp. 4469-4496.
11. Tikhonov V.I., Mironov M.A. "Markov processes" ("Markovskie protsessy"), Moscow, Sovetskoe Radio, 1977, 488 p.
12. Zakharov A.V., Pronyaev E.V., Trifonov A.P. "Detection of step random disturbance", *Proc. of the RAS. Theory and Systems of Control (Izvestiya Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya)*, 2001, no. 6, pp. 29-37.

Submitted 22.02.2019; revised 21.03.2019

Information about the authors

Boris V. Matveev, Cand. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: matveevzavkaf@mail.ru

Leyla A. Golpaiegani, Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia), e-mail: leila.golpaiegany@gmail.com

Mahdi M. Shahmoradian, Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia), e-mail: mehdi_shahmoradian@yahoo.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ПОЗИЦИЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

И.В. Остроумов, Д.В. Журавлев, И.С. Анисимов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются особенности фазоманипулированных сигналов, которые необходимо учитывать при разработке и совершенствовании методического обеспечения решения задач электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС), а именно: влияние на спектральные характеристики сигнала формы огибающей элементарной посылки; необходимость учета искажения формы сигнала в различных элементах радиопередатчиков и радиоприемных устройств; использование кодовых последовательностей и различных способов их обработки, в том числе применение сложных сигналов и согласованной фильтрации; сложный характер спектральной плотности мощности излучения (СПМИ), отличающийся от принятой при решении задач ЭМС колоколообразной формы. Рассмотренная тема особенно актуальна, если учитывать, что фазоманипулированные сигналы имеют очень широкую сферу применения. Общее же количество РЭС, использующих фазоманипулированные сигналы, например, стандартов IEEE 802.11 (в том числе: b, c, f, g, i, k, l, m, n) или GSM (сигнал которого также может быть представлен в виде фазоманипулированного сигнала с особой (Гауссовой) формой огибающей элементарной посылки), на территории РФ исчисляется десятками миллионов

Ключевые слова: спектральная плотность, мощность излучения, огибающая элементарной посылки сигнала, ЭМС

Введение

Порядка пяти десятилетий насчитывает история использования фазоманипулированных сигналов. Высокая эффективность, так необходимая системам приема и передачи информации, составляющим сейчас абсолютное большинство разрабатываемых и вводимых в эксплуатацию РЭС, способствует широкому распространению таких сигналов, а также развитию технологической базы их использования. Так, сигналы с фазовой манипуляцией применяются в системах радиорелейной, космической и сотовой связи, в сетях беспроводного доступа. Стоит отметить, что бинарная и четырехпозиционная фазовая манипуляция (BPSK и QPSK), а также прямое расширение спектра (DSS) и применение сверточных кодов (т.е. согласованная фильтрация) предусматриваются спецификациями стандартов IEEE 802.11 [1], которые реализуются в том числе и в РЭС военного назначения.

Общее же количество РЭС, использующих фазоманипулированные сигналы, например, стандартов IEEE 802.11 (в том числе: b, c, f, g, i, k, l, m, n) или GSM (сигнал которого также может быть представлен в виде фазоманипулированного сигнала с особой (Гауссовой) формой огибающей элементарной посыл-

ки), на территории РФ исчисляется десятками миллионов [2].

Исследование проблематики электромагнитной совместимости (ЭМС)

Проблеме обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств (РЭС), использующих фазоманипулированные сигналы, уделялось и уделяется значительное внимание. Однако большое разнообразие существующих форм технических реализаций радиоэлектронных систем, использующих сигналы с фазовой манипуляцией, не позволило получить однозначные общепринятые решения ряда задач ЭМС, для которых параметры, особенности формирования и обработки сигналов имеют существенное значение.

Достаточно мощным инструментом исследований по проблематике ЭМС является теория оптимальных методов приема, основы которой заложены в работах В.А. Котельникова [3], Ф. Вудворда [4] и развиты в более поздних работах отечественных и зарубежных ученых. Созданная на базе математической статистики она позволяет на этапе проектирования находить оптимальные структуры радиосистем по показателям помехоустойчивости на основе исследования свойств сигналов и различных методов их обработки. Данный математический аппарат использовался для решения всех

задач обеспечения ЭМС, связанных с учетом процессов формирования и обработки фазоманипулированных сигналов. Также для решения задач ЭМС широко применяются другие методические подходы, основанные на натурных испытаниях, или на разработке имитационных моделей процессов формирования и обработки сигналов в радиоэлектронных устройствах в случаях, когда проведение натурных испытаний не было целесообразно в силу высокой стоимости.

Важно подчеркнуть, что имелся ряд объективных причин, сдерживающих развитие методологии исследований в области ЭМС РЭС в 70-е – 80-е годы XX века. Среди них: малая мощность вычислительных машин, большая погрешность результатов измерения параметров РЭС, недостаточный объем исходных данных, необходимых для решения задач ЭМС и др. Как следствие явилось то, что при формировании моделей, используемых в ранее разработанных методиках решения задач ЭМС, основанных на математическом и имитационном моделировании, допускались предположения, существенно упрощающие проводимые вычисления и уменьшающие объем используемых данных, что шло в ущерб достоверности результатов, необходимость уточнения которых усиливается обострением проблемы обеспечения ЭМС в связи с ростом числа эксплуатируемых РЭС.

Фазоманипулированные сигналы представляют собой последовательность элементарных посылок, каждая из которых характеризуется одним из фиксированных значений фазы (два значения для бинарных сигналов, четыре – для четырехпозиционных и т.д.). На видеочастоте каждая элементарная посылка представима в виде импульса либо прямоугольной формы в простейшем случае, либо скругленной за счет фильтрации и искажений в элементах передающего тракта, либо целенаправленно задаваемой формы специального вида (гауссовой, синусоидальной и пр.).

Спектральные характеристики фазоманипулированных сигналов, посредством которых в основном и определяется влияние вида и параметров манипуляции сигналов на ЭМС РЭС, зависят от длительности и формы огибающей элементарной посылки. При этом, если зависимость спектральных характеристик от длительности элементарной посылки является однозначной (ширина спектра обратно пропорциональна длительности элементарной посылки), то влияние формы огибающей более

сложно, но не менее существенно. На рис. 1 представлен бинарный фазоманипулированный сигнал с прямоугольной огибающей элементарной посылки (мгновенное переключение фазы) на оси времени и его спектральная характеристика, имеющая характер функции $\frac{\sin(x)}{x}$. На рис. 2 представлен сигнал с такими же характеристиками, как на рис. 1, но уже с синусоидальной огибающей элементарной посылки, дополнительно искаженной полосовой фильтрацией.



Рис. 1. Спектральная характеристика сигнала с прямоугольной огибающей элементарной посылки



Рис. 2. Спектральная характеристика сигнала с синусоидальной огибающей элементарной посылки

При одной и той же скорости передачи информации ширина СПМИ данных фазоманипулированных сигналов отличается по уровню минус 20 дБ примерно в 2.5 раза, по уровню минус 30 дБ в 7.4 раза и по уровню минус 40 дБ в 17,3 раза, что соответствующим образом сказывается как на уровне НРП, создаваемых внеполосным излучением РЭС, использующих такие сигналы, так и на значении необходимого частотного разнеса с этими РЭС.

Появление новых форм огибающей элементарной посылки требует проведения дополнительных исследований, уточняющих характеристики таких сигналов, влияющие на ЭМС. Для решения задач ЭМС необходимы дальнейшие исследования по учету искажений сигналов при прохождении через различные элементы радиопередающих и радиоприемных устройств.

Например, не исследовано влияние на форму огибающей элементарной посылки и частотные характеристики фазоманипулированных сигналов амплитудных искажений в усилительном тракте передатчика. Эффект амплитудно-фазовой конверсии, заключающийся в неоднородном смещении фазы сигнала в зависимости от амплитуды, достигающей 40-60 градусов, приводит к расширению спектра излучаемого сигнала, что сильно уменьшает эффективность мер по снижению уровня внеполосных излучений фазоманипулированных сигналов за счет сглаживания переходных процессов скачков фазы.

Наряду с формой огибающей элементарной посылки на спектральные характеристики фазоманипулированных сигналов оказывает влияние передаваемая последовательность символов. Наиболее существенно сказываются устойчиво повторяющиеся комбинации символов, наличие которых может быть вызвано характером передаваемой информации или используемыми методами кодирования. Отсутствие скачков фазы или каких-либо переходных процессов на интервале в N элементарных посылок соответствует фазоманипулированному сигналу, имеющему в N раз большую длительность элементарной посылки и, соответственно, в N раз более узкий спектр. Другой крайний случай представлен на рис. 3, на котором изображен сигнал, аналогичный сигналу рис. 2, но с информационной последовательностью в виде меандра.

Спектр такого сигнала представляет из себя всего две составляющие, отстоящие от несущей f частоты на величины $+1/2\tau$ и $-1/2\tau$, где τ - длительность элементарной посылки сигнала, как показано на рис. 3. При этом внеполосные составляющие отсутствуют полностью.

Повторяющиеся последовательности импульсов необходимо учитывать и при рассмотрении сложных фазоманипулированных сигналов, то есть сигналов с большой базой [5], у которых каждый передаваемый бит информации может быть представлен не одной элементарной посылкой, а целой серией импульсов, заданным образом изменяющих значения фазы. Для деманипуляции сложных сигналов используются методы корреляционной обработки, что позволяет получить энергетический выигрыш в защитном отношении к «белому шуму» в $2B$ раз, где B - значение базы сигнала.

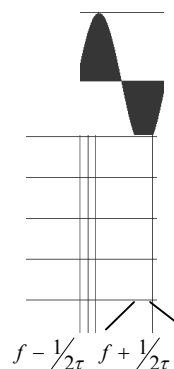


Рис. 3. Вид на оси времени и спектр фазоманипулированного сигнала с синусоидальной огибающей элементарной посылки и информационной составляющей в виде меандра

Этот теоретический результат, являющийся основой обоснования эффективности и целесообразности использования сложных сигналов, к сожалению, нельзя распространить на другие виды помех, особенно близкие по структуре полезному сложному сигналу.

Данная проблема, в частности, возникает в системах связи при использовании кодового разделения каналов, когда друг другу создают помехи РЭС, работающие в одном частотном диапазоне и использующие близкие по структуре или даже аналогичные сигналы.

Для учета влияния спектральных характеристик используемых сигналов и частотных

характеристик элементов радиоэлектронных устройств при решении задач ЭМС применяются модели, использующие различные аппроксимации. Стандартные аппроксимации имеют симметричную, монотонно убывающую относительно значения отстройки форму: колоколообразную или в виде трапеции. Реальные характеристики сигналов отличаются от традиционных моделей. В частности спектр фазоманипулированного сигнала имеет множество локальных максимумов, как видно из рис. 1. Такой же вид имеет и АЧХ согласованного фильтра радиоприемника сложных фазоманипулированных сигналов, который так же, как и фильтр основной селекции, обладает частотной избирательностью, которая могла бы учитываться при решении задач ЭМС.

Спектральная плотность мощности излучения (СПМИ) возможных источников непреднамеренных радиопомех (НРП) для радиоэлектронных систем, использующих фазоманипулированные сигналы, также часто отличается от форм, которые могли бы быть адекватно аппроксимированными колоколообразной или трапециидальной функциями.

На рис. 4, 5, 6 представлены результаты измерения СПМИ сложных форм. На рис. 4, представляющем излучение передатчика линейно-частотно манипулированного (ЛЧМ) сигнала: на границах основной полосы излучения СПМИ довольно быстро спадает, однако на низких энергетических уровнях, еще значимых при решении задач ЭМС, имеет место существенное расширение спектра, вызванное значительным внеполосным шумовым излучением. На рис. 5 СПМИ частотно-манипулированного сигнала имеет явно выраженный провал. На рис. 6 СПМИ составного сигнала сложной структуры (аналогового телевизионного) имеет явную асимметрию, помимо ярко выраженных локальных экстремумов на всем занимаемом диапазоне частот [6].

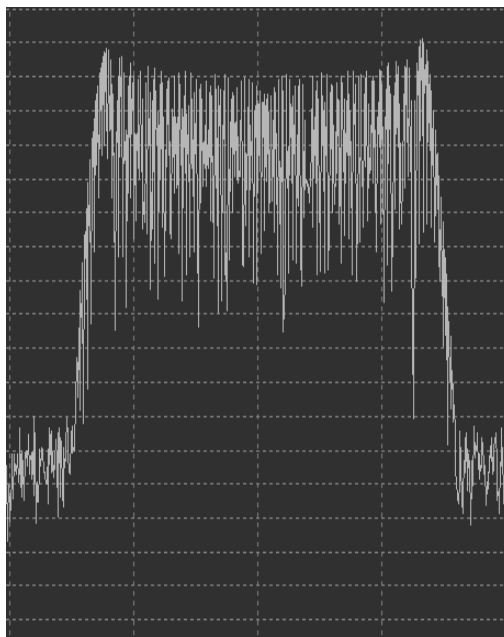


Рис. 4. Пример спектральной характеристики с существенным расширением на низких энергетических уровнях

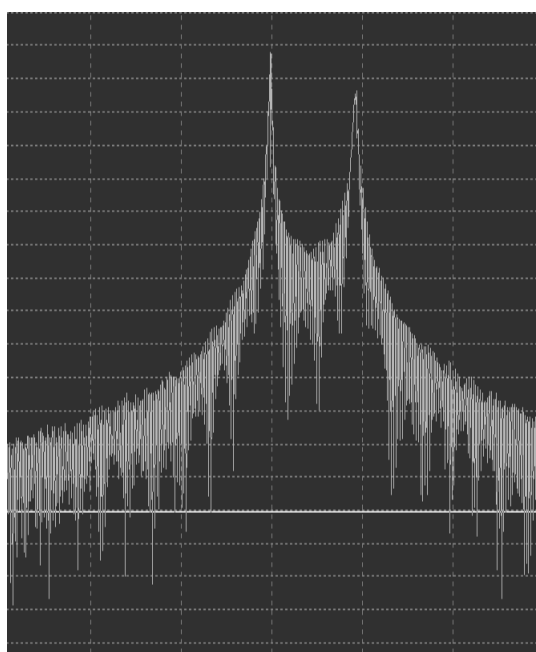


Рис. 5. Пример спектральной характеристики с явно выраженным провалом

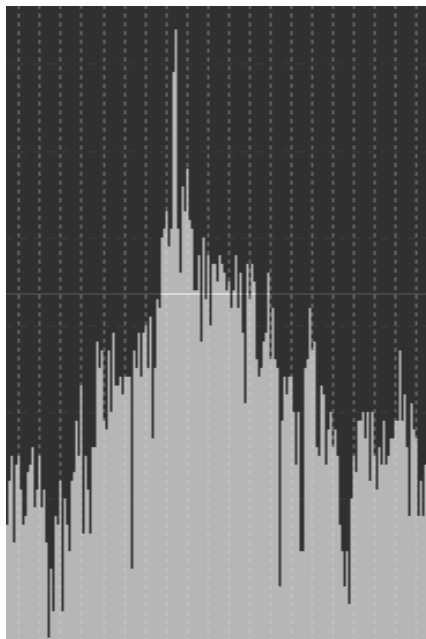


Рис. 6. Пример асимметричной спектральной характеристики сложной формы

Развитие моделей, применяемых для решения задач ЭМС спектральных характеристик, позволило бы повысить точность соответствующего методического обеспечения [7].

Исходя из вышеуказанного в рамках поставленных задач исследований на основании проведенного анализа состояния методического обеспечения решения задач ЭМС был сформирован перечень частных задач, включающий:

- разработку модели формирования фазоманипулированных сигналов;
- разработку модели воспроизведения отклика на выходе деманипулятора приемника фазоманипулированных сигналов, в том числе и сложных;
- разработку модели системы связи фазоманипулированными сигналами, основанной на разработанных моделях формирования фазоманипулированных сигналов и воспроизведения отклика на выходе деманипулятора приемника;
- разработку модели помеховых воздействий на систему связи фазоманипулированными сигналами, основанной на разработанных моделях формирования фазоманипулированных сигналов и воспроизведения отклика на выходе деманипулятора приемника;

- разработку методики формирования ограничительной линии внеполосных излучений на основе разработанной модели формирования фазоманипулированных сигналов;

- разработку методики определения НШПЧ фазоманипулированных сигналов, используемых в системах связи, основанной на разработанной модели системы связи фазоманипулированными сигналами;

- разработку методики расчета ЗО с помощью разработанной модели помеховых воздействий на систему связи фазоманипулированными сигналами;

- разработку методического обеспечения определения ослабления радиопомехи за счет ее отстройки от частоты настройки приемника, позволяющего использовать аппроксимации СПМИ передатчика и АЧХ приемника сложных форм, в том числе, имеющих множество локальных экстремумов, несимметричность и пр.;

- проведение сопоставительного анализа и верификации различных аналитических моделей СПМИ передатчика и АЧХ приемника на основе результатов, получаемых с помощью разработанных моделей, имитирующих процессы формирования и обработки фазоманипулированных сигналов;

- разработку предложений по изменению методики расчета норм ЧТР РЭС, а также оценку эффективности предлагаемых изменений.

Результатом решения данных вспомогательных задач является комплекс моделей и методического обеспечения, образующий систему, представленную на рис. 7. Общая универсальная модель полосового фильтра, объединяющая ряд фильтров Баттерворта различных порядков, используется в моделях передающего и приемного устройств, которые в свою очередь входят в состав модели системы связи фазоманипулированными сигналами. Модель помеховых воздействий на систему связи основана на модели системы приема и передачи информации, дополненной моделью формирования мешающего сигнала, которая является расширенной версией модели формирования фазоманипулированного сигнала.

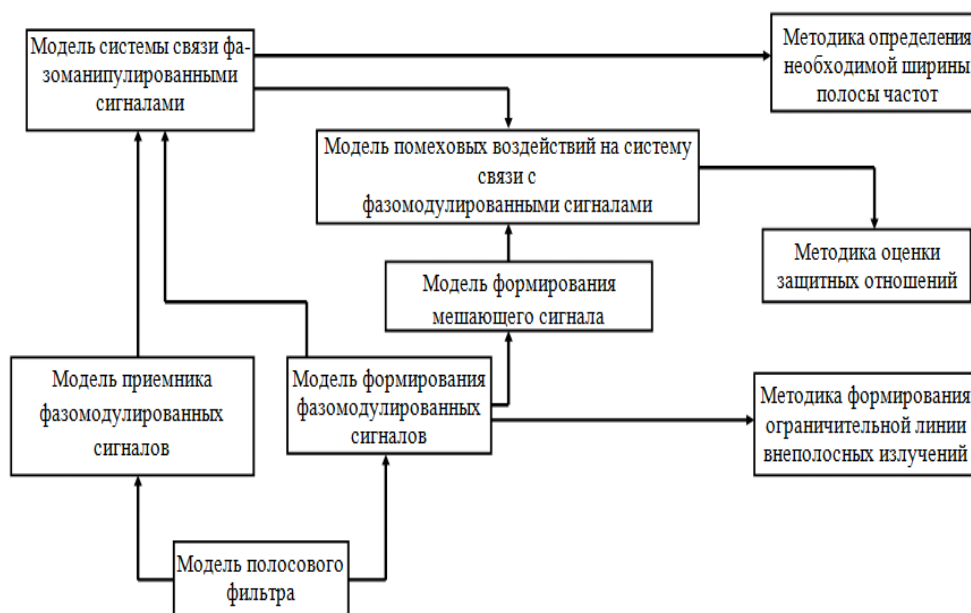


Рис. 7. Система взаимосвязи разработанных моделей и методик

Заключение

В этой статье были рассмотрены особенности фазоманипулированных сигналов с позиций решения задач анализа и обеспечения ЭМС РЭС. При разработке и совершенствовании методического обеспечения решения задач ЭМС РЭС необходимо учитывать особенности фазоманипулированных сигналов:

влияние на спектральные характеристики сигнала формы огибающей элементарной посылки;

необходимость учета искажения формы сигнала в различных элементах радиопередающих и радиоприемных устройств;

использование кодовых последовательностей и различных способов их обработки, в том числе применение сложных сигналов и согласованной фильтрации;

сложный характер СПМИ, отличающийся от принятой при решении задач ЭМС колоколообразной формы. Рассмотренная тема особенно актуальна, если учитывать, что фазоманипулированные сигналы имеют очень широкую сферу применения. Количество РЭС, использующих такие сигналы, только в РФ уже исчисляется десятками миллионов, и это число постоянно увеличивается, что делает проблему обеспечения их ЭМС чрезвычайно актуальной [8].

Литература

1. Protograph-based raptor-like LDPC codes / T.Y. Chen, K. Vakulinia, D. Divsalar, and R.D. Wesel // IEEE Trans. Commun. 2015. Vol. 63. № 5. Pp. 1522-1532.
2. Lugosch L. and Gross W.J. Neural offset min-sum decoding // in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory. 2017. Pp. 1361-1365.
3. Deep learning methods for improved decoding of linear codes / E. Nachmani, E. Marciano, L. Lugosch, W.J. Gross, D. Burshtein, and Y. Be'ery // IEEE J. Sel. Topics Signal Process. 2018. Vol. 12. № 1. Pp. 119-131.
4. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., and ten Brink S. On deep learning- based channel decoding // in Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS). 2017, Pp. 1-6.
5. Остроумов И.В. Исследование поведения радиопомех в системах передачи дискретной информации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 102-104.
6. Остроумов И.В. Разработка имитационных моделей систем передачи дискретной информации с использованием простых и сложных фазо- и частотно-манипулированных сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 74-76.
7. Способы формирования OFDM – радиосигнала / И.В. Остроумов, А.В. Ситников, И.В. Свиридова, А.В. Муратов // Радиотехника. 2014. № 6. С. 67 – 69.
8. On deep learning- based channel decoding / T. Gruber, S. Cammerer, J. Hoydis, and S. ten Brink // in Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS). 2017. Pp. 1-6.

Информация об авторах

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Журавлев Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ddom@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

Анисимов Иван Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

STUDY OF THE FEATURES OF PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS IN TERMS OF SOLVING THE TASKS OF ANALYSIS AND ENSURING ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO ELECTRONIC DEVICES

I.V. Ostroumov, D.V. Zhuravlev, I.S. Anisimov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article, we consider the features of phase-shift keyed signals that must be taken into account when developing and improving the methodological support for solving EMC problems in a radio electronic system, namely: the effect on the spectral characteristics of a signal of the envelope shape of an elementary parcel; the need to take into account the distortion of the waveform in the various elements of radio transmitters and receiving devices; the use of code sequences and various ways of processing them, including the use of complex signals and matched filtering; the complex nature of the SPMI, which differs from that of the bell-shaped form adopted in solving EMC problems. This topic is particularly relevant, given that phase-shift keyed signals have a very wide scope of application. The total number of RESs using phase-shift keyed signals, for example, IEEE 802.11 standards (including: b, c, f, g, i, k, l, m, n) or GSM (the signal of which can also be represented as a phase-shift keyed signal with a special (Gaussian) form of the elementary parcel envelope), in the territory of the Russian Federation it is estimated in tens of millions

Key words: spectral density, radiation power, elementary signal envelope, EMC

References

1. Chen T.Y., Vakulinia K., Divsalar D., Wesel R.D. "Protograph-based raptor-like LDPC codes", *IEEE Trans. Commun.*, 2015, vol. 63, no. 5, pp. 1522-1532
2. Lugosch L., Gross W.J. "Neural offset min-sum decoding", *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, 2017, pp. 1361-1365.
3. Nachmani E., Marciano E., Lugosch L., Gross W.J., Burshtein D., Be'ery Y. "Deep learning methods for improved decoding of linear codes", *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 119-131.
4. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., ten Brink S. "On deep learning-based channel decoding", *Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS)*, 2017, pp. 1-6.
5. Ostroumov I.V. "Investigation of radio interference behavior in discrete information transmission systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 102-104.
6. Ostroumov I.V. "Development of simulation models of discrete information transmission systems using simple and complex phase and frequency-manipulated signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 74-76.
7. Ostroumov I.V., Sitnikov A.V., Sviridova I.V., Muratov A.V. "Methods of forming OFDM - radio signal", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 6, pp. 67-69.
8. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., ten Brink S. "On deep learning-based channel decoding", *Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS)*, 2017, pp. 1-6

Submitted 22.02.2019; revised 12.04.2019

Information about the authors

Ivan V. Ostroumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ddom@bk.ru

Ivan S. Anisimov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pilot7mig@yandex.ru

ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ УЧЕБНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

И.А. Кирпичева, А.В. Останков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: создание качественных учебных материалов по радиотехническим дисциплинам требует генерации многовариантных исходных данных для лабораторных работ, расчетных упражнений, курсового проектирования. Исходные данные должны быть привязаны к номеру варианта и обеспечивать покрытие всей области допустимых значений результата. Поскольку число исходных данных в рамках задачи велико, то их поиск сводится к решению недоопределенной системы уравнений. В работе предлагается свести решение системы к задаче нелинейного программирования. Целевая функция при этом определяется как абсолютная разница между фактическим и требуемым результатом с учетом ограничений на величину исходных данных. Поиск минимума многоэкстремальной целевой функции с большим числом аргументов рекомендуется выполнять с помощью апробированной версии генетического алгоритма. На основе описанного методического приема реализованы вычислительные алгоритмы генерации исходных данных для разных радиотехнических задач. Представлена постановка, реализация и результаты генерации для двух задач. В первом случае осуществляется выбор номинальных значений параметров источников напряжения и тока, а также радиоэлементов сложной электрической цепи, обеспечивающих априорно заданные параметры напряжения на ключевом элементе. В рамках второй задачи реализован структурный синтез комбинационной схемы с заданной логической функцией (таблицей истинности). Его особенностью является использование числовых идентификаторов, соответствующих логическим функциям и элементам. Сгенерированные многовариантные исходные данные получили практическое использование в учебном процессе

Ключевые слова: исходные данные, генерация, нелинейное программирование, целевая функция, генетический алгоритм

Введение

При разработке учебных материалов, предназначенных для методической поддержки лабораторных работ, практики, курсового проектирования по техническим дисциплинам, нередко возникает потребность в генерации автором учебного материала многовариантных исходных данных.

Исходные данные к учебным радиотехническим задачам в большинстве случаев должны быть такими, чтобы гарантировать априорно известный результат, например, в виде конкретных параметров информационных или вспомогательных сигналов на элементах цепи [1], таблицы истинности синтезируемой комбинационной схемы и тому подобное. Кроме того, результат, получаемый на основе таких исходных данных при учебном исследовании или разработке, должен быть однозначно привязан к номеру варианта так, чтобы вся совокупность вариантов равномерно покрывала заданную область допустимых значений конечного результата [2]. Исходные данные, удовлетворяющие таким условиям, назовём оптимальными.

Предположим, что число искомым величин, совокупно определяющих исходные дан-

ные, является достаточно большим и поэтому избыточным для простого и однозначного их расчёта на основе математических или логических соотношений, описывающих конкретную радиотехническую задачу. Поэтому результатом генерации исходных данных являются переменные, число которых больше количества уравнений, составленных на их основе. Исходные данные, удовлетворяющие такому условию, назовём избыточными.

Целью работы является создание и апробация численного алгоритма для генерации оптимальных многовариантных исходных данных в условиях их избыточности.

Методы достижения цели

Пусть искомые переменные радиотехнической задачи, в первом приближении, связаны между собой системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что характерно только для линейных цепей, схем и систем. Заметим, что данное ограничение не является критическим и далее может быть снято, однако позволяет более наглядно продемонстрировать преимущества разработанного алгоритма генерации. Пусть количество искомым переменных составляет N , число независимых уравнений, их связывающих и определяющих полезный ре-

зультат, равно M , причём выполняется неравенство: $M < N$.

Первым способом решения СЛАУ с числом уравнений, меньшим числа неизвестных, является подход, при котором значения $(N - M)$ переменных предварительно задают. Недостатком такого подхода является то, что конечный результат либо не всегда может быть гарантирован, либо он достижим, но отдельные искомые параметры могут принимать физически нереализуемые значения или значения вне возможных областей локализации переменных [3].

Вторым возможным способом решения задачи является введение ограничений на величину $(N - M)$ переменных. Недостатком такого подхода является нелинейный характер результирующей системы уравнений (за счёт введения ограничений), для решения которой следует использовать специальные методы и вводить корректные начальные приближения.

Третий возможный подход заключается в решении задачи методом нелинейного программирования. При этом в рамках технической задачи формируется конкретная целевая функция, определяющая, как правило, конечный результат, и являющаяся нелинейной функцией всех искомых переменных [4]. Ограничения на величину переменных удобно реализовать в виде барьерных функций, подменяющих собой целевую функцию при выходе какой-либо искомой переменной за границы области локализации её значений.

Для численного поиска экстремума целевой функции при малом числе переменных и относительно узкой области их определения можно использовать последовательный поиск, при большом числе переменных и широкой области локализации их значений – методы, основанные на случайном поиске с самообучением, например, эволюционные методы [5].

Итак, рассматривается произвольная радиотехническая задача с N исходными данными. Каждая исходная переменная характеризуется числовым значением или идентификатором (если переменная отождествляется с каким-либо действием) x_i , где $i = 1 \dots N$. Значения переменных x_i должны быть подобраны так, чтобы гарантировать требуемый и заранее известный результат $Y_{тр}$, который является функцией с аргументами x_i . В процессе подбора подходящих значений переменных x_i получаемый фактический результат $Y_{ф}(x_i)$ сравнивается с требуемым $Y_{тр}$. При совпадении текущего фактического результата $Y_{ф}(x_i)$ с требуемым $Y_{тр}$ процесс поиска завершается.

Рассматриваемая задача относится к классической оптимизационной задаче. Переменными в такой задаче являются числовые значения или идентификаторы искомых исходных данных x_i , где $i = 1 \dots N$. В качестве основы для целевой функции следует взять абсолютную разность между фактическим результатом $Y_{ф}(x_i)$ и требуемым $Y_{тр}$:

$$F_{ц}(x_i) = |Y_{ф}(x_i) - Y_{тр}|. \quad (1)$$

Целевую функцию $F_{ц}(x_i)$ следует определять в соответствии с (1) только в том случае, когда переменные x_i , где $i = 1 \dots N$, в процессе поиска их оптимальных значений не выходят за пределы априорно заданной области значений: $(x_{i \min}, x_{i \max})$. Если какая-либо искомая переменная x_i на текущем шаге поисковой процедуры выходит за границы области допустимых значений $(x_{i \min}, x_{i \max})$, то целевую функцию следует заменить барьерной функцией экспоненциального вида, принимающей тем большие значения, чем значительней отличается переменная от нижней или верхней границы области допустимых значений:

$$F_{б}(x_i) = \begin{cases} \exp[\alpha \cdot (x_{i \min} - x_i)], & x_i < x_{i \min} \\ \exp[\alpha \cdot (x_i - x_{i \max})], & x_i > x_{i \max} \end{cases} \quad (2)$$

где α — коэффициент, характеризующий рост барьерной функции.

Поиск минимума целевой функции целесообразно реализовать с использованием одной из модификаций генетического алгоритма [6], неоднократно использованной авторами для решения оптимизационных задач теории и техники антенных решёток [7-8].

Результаты генерации исходных данных для лабораторной работы по теории цепей

Лабораторный практикум по теории цепей для студентов специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" включает лабораторную работу "Принцип наложения и теорема об эквивалентном источнике" [2]. Цель работы заключается в экспериментальной проверке применимости метода наложения и теоремы об эквивалентном источнике напряжения к анализу сложной электрической цепи в режиме гармонических колебаний.

Схема исследуемой сложной линейной цепи показана на рис. 1. Она включает:

1) источник напряжения с амплитудой E_m и нулевой начальной фазой гармонической ЭДС частоты f_c , обладающий внутренним сопротивлением R_c ;

2) источник тока с амплитудой I_m и начальной фазой ψ_i гармонического тока той же частоты f с внутренним сопротивлением R_i ;

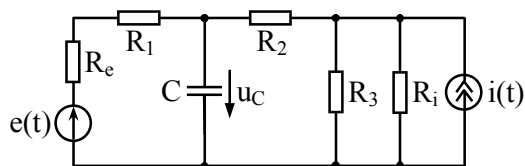


Рис. 1

3) резисторы сопротивлением R_1 , R_2 и R_3 , включенные по отношению к источнику напряжения в виде делителя напряжения, а по отношению к источнику тока – делителя тока;

4) конденсатор ёмкостью C , напряжение на котором в рамках рассматриваемой задачи является заданной величиной, экспериментально определяемой в лабораторной работе указанными выше методами теории цепей.

Работа выполняется методом имитационного моделирования в схемотехническом симуляторе Electronics Workbench [9].

Необходимо подобрать параметры E_m , R_e , I_m , R_i , R_1 , R_2 , R_3 и C так, чтобы при заданной частоте колебаний источников f и начальной фазе тока ψ_i источника тока амплитуда U_{mC} и начальная фаза напряжения ψ_{UC} на конденсаторе не отличались бы от априорно заданных и известных преподавателю числовых значений.

Для удобства работы с источниками и сопротивлениями требуется, чтобы все подбираемые величины выражались целым числом вольт, миллиампер или кОм (при этом частота колебаний определяется целым числом десятков кГц). Ёмкость конденсатора должна составлять величину с точностью до десятых нФ.

Для решения задачи генерации оптимальных данных несложно получить аналитическое соотношение, определяющее комплексную амплитуду напряжения на конденсаторе по параметрам источников напряжения и тока и пассивных элементов – сопротивлений резисторов и ёмкости конденсатора. Аналитическое соотношение, к которому может быть сведена система уравнений электрического равновесия цепи, полученное методом наложения, имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{mC} = & E_m \cdot \frac{\frac{R_{23i}}{1+j\omega R_{23i}C}}{R_{e1} + \frac{R_{23i}}{1+j\omega R_{23i}C}} + \\ & + I_m \cdot e^{j\psi_i} \cdot \frac{R_{3i}}{R_{3i} + R_2 + \frac{R_{e1}}{1+j\omega R_{e1}C}} \cdot \frac{R_{e1}}{1+j\omega R_{e1}C}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{где } R_{23i} = R_2 + \frac{R_3 \cdot R_i}{R_3 + R_i};$$

$$R_{e1} = R_e + R_1;$$

$$R_{3i} = \frac{R_3 \cdot R_i}{R_3 + R_i}.$$

В качестве переменных, обеспечивающих минимум целевой функции, взяты параметры E_m , R_e , I_m , R_i , R_1 , R_2 , R_3 и C . Один набор числовых значений таких переменных представляет собой особь. Совокупность особей в текущем поколении образует популяцию. Полагая, что начальная популяция генерируется случайным образом, необходимо задать начальные приближения для значений искомых переменных. Следует иметь в виду, что диапазон начальных значений может быть ориентировочным, так как в процессе скрещивания и генерации потомков (нового поколения) на основе наиболее приспособленных особей предыдущего поколения получаемые особи - потомки могут выходить за пределы начальных приближений.

Далее для каждой особи начальной популяции вычисляется по формуле (3) комплексная амплитуда напряжения на конденсаторе. Затем в соответствии с (1) определяется модуль разности между вычисленной и заданной (известной преподавателю) комплексной амплитудой. Этот модуль и является целевой функцией, аргументы которой – искомые параметры. Из всех особей генетический алгоритм отбирает наиболее приспособленных, то есть тех, у которых значение целевой функции является минимальным. Остальные особи отбрасываются как неконкурентоспособные. Лучшие особи подвергаются процедуре скрещивания между собой (вероятного улучшения). Далее процесс повторяется – расчет целевой функции, отбор лучших особей, скрещивание и т. д. Процесс поиска завершается, когда обеспечивается сходимость минимума целевой функции к нулю с заданной точностью.

Следует иметь в виду, что в отдельных случаях решение оптимизационной задачи генерации оптимальных данных может быть и не найдено. Тогда следует перезапустить генетический алгоритм.

На основе разработанного алгоритма создана численная программа в пакете математического моделирования MathCAD.

Для 30-ти вариантов найдены параметры активных и пассивных элементов схемы общим числом 8, обеспечивающих заданную амплитуду и фазу напряжения на конденсаторе. В табл. 1 приведено несколько сгенерированных

вариантов для известным преподавателю параметров напряжения на конденсаторе, представленных соответственно в табл. 2.

Таблица 1

№	Параметры источников						Параметры пассивных элементов цепи				
	f, kHz	напряжения e(t)		тока i(t)			R ₁ , kΩ	R ₂ , kΩ	R ₃ , kΩ	C, nF	
		E _m , V	R _e , kΩ	I _m , mA	ψ _i , deg	R _i , kΩ					
1	10	3	11	1	10	2	17	4	1	1.7	
2	20	6	12	1	20	6	18	10	1	0.9	
3	30	5	9	1	30	10	11	7	2	0.4	
4	40	6	9	2	40	14	14	12	1	0.2	
5	50	5	2	2	50	5	7	7	2	0.2	
6	40	5	7	2	60	10	13	13	3	0.2	

Таблица 2

№	U _{мс} , В/ψ _с , °	№	U _{мс} , В/ψ _с , °	№	U _{мс} , В/ψ _с , °
1	1 / -70°	3	3 / -50°	5	5 / -30°
2	2 / -60°	4	4 / -40°	6	6 / -40°

Результаты генерации исходных данных для курсовой работы по схемотехнике цифровых устройств

Цель курсовой работы "Анализ и синтез комбинационных схем" состоит в приобретении практических навыков синтеза комбинационных логических схем, в выработке навыков имитационного исследования процессов в логических схемах.

Техническое задание на курсовую работу состоит в следующем. На рис. 2 представлена исходная комбинационная логическая схема, общая для всех вариантов задания. Конкретное наполнение схемы и соответствие входов схемы входным логическим переменным определяется индивидуальным номером варианта.

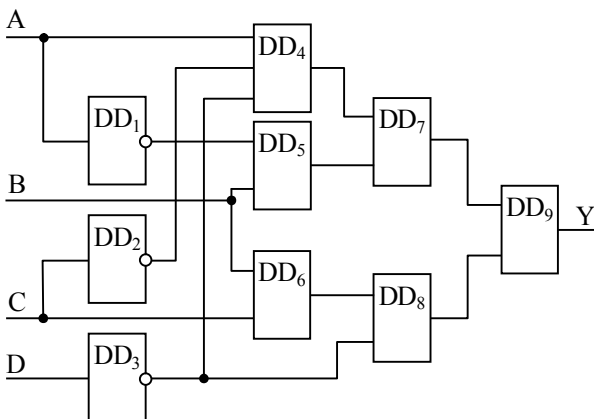


Рис. 2

Для обеспечения предсказуемости результатов выполнения работы необходимо, чтобы

для всей совокупности вариантов индивидуальных исходных данных наполнение исходной комбинационной схемы логическими элементами и привязка ее входов к аргументам логической функции были бы такими, чтобы гарантировать известную преподавателю и относительно несложную для реализации таблицу истинности. Для каждого варианта таблица истинности логической функции Y четырех аргументов X₁, X₂, X₃, X₄ должна содержать только пять логических единиц и 11 нулей. Скомбинированы нули и единицы должны быть так, чтобы тупиковая формула Y(X₁, X₂, X₃, X₄) имела вид дизъюнкции двух конъюнкций. Первая конъюнкция должна выполняться над двумя аргументами в прямой или инверсной форме, а вторая – над тремя аргументами в прямой или инверсной форме, только один из которых участвует в первой конъюнкции:

$$Y = \overline{X_m} \cdot X_k + X_k \cdot \overline{X_j} \cdot X_i, \quad (4)$$

где m ≠ k, k ≠ j, k ≠ i, j ≠ i.

Преподавателю требуется задаться логической функцией вида (4) с таблицей истинности, удовлетворяющей указанным выше условиям. Для генерации оптимальных исходных данных применительно к схеме комбинационного устройства на рис. 2 необходимо:

- 1) указать, есть ли в схеме логические элементы DD₁, DD₂ и DD₃, реализующие логическую функцию НЕ;
- 2) определить конкретный тип логической функции для каждого элемента DD₄, DD₅, DD₆, DD₇, DD₈ и DD₉ из четырех возможных: И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ;
- 3) установить однозначное соответствие между входами исходной комбинационной схемы – A, B, C, D – и аргументами логической функции X₄, X₃, X₂, X₁, полагая, что переменная X₄ соответствует старшему разряду входного двоичного слова, а X₁ — младшему разряду.

Для достижения поставленной цели разработан следующий алгоритм. Логическая функция исходного комбинационного устройства записывается в соответствии с рис. 2 в виде совокупности логических функций, реализуемых элементами DD₁ ... DD₉. При этом логические элементы DD₁, DD₂ и DD₃ могут операцию НЕ (инверсию аргумента) либо выполнять, либо нет. Элементы DD₄ ... DD₉ должны всегда выполнять одну из возможных логических функций: И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, условно закодированных числовыми идентификаторами: 1, 2, 3 и 4. Присваивая произвольным образом каждому элементу идентификатор от 1 до 4, обеспе-

чиваем выполнение элементом той или иной операции, и тем самым определяем логическую функцию четырех аргументов.

Далее генерируется случайное, но однозначное соответствие между входами исходной комбинационной схемы А, В, С, D и аргументами логической функции X_4, X_3, X_2, X_1 .

Задается желаемая (известная преподавателю) логическая функция комбинационного устройства своей таблицей истинности.

Указывается целевая функция, в данном случае представляющая собой сумму по всем наборам аргументов абсолютной разницы желаемой и фактической таблиц истинности. Критерием отыскания подходящего решения является минимальное, т. е. нулевое значение функции цели. Функцию цели следует дополнить барьерными функциями, обеспечивающими существенное увеличение значения целевой функции в случае, если идентификаторы операций, выполняемых логическими элементами, в ходе поиска их оптимальных значений становятся меньше единицы или больше четырех в соответствии с (2).

В качестве искомых параметров, обеспечивающих минимум целевой функции (в терминах генетического алгоритма), выступают идентификаторы операций, выполняемых элементами DD₁ ... DD₉. Поиск указанных параметров реализован на основе модифицированного генетического алгоритма.

Заметим, что в ряде случаев решение рассматриваемой оптимизационной задачи генерации исходных данных может быть не найдено. Тогда следует сгенерировать новое соответствие между входами исходной комбинационной схемы и аргументами реализуемой логической функции и вновь запустить модифицированный генетический алгоритм.

На основе разработанного вычислительного алгоритма создана программа в пакете математического моделирования MathCAD. С её использованием выполнен параметрический синтез комбинационного устройства на рис. 2 для 30-ти вариантов его логической функции. В табл. 3 приведено несколько сгенерированных вариантов исходных данных для известных преподавателю логических функций и соответствующих им таблиц истинности, представленных соответственно в табл. 4.

Следует заметить, что рассмотренная задача генерации оптимальных избыточных исходных данных может быть решена и без использования генетического алгоритма, например, методом последовательного перебора, поскольку

ку совокупное число возможных вариантов наполнения исходной комбинационной схемы логическими элементами заданного типа и соответствий входов схемы логическим переменным является конечным. Поэтому применение разработанного алгоритма поиска исходных данных для решения описанной задачи имеет своей целью продемонстрировать универсальность алгоритма и возможность его использования для структурного синтеза радиотехнических устройств.

Таблица 3

Элемент, вход	Номер варианта (№)				
	1	2	3	4	5
DD ₁	нет	есть	есть	нет	есть
DD ₂	есть	нет	есть	есть	есть
DD ₃	нет	есть	нет	нет	нет
DD ₄	или	и	или-не	или	и
DD ₅	или	и-не	и	или	или
DD ₆	и	и	или	и	или-не
DD ₇	и-не	или-не	или	и	или-не
DD ₈	и-не	и	или	и	и
DD ₉	и	или	и	или-не	или
X ₄	A	A	B	B	B
X ₃	B	B	A	A	A
X ₂	C	C	C	C	D
X ₁	D	D	D	D	C

Таблица 4

X ₄	X ₃	X ₂	X ₁	Y для варианта №					
				1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1	1	0
0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Заключение

Разработан эффективный алгоритм генерации оптимальных исходных данных в условиях их избыточности, основанный на численном решении задачи нелинейного программирования с помощью известной модификации генетического алгоритма. Созданный алгоритм отличается возможностью создания большого числа вариантов исходных данных с заранее известными результатами решения учебных задач, сформулированных на их основе. Алгоритм позволяет значительно уменьшить время на разработку вариантов исходных данных по сравнению с традиционным подходом и улучшить их качество. Апробация алгоритма продемонстрировала его эффективность и универсальность.

Литература

1. Останков А.В. Радиотехнические цепи и сигналы. Сборник задач с примерами решений: учеб. пособие. Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2017. Ч. 1. 172 с.
2. Останков А.В. Анализ установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях: ла-

бораторный практикум: учеб. пособие. Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2018. 88 с.

3. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. М.: Мир, 1969. 166 с.

4. Синепол В.С. Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС: методы оптимального синтеза: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2006. 107 с.

5. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 452 с.

6. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3-4. С. 78-85.

7. Кирпичева И.А., Останков А.В. Результаты применения эволюционного алгоритма для параметрического синтеза неэквидистантных антенных решеток // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 77-80.

8. Останков А.В., Антипов С.А., Калинин Ю.Е. Анализ и синтез раскрыва антенн дифракционного излучения, построенных на основе квазипериодических гребенчатых решеток. Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2016. 181 с.

9. Карлашук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Р, 2001. 726 с.

Поступила 19.02.2019; принята к публикации 21.03.2019

Информация об авторах

Кирпичева Инна Анатольевна — аспирант факультета радиотехники и электроники, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kirpicheva89@mail.ru

Останков Александр Витальевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: avostankov@mail.ru

GENERATION OF THE OPTIMAL INITIAL DATA FOR EDUCATIONAL RADIO ENGINEERING TASKS

I.A. Kirpicheva, A.V. Ostankov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: compiling high-quality training materials on radio engineering disciplines requires the generation of multivariate baseline data for laboratory work, computational exercises, course design. The source data should be tied to the variant number and ensure coverage of the entire range of acceptable result values. Since the number of input data within the framework of the problem is large, their search is reduced to solving an underdetermined system of equations. The paper proposes to reduce the solution of the system to the problem of nonlinear programming. The objective function is defined as the absolute difference between the actual and the desired result, taking into account the limitations on the size of the source data. It is recommended to search for the minimum of a multi-extremal objective function with a large number of arguments using an approved version of the genetic algorithm. On the basis of the described methodological technique, computational algorithms for generating initial data for various radio engineering tasks are implemented. The article presents the formulation, implementation and results of generation for two tasks. In the first case, the choice of the nominal values of the parameters of voltage sources and current, as well as radio elements of a complex electrical circuit, providing a priori voltage parameters at a key element. Within the framework of the second task, a structural synthesis of a combinational circuit with a given logical function (truth table) is implemented. Its peculiarity is the use of numeric identifiers, corresponding to logical functions and elements. The generated multivariate source data received practical use in the educational process

Key words: input data, generation, nonlinear programming, goal function, genetic algorithm

References

1. Ostankov A.V. "Radio engineering circuits and signals. Manual: The collection of tasks with examples of solutions" ("Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. Sbornik zadach s primerami resheniy: ucheb. posobie"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2017, part 1, 172 p.
2. Ostankov A.V. "Analysis of steady-state and transient processes in linear electric circuits: laboratory practical work. Manual" ("Analiz ustanovivshikhsya i perekhodnykh protsessov v lineynykh elektricheskikh tsepyakh: laboratornyy praktikum: ucheb. posobie"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2018, 88 p.
3. Forsythe G., Moler C. "Computer solution of linear algebraic systems" ("Chislennoe reshenie sistem lineynykh algebraicheskikh uravneniy"), Moscow, Mir, 1969, 166 p.
4. Sinepol V.S. "Fundamentals of computer-aided design and modeling of radio-electronic means: optimal synthesis methods. Manual" ("Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya i modelirovaniya radioelektronnykh sredstv: metody optimal'nogo sinteza: ucheb. posobie"), St. Petersburg, Polytechnic University, 2006, 107 p.
5. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. "Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems" ("Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy"), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2008, 452 p.
6. Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. "Modified genetic algorithm for optimization problems in control", *Exponenta Pro. Mathematics in Applications (Matematika v prilozheniyakh)*, 2004, no. 3-4, pp. 78-85.
7. Kirpicheva I.A., Ostankov A.V. "Results of application of evolutionary algorithm for parametric synthesis of nonequidistant antenna arrays", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 77-79.
8. Ostankov A.V., Antipov S.A., Sakharov Yu.S. "Minimax level of side radiation of the nonequidistant antenna array with the uniform amplitude distribution", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6-3, pp. 10-12.
9. Karlashchuk V.I. "Electronic laboratory on IBM PC. Program Electronics Workbench and its application" ("Elektronnaya laboratoriya na IBM PC. Programma Electronics Workbench i ee primeneniye"), Moscow, Solon-R, 2001, 726 p.

Submitted 19.02.2019; revised 21.03.2019

Information about the authors

Inna A. Kirpicheva, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kirpicheva89@mail.ru

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НЕОБХОДИМОЙ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В РАДИОПЕРЕДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ**И.В. Свиридова, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов, И.А. Сафонов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрены особенности разработки методики оценки необходимой ширины полосы частот (НШПЧ) фазоманипулированных сигналов в радиопередающем устройстве, а именно: установление параметров модели, исключающих искажение сигнала полосовыми фильтрами (эталонная линия); определение минимального уровня сигнала на входе приемника, обеспечивающего передачу информации с заданным качеством для эталонной линии; уменьшение полосы пропускания фильтров передатчика и приемника для соответствующего необходимого превышения уровня сигнала на входе приемника по сравнению с эталонной линией, обеспечивающего передачу с обозначенными энергетическими потерями; энергетические потери в алгоритме. Разработанная методика оценки позволяет определить вероятность сбоя символа в принятой информационной последовательности при заданных параметрах манипуляции сигнала (виде манипуляции, длительности и параметрах огибающей элементарной посылки), полосе частот сигнала, уровне сигнала на входе приемника и опорном уровне в решающем устройстве. Предлагается блок-схема процедуры вычисления коэффициента энергетических потерь с помощью программной реализации, имитирующей систему связи фазоманипулированными сигналами. Рассмотренная тема особенно актуальна, если учитывать, что фазоманипулированные сигналы имеют очень широкую сферу применения, увеличивается количество эксплуатируемых телекоммуникационных систем, использующих новые технологии для передачи данных

Ключевые слова: необходимая ширина полосы частот (НШПЧ), минимальный уровень сигнала, эталонная линия, энергетические потери в алгоритме

Введение

Увеличение количества вводимых в эксплуатацию систем передачи информации обостряет проблему использования имеющихся радиодиапазонов. В связи с этим особенно актуальным становится применение радиопередающих устройств, использующих фазоманипулированные сигналы для передачи данных. Здесь возникает потребность в обладании методами оценки необходимой ширины полосы частот фазоманипулированного сигнала. Один из способов решения этой проблемы заключается в новой методике определения необходимой ширины полосы частот, основанной на использовании модели, имитирующей систему связи, с управляемыми по ширине полосы пропускания фильтрами на приемной и передающей стороне. Значение НШПЧ в методике определяется на основе разработанного критерия, позволяющего с единых позиций задавать ее нормируемые значения для двух и четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов с различными формами огибающей элементарной посылки, используемых в системах связи.

Принятое в Регламенте определение НШПЧ не исключает неоднозначность подхода к оценке ее численного значения. Естественно, что различные подходы могут привести к различным численным значениям НШПЧ, и результирующее стандартизируемое значение НШПЧ может быть получено на основе анализа результатов подобных оценок. Поэтому различные подходы к оценке численного значения НШПЧ, не противоречащие ее определению, имеют право на существование.

Методика определения НШПЧ

Применительно к системам связи фазоманипулированными сигналами возможен следующий подход к оценке НШПЧ: достаточно большое значение ширины полосы излучения обеспечивает требуемые скорость и качество передачи информации, но приведет к неэффективному использованию радиочастотного спектра; уменьшение ширины полосы может привести при заданной скорости передачи к снижению качества передачи за счет межсимвольных искажений; это снижение качества можно компенсировать повышением уровня сигнала на входе приемника. НШПЧ определяется как минимальная ширина полосы излучения, при которой компенсирующее по-

вышение уровня сигнала на входе приемника не превышает заданного значения.

Для реализации такого подхода и была разработана методика оценки НШПЧ фазоманипулированных сигналов. Модель, являющаяся основой методики, позволяет определить вероятность сбоя символа в принятой информационной последовательности при заданных параметрах манипуляции сигнала (виде манипуляции, длительности и параметрах огибающей элементарной посылки), полосе частот сигнала, уровне сигнала на входе приемника и опорном уровне в решающем устройстве. Число сбоев символов определяется сравнением «передаваемой» и «принятой» информационной последовательности с учетом неправильно принятых и «потерянных» символов.

Алгоритм определения НШПЧ с помощью модели следующий:

- устанавливаются параметры модели, исключающие искажение сигнала полосовыми фильтрами (эталонная линия);

- определяется минимальный уровень сигнала на входе приемника, обеспечивающий передачу информации с заданным качеством для эталонной линии;

- уменьшая полосу пропускания фильтров передатчика и приемника, определяется соответствующее необходимое превышение уровня сигнала на входе приемника по сравнению с эталонной линией, обеспечивающее передачу информации с заданным качеством (энергетические потери).

Энергетические потери в алгоритме определяются через значение коэффициента энергетических потерь КЭП, выражаемого в децибелах и вычисляемого с использованием следующего отношения:

$$K_{ЭП} = 20 \lg(U_{ЭТ}/U_{Ф}) + 10 \lg(Q_{Ф}/Q_{ЭТ}), \quad (1)$$

где UЭТ - минимальный уровень отклика на не искаженный полосовой фильтрацией полезный сигнал на входе решающего устройства приемника;

QЭТ - среднеквадратичное значение амплитуды (мощность) сигнала на входе модели приемника без учета искажений полосовой фильтрацией;

UФ - минимальный уровень отклика на полезный сигнал на входе решающего устройства приемника с учетом искажений полосовой фильтрацией;

QФ - среднеквадратичное значение (мощность) амплитуды сигнала, искаженного полосовым фильтром передатчика.

НШПЧ оценивалась как такая полоса пропускания фильтров, при которой получаемое значение КЭП не превышает заданного допустимого уровня.

Для бинарных и четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов в качестве допустимого уровня КЭП может быть использовано значение 6 дБ, что соответствует изменению амплитуды отклика примерно в два раза. Такое значение еще позволяет компенсировать искажения полезного сигнала увеличением мощности. Дальнейшее уменьшение полосы пропускания фильтров, как можно видеть из результатов, представленных в таблице, приводит к существенному росту КЭП до значений в десятки децибел, а уменьшение еще на 5-10% к появлению сбоев (неправильно принятых символов), вызванных искажениями сигнала полосовой фильтрацией.

ФМн-2 порядок фильтров 3 и 9 со сглаживанием скачков

Полоса пропускания фильтров, МГц	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	
КЭП	26,1	9,8	4,8	4,7	4,4	3,8	3,1	2,5	2,1	1,7	1,2	0,84	0,37	0,35	0,14

Для сложных сигналов рассмотрение значения НШПЧ, отличного от значения НШПЧ для простых фазоманипулированных сигналов, нецелесообразно, поскольку такие сигналы изначально являются широкополосными. Избыточность полосы частот для передачи информации с заданной скоростью, обеспечивает преимущества таких сигналов: повышенную помехозащищенность, скрытность, возможность кодового разделения каналов. Для сложных фазоманипулированных сигналов значение НШПЧ принимается равной значению, соответствующему фазоманипулированному сигналу, лежащему в основе сложного.

Процедура определения НШПЧ может быть представлена как решение оптимизационной задачи следующего вида:

$$\begin{cases} \Delta F_{ППФ} \rightarrow \min \\ K_{ЭП}(\Delta F_{ППФ}) \leq K_{ЭП}^{доп} \end{cases} \quad (2)$$

То есть требуется найти минимальное значение полосы пропускания фильтров $\Delta F_{\text{ПФ}}$ в модели системы приема и передачи информации при ограничении значением $K_{\text{ЭП}}^{\text{дон}}$ значения получаемого коэффициента энергетических потерь $K_{\text{ЭП}}$ [дБ], который рассматривается как функция от $\Delta F_{\text{ПФ}}$ при фиксированных остальных параметрах модели.

Поскольку зависимость $K_{\text{ЭП}}$ от $\Delta F_{\text{ПФ}}$ носит монотонный характер, решение задачи (2) является решением следующего уравнения:

$$K_{\text{ЭП}}(\Delta F_{\text{ПФ}}) - K_{\text{ЭП}}^{\text{дон}} = 0. \quad (3)$$

Для поиска решения этого уравнения, в предположении непрерывности функции $K_{\text{ЭП}}(\Delta F_{\text{ПФ}})$, используется метод золотого сечения. При этом рассматривается последовательность уменьшающихся отрезков, на границах которых функция левой части уравнения (3) принимает разные знаки. Если на i -м этапе получен отрезок $(\Delta f_i^{\text{min}}, \Delta f_i^{\text{max}})$, то он разбивается на два отрезка в точке Δf_{i+1} , которая определяется по соотношению:

$$\Delta f_{i+1} = \Delta f_i^{\text{min}} + 0.63(\Delta f_i^{\text{max}} - \Delta f_i^{\text{min}}). \quad (4)$$

Из полученных двух отрезков для дальнейшего поиска решения выбирается тот, у которого значение функции, соответствующей левой части уравнения (3), на концах принимает разные знаки, что гарантирует наличие хотя бы одного решения данного уравнения на этом отрезке. Процесс деления отрезков прекращается, когда длина очередного отрезка не превышает заданной величины.

Для сокращения времени расчетов на начальных этапах поиска при моделировании прохождения случайного информационного сигнала используются небольшие по длине последовательности символов (100-200 символов) и, соответственно, малое количество точек цифрового представления сигнала для БПФ (215-216). Далее полученное приближенное значение $\Delta F_{\text{ПФ}}$ уточняется и подтверждается расчетами на большой информационной последовательности с высоким разрешением представления элементарной посылки. Например, при заданной допустимой вероятности сбой символа 10^{-3} для достижения довери-

тельной вероятности 99% рассматриваются последовательности, длиной не менее чем 105 случайных символов.

На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема процедуры вычисления коэффициента энергетических потерь $K_{\text{ЭП}}$ с помощью программной реализации, имитирующей систему связи фазоманипулированными сигналами.



Рис. 1. Укрупненная блок-схема процедуры вычисления коэффициента энергетических потерь

В блоке 1 осуществляется начальное присваивание вспомогательным переменным задачи и формирование массивов, содержащих спектральный образ согласованного фильтра приемника.

В блоке 2 в соответствии с алгоритмом метода перекрытия при сложении осуществляется генерация и фильтрация через согласованный фильтр исследуемого сигнала по «порциям». Здесь не учитываются полосовые фильтры передатчика и приемника. В ходе моделирования прохождения сигнала определяется минимальный уровень отклика на полезный сигнал, не искаженный полосовой фильтрацией, на входе решающего устройства приемника УЭТ и среднееквадратичное значение амплитуды сигнала (мощность) на входе модели приемника QЭТ.

В блоке 3 присваиваются начальные значения вспомогательным переменным задачи и формируются массивы, содержащие спек-

тральный образ полосового фильтра передатчика и образ обобщенного фильтра, объединяющего полосовой и согласованный фильтры приемника. В качестве полосовых фильтров используются фильтры Баттерворта максимального из доступных в программной реализации модели порядка.

В блоке 4, как и в блоке 2, осуществляется моделирование прохождения по «порциям» исследуемого сигнала в соответствии с алгоритмом метода перекрытия при сложении, однако здесь учитываются полосовые фильтры передатчика и приемника. Также здесь определяется минимальный уровень отклика на полезный сигнал на входе решающего устройства приемника с учетом искажений полосовой фильтрацией УФ и среднееквадратичное значение амплитуды (мощность) сигнала, искаженного полосовым фильтром передатчика, QФ.

В блоке 5 определяется значение коэффициента энергетических потерь для исследуемого сигнала при данной ширине полосы пропускания полосовых фильтров как сумма выраженного в децибелах отношения значений уровней отклика искаженного и неискаженного сигналов $20\lg(U_{ЭТ}/U_{Ф})$ и поправки на разницу среднееквадратичных значений (мощностей) $10\lg(Q_{Ф}/Q_{ЭТ})$.

Определенный таким образом коэффициент энергетических потерь и будет равен величине, на которую необходимо увеличить мощность сигнала, чтобы компенсировать снижение уровня отклика на входе решающего устройства из-за искажений, вызванных полосовыми фильтрами с заданной шириной полосы пропускания.

На рис. 2 приведен пример отображения программой результатов расчетов коэффициента энергетических потерь, вычисляемого в ходе определения НШПЧ. На рис. 3, в свою очередь, приведен пример отображения программой гистограммы откликов помехи при вычислении коэффициента энергетических потерь, вычисляемого в ходе определения НШПЧ. Как видно из рисунков, в качестве результатов программа отображает графики сигналов, искаженных и неискаженных фильтрующими элементами, нормированные на максимальное значение, получаемую гистограмму значений откликов в момент снятия отсчетов в решающем устройстве и значение коэффициента энергетических потерь при заданных параметрах моделирования.

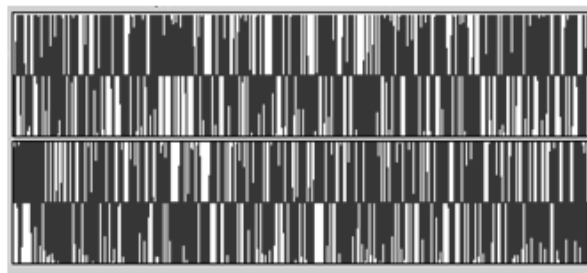


Рис. 2. Результат вычисления коэффициента энергетических потерь для определения НШПЧ сигнала СФМн-4

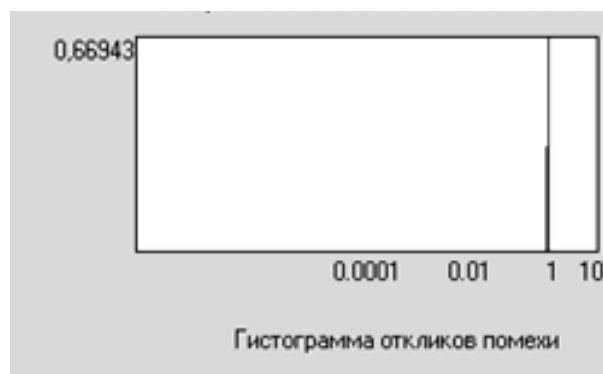


Рис. 3. Гистограмма откликов помехи при вычислении коэффициента энергетических потерь для определения НШПЧ сигнала СФМн-4

Таким образом, разработанная методика определения НШПЧ для фазоманипулированных сигналов, основанная на программной реализации модели системы связи, позволяет с единых позиций, соответствующих представленному в Регламенте радиосвязи определению НШПЧ, нормировать этот параметр для двух- и четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов с различными формами огибающей элементарной посылки, а также сигналов ММС, используемых в системах связи.

Заключение

В этой статье были рассмотрены особенности разработки методики оценки необходимой ширины полосы частот (НШПЧ) фазоманипулированных сигналов в радиопередающем устройстве.

Методика включает в себя установление параметров модели, исключая искажение сигнала полосовыми фильтрами (эталонная линия); определение минимального уровня сигнала на входе приемника, обеспечивающего передачу информации с заданным качеством для эталонной линии; уменьшение полосы пропускания фильтров передатчика и приемника,

определяющих соответствующее необходимое превышение уровня сигнала на входе приемника по сравнению с эталонной линией, обеспечивающее передачу информации с заданным качеством (энергетические потери).

Энергетические потери в алгоритме определяются через значение коэффициента энергетических потерь КЭП. Корректный учет свойств используемого математического аппарата в программных реализациях разработанных моделей дает возможность рассматривать простые и сложные (со значением базы до 2·103) фазоманипулированные сигналы практически неограниченной длительности с разрешением, достаточным для адекватной аппроксимации межфазовых переходов и различных форм огибающей элементарной посылки, смещения по частоте, а также учета искажения формы сигнала в различных элементах радио-передающих и радиоприемных устройств.

Для сложных сигналов рассмотрение значения НШПЧ, отличного от значения НШПЧ для простых фазоманипулированных сигналов, нецелесообразно, поскольку такие сигналы изначально являются широкополосными. Избыточность полосы частот для передачи информации с заданной скоростью обеспечивает преимущества таких сигналов: повышенную помехозащищенность, скрытность, возможность кодового разделения каналов.

Литература

1. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпунин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и приём радиосигналов. М.: Сов. Радио, 1972.
2. Гольдберг Б.С., Коновалов Г.В. Необходимая ширина полосы излучения радиосистемы с ФМ (ФРМ) сигналами // Радиотехника. 1977. Т. 32. №5. С. 7-13.

3. Турбокодирование как основа в системах передачи данных / А.В. Ситников, А.В. Башкиров, И.В. Остроумов, П.В. Иевлев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.3. С. 7-9.

4. Остроумов И.В., Ромащенко М.А. Исследование поведения радиопомех в системах передачи дискретной информации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 102-104.

5. Катущкина В.М. О зависимости сдвига фазы от величины выходного сигнала в пролётном клистроне // Электроника СВЧ. 1968. Вып.3.

6. Остроумов И.В., Ромащенко М.А. Особенности решения задач ЭМС для систем с фазоманипулированными сигналами // Системные проблемы надежности, качества, компьютерного моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (ИННОВАТИКА – 2014): материалы междунар. конф., рос. науч. школы и форума. М., 2014. С. 99 – 101

7. Способы формирования OFDM – сигнала / И.В. Остроумов, А.В. Ситников, И.В. Свиридова, А.В. Муратов // Радиотехника. 2014. №6. С. 67 – 69.

8. Остроумов И.В., Ромащенко М.А. Комплексная модель системы передачи дискретной информации фазоманипулированными сигналами и её программная реализация // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. Пенза: ПГУ, 2015. Т. 1. С. 141 – 144.

9. Журавлев Д.В. Основы радиоэлектроники и связи: учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2010. 227 с.

10. Барнс Дж. Электронное конструирование: Методы борьбы с помехами / Пер. с англ. под ред. Б.Ф. Файзулаева. М.: Мир, 1990.

11. Вайштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне флуктуационных помех. М.: Сов. Радио, 1969.

12. Терентьев Б.П., Калягин Л.Е., Штейн Б.Б. Радиопередающие устройства / под ред. Б.П. Терентьева. М.: Связьиздат, 1963. 711 с.

13. Бойко О.В., Журавлев Д.В., Сафонов И.А. Система мониторинга подвижной радиосвязи 2G-4G сетей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 117-121.

Поступила 21.02.2019; принята к публикации 20.03.2019

Информация об авторах

Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Анисимов Иван Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

Сафонов Иван Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE NECESSARY BANDWIDTH OF PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS IN A RADIO TRANSMITTING DEVICE

I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov, I.A. Safonov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the features of the development of a method for estimating the necessary bandwidth of phase-shift keyed signals in a radio transmitting device are considered, namely: the establishment of model parameters that exclude signal distortion by band-pass filters (reference line); determination of the minimum signal level at the receiver input, ensuring the transmission of information with a given quality for the reference line; reducing the bandwidth of the filters of the transmitter and receiver, for the corresponding necessary excess of the signal level at the receiver input compared to the reference line, providing transmission with the indicated energy loss; energy loss in the algorithm. The developed estimation method makes it possible to determine the probability of a symbol failure in the received information sequence for given signal manipulation parameters (type of manipulation, duration and elementary parcel envelope parameters), signal frequency band, signal level at the receiver input and reference level in the resolver. A flowchart of the procedure for calculating the energy loss coefficient using a software implementation that simulates a phase-shift keyed signal communication system is proposed. This topic is particularly relevant, given that phase-shift keyed signals have a very wide scope of application, and the number of telecommunication systems in use increases, using new technologies for data transmission

Key words: necessary bandwidth (NBW), minimum signal level, reference line, energy loss in an algorithm

References

1. Kremer I.Ya., Vladimirov V.I., Karpukhin V.I. "Modulating (multiplicative) interference and radio reception" ("Moduliruyushchie (moltiplikativnye) pomekhi i priyom radiosignalov"), Moscow, Sov. Radio, 1972.
2. Goldberg B.S., Kononov G.V. "Required emission bandwidth of a radio system with FM (FRM) signals", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 1977, vol. 32, no. 5, pp. 7-13.
3. Ostroumov I.V., Sitnikov A.V., Bashkirov A.V., Ievlev P.V. "Turbo encoding as a basis in data transmission systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6.3, pp. 7-9.
4. Ostroumov I.V., Romashchenko M.A. "Investigation of radio interference behavior in discrete information transmission systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 102-104.
5. Katushkina V.M. "On the dependence of the phase shift on the size of the output signal in the transit klystron", *Microwave Electronics (Elektronika SVCH)*, 1968, issue 3.
6. Ostroumov I.V., Romashchenko M.A. "Features of EMC problem solving for systems with phase-manipulated signals", *Proc. of The Intern. Conf., Russian Scientific School and Forum: System Problems Of Reliability, Quality, Computer Modeling, Information and Electronic Technologies in Innovative Projects (INNOVATIKA - 2014) (Sistemnye problemy nadezhnosti, kachestva, kompyuternogo modelirovaniya, informatsionnykh i elektronnykh tekhnologiy v innovatsionnykh proektakh (INNOVATIKA - 2014): materialy mezhdunar. konf., ros. nauch. shkoly i foruma)*, Moscow, 2014, pp. 99-101
7. Ostroumov I.V., Sitnikov A.V., Sviridov I.V., Muratov A.V. "Methods of forming the OFDM signal", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 6, pp. 67-69.
8. Ostroumov I.V., Romashchenko M.A. "Complex model of a discrete information transmission system with phase-shift keyed signals and its software implementation", *Proc. of International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma)*, Penza, PSU, 2015, vol. 1, pp. 141-144.
9. Zhuravlev D.V. "Fundamentals of radio electronics and communication: textbook" ("Osnovy radioelektroniki i svyazi: ucheb. posobie"), Voronezh State Technical University, Voronezh, 2010, 227 p.
10. Barnes J., ed. Fayzulaev B.F. "Electronic design: methods of dealing with interference", trans. from English, Moscow, Mir, 1990.
11. Weinstein L.A., Zubakov V.D. "Isolation of signals against the background of fluctuation interference", Moscow, Sov. Radio, 1969.
12. Terent'ev B.P., Kalyagin L.E., Stein B.B. "Radio transmitting devices", Moscow, Svyaz'izdat, 1963, 711 p.
13. Zhuravlev D.V., Boyko O.V., Safonov I.A. "System of mobile radio monitoring of 2G-4G networks", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 117-121.

Submitted 21.02.2019; revised 20.03.2019

Information about the authors

Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru

Ivan V. Ostroumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru

Ivan S. Anisimov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pilot7mig@yandex.ru

Ivan A. Safonov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: saff@inbox.ru

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ЗАДАЧИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ:
КРАТКИЙ ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ**

О.Е. Журилова, А.В. Башкиров, С.Ю. Белецкая, С.Н. Паньчев, А.С. Костюков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: цифровая обработка сигналов является одной из важнейших составляющих современного кодирования, преобразования и обработки информации. Поэтому развитие данного направления чрезвычайно важно для всей отрасли радиосвязи. В свою очередь сама цифровая обработка сигналов неразрывно связана со спектральным анализом сигналов, так как многие решения и функции в цифровой обработке построены именно на применении спектральной классификация методов спектрального анализа и рассмотрены наиболее применяемые из них. Рассматриваются вейвлет-преобразование; классические методы спектрального анализа сигналов, которые в своей основе построены на преобразовании Фурье и которые, в свою очередь, подразделяются на периодограммные и коррелограммные методы; и авторегрессионные методы спектрального анализа, которые также подразделяются на различные методы преобразования: метод Юла – Улкера, ковариационный метод и его модификацию и метод Берга. Проведен сравнительный анализ, выявлены достоинства и недостатки всех описанных выше методов спектрального анализа сигналов и сделаны соответствующие выводы

Ключевые слова: спектральный анализ, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование

Введение

Многие задачи цифровой обработки сигнала связаны с задачами спектрального анализа (СА) и методами их эффективного вычисления. Спектральный анализ - это преобразование сигнала во временной области в частотную и оценка или измерение спектральных характеристик.

Спектральный анализ обычно решает следующие задачи: обнаружение, оценивание параметров сигналов, сжатие данных, выделение информативных признаков, идентификация объектов (определение частотных, импульсных и других характеристик), распознавание образов (речи, изображений) [1].

Существует большое количество методов, которые решают задачи СА. На рис. 1 приведена классификация методов СА. Рассмотрим и сравним наиболее применяемые из методов.

Классические методы СА

Классические методы СА можно разделить на два класса: периодограммные и коррелограммные. Методы, основанные на прямом преобразовании данных и последующем усреднении, называются периодограммными. Косвенные методы, для получения которых сначала формируется оценка корреляционной функции, получили название коррелограммные [2].

Математической основой классических методов является преобразование Фурье (ПФ). Преобразование Фурье - это интегральное преобразование, которое раскладывает исходную функцию на базисные (синусоидальные и косинусоидальные) функции, то есть представляет исходную функцию в виде интеграла синусоид различной частоты, амплитуды и фазы. Общий вид преобразования Фурье для непрерывной функции $f(t)$ имеет вид:

$$\varphi(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-i \cdot s \cdot t} \cdot dt. \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ - преобразование Фурье для функции $f(t)$.

Для дискретного сигнала, который имеет конечное число отсчетов, применяется дис-

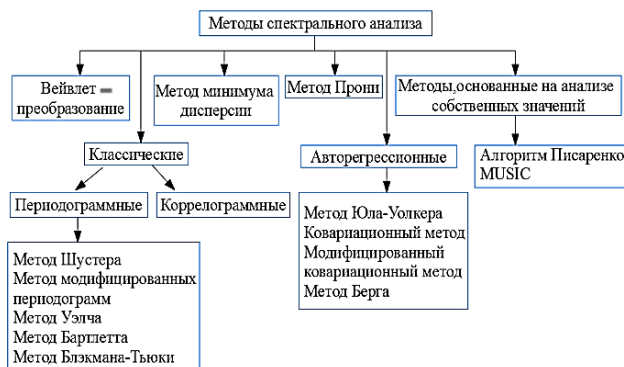


Рис. 1. Классификация методов спектрального анализа

кретное преобразование Фурье (ДПФ). N – точечное ДПФ описывается выражением:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(f(n) \cdot \exp(-i \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k) \right), \quad (2)$$

где $k = 0 \dots N - 1$

$F(k)$ - выход ДПФ в k -й точке спектра;

N - число отсчетов;

$f(n)$ - n -й отсчет во временной области.

В общем уравнении $f(n)$ может быть вещественным или комплексным. Выходной спектр ДПФ $F(k)$ является результатом вычисления свертки между выборкой, состоящей из входных отсчетов во временной области, и набором из N пар гармонических базисных функций. На рис. 2 показан принцип вычисления первых четырех точек спектра действительной части. Первая точка $ReX(0)$ получена простым суммированием входных отсчетов во временной области, потому что $\cos(0) = 1$. Для получения второй точки $ReX(1)$ необходимо найти произведение каждого отсчета из временной области и соответствующего значения косинусоиды, имеющей один полный период на интервале N , и просуммировать результаты. Для нахождения третьей точки $ReX(2)$ операции идентичные, только на этот раз берется косинусоида, имеющая два полных периода на интервале N , а для четвертой точки $ReX(3)$ - три полных периода на интервале N . Этот процесс длится, пока не будут рассчитаны все N точек выходных отсчетов. Для вычисления мнимой части частотного спектра применяется подобная процедура, где в качестве базисных функций представлены синусоиды.

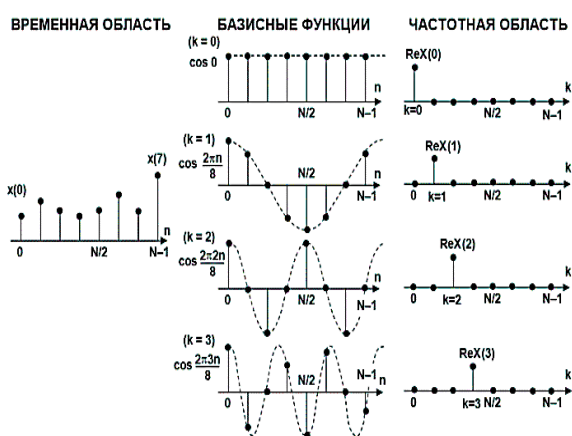


Рис. 2. Принцип вычисления ДПФ

С увеличением точек N резко возрастает число таких операций и, следовательно, увеличивается время преобразования. Эта проблема была решена после изобретения быстрых алгоритмов Фурье (БПФ), в основе которых лежит

принцип сведения многоточечного преобразования к малоточечным и как следствие уменьшение времени преобразования.

Следует учесть тот факт, что сигнал может меняться во времени, также в нем могут присутствовать локальные особенности (ступеньки, разрывы, пики). Для получения о сигнале высокочастотной спектральной информации с высокой точностью следует выбирать малые временные участки, а для низкочастотной - наоборот. В таком случае используется оконное БПФ, суть которого заключается в предварительном умножении сигнала $S(t)$ на «окно» $w(t-b)$ для вычисления ПФ в разных позициях b и перемещении этого окна вдоль всего времени t существования сигнала $S(t)$. В результате получается частотно-временное описание сигнала (рис. 3). Однако в соответствии с принципом неопределенности невозможно получить одновременно высокое разрешение и по времени, и по частоте, так как чем меньше размер окна, тем лучше разрешение по времени, но хуже по частоте, и наоборот.

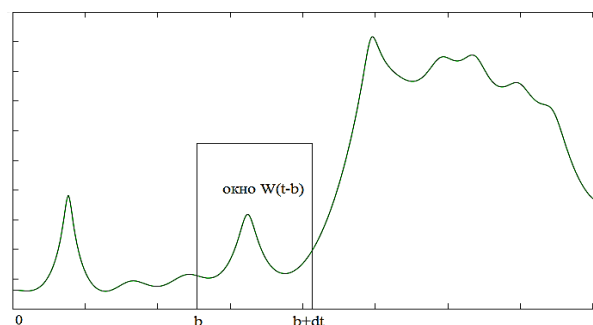


Рис. 3. Оконное ПФ

Достоинствами классических методов являются вычислительная эффективность за счет использования алгоритмов БПФ и применимость к широкому классу сигналов. К недостаткам относятся ограничение частотного разрешения, фиксированное временное и частотное разрешение (для оконного ДПФ). Еще одним недостатком классических методов является растекание спектра, заключающееся в растекании главного лепестка спектра в боковые, что приводит к неверному спектральному представлению присутствующих сигналов.

Вейвлет-преобразование

Если Фурье-преобразование - это разложение сигнала на базисные синусоидальные и косинусоидальные функции с различными частотами, то вейвлет-преобразование (ВП) - это разложение на версии оригинального материн-

ского вейвлета. Термин материнский означает, что вейвлетные функции с различной областью существования, получены из одной основной функции. Версии вейвлета образуются за счет его масштабирования s (по длительности) и сдвига τ (по временной шкале) [3].

При ВП одномерного сигнала $x(t)$ вычисляется двумерная матрица коэффициентов (амплитуд) $C(\tau, s)$, которые зависят от положения на временной оси и масштаба:

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{\tau,s}(t) dt \quad (3)$$

где s – масштаб;

τ - сдвиг;

$\psi(t)$ – материнский вейвлет.

Связь материнского вейвлета с масштабом и сдвигом задается выражением:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \left(\frac{t-\tau}{s} \right) \quad (4)$$

Коэффициенты матрицы вычисляются следующим образом. Вейвлет умножается на анализируемый сигнал, затем интегрируется и смещается на выбранный интервал сдвига τ , пока не достигнет конца сигнала. Далее параметр s увеличивается на выбранный шаг, и операция перемещения вейвлета вдоль всего времени анализируемого сигнала повторяется. Следовательно, вычисления при одном масштабе создают строки в плоскости шкалы времени, а вычисления в различных масштабах - столбцы. На пересечении строк и столбцов мы имеем значение коэффициента $C(\tau, s)$, характеризующее частотное представление сигнала. Таким образом, спектральное представление ВП одномерного сигнала – это поверхность в трехмерном пространстве.

За счет свойств локальности у вейвлетов вейвлет-преобразование имеет значительное преимущество перед преобразованием Фурье. В ВП операция умножения на окно как бы содержится в самой базисной функции, которая сужает и расширяет окно: с увеличением масштаба увеличивается разрешение по частоте и уменьшается разрешение по времени, а с уменьшением масштаба - наоборот. Таким образом, вейвлет-преобразование эффективно выделяет и высокочастотные, и низкочастотные характеристики сигналов. Эта особенность ВП дает большое преимущество при анализе высокочастотных спектральных характеристик.

Авторегрессионные методы основаны на принципиально ином способе вычисления спектральных характеристик. Эти методы подразумевают наличие некоторой математической модели наблюдаемого сигнала. Сначала решается оптимизационная задача, то есть вычисляются пара-

метры модели, при которых она наиболее близка к анализируемому сигналу. Далее, на основе найденных параметров дается оценка спектральной характеристике сигнала. Различают следующие типы моделей: АР-модель («авторегрессия»), СС-модель («скользящее среднее»), АРСС-модель. АР-модели используются чаще других, так как они более просты в расчетах и хорошо соответствуют многим практическим задачам. Параметры АР-модели могут оцениваться по последовательности оценок автокорреляционной функции, как в алгоритме Юла-Уокера, по последовательности коэффициентов отражения - алгоритм Берга, по оценке коэффициентов линейного предсказания - ковариационный и модифицированный ковариационный метод [4].

Преимущества применения авторегрессионных методов в сравнении с классическими обусловлены большей точностью оценок спектральной плотности мощности и высоким спектральным разрешением.

Сравнение групп методов СА

Группа методов	Достоинства	Недостатки
Классические	Вычислительная эффективность. Применимы к большому множеству сигналов	Ограничение частотного и временного разрешения Растекание спектра
Вейвлет-преобразование	Высокое частотное и временное разрешение	Относительная сложность
Авторегрессионные	Большая точность оценок по сравнению с классическими методами. Высокая разрешающая способность. Эффективны при работе с данными малой длины	Предварительный подбор параметров. Вычислительная сложность

Заключение

В работе были теоретически проанализированы некоторые методы спектрального анализа сигналов, выявлены особенности, преимущества и недостатки каждого из них. Для более точной оценки характера применимости того или иного подхода в конкретном случае необходимо практически исследовать алгоритмы вышеописанных методов спектрального анализа сигналов.

Литература

1. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
2. Кривошеев В.И. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. Н. Новгород: Изд. ННГУ, 2006. 232 с.
3. Вишератин К.Н., Карманов Ф.И. Практические методы оценивания спектральных параметров: учеб. пособие. Обнинск: Изд. ОГТУАЭ, 2008. 60 с.

4. Кренёв А.Н., Артемова Т.К. Цифровой спектральный анализ: учеб. пособие. Ярославль: Изд. Яросл. гос. ун-та, 2002. 114 с.

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 12.04.2019

Информация об авторах

Журилова Ольга Евгеньевна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Suslovaoe@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5066-9197>

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Белецкая Светлана Юрьевна – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sapris@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-1917>

Панычев Сергей Николаевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (394020, Россия, г. Воронеж, ул. 9 Января, д. 280а), e-mail: pany4ev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4372-571X>

Костюков Александр Сергеевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

MODERN METHODS AND PROBLEMS OF SPECTRAL ANALYSIS OF SIGNALS: BRIEF DISCUSSION AND COMPARISON

O.E. Zhurilova, A.V. Bashkirov, S.Y. Beletskaya, S.N. Panychev, A.S. Kostyukov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: digital signal processing is one of the most important components of modern coding, transformation and processing of information. Therefore, the development of this area is extremely important for the entire radio communications industry. In turn, the digital signal processing itself is inextricably linked with the spectral analysis of signals, since many solutions and functions in digital processing are built specifically on the use of spectral analysis. The existing methods and tasks of spectral analysis of signals were considered. A detailed classification of spectral analysis methods was presented and the most used of them were considered. The wavelet transform was considered; classical methods of spectral analysis of signals, which are basically based on the Fourier transform and which, in turn, are divided into periodogram and correlogram methods; and autoregressive spectral analysis methods, which are also divided into various transformation methods: the Yule – Ulker method, the covariance method and its modification, and the Berg method. A comparative analysis was carried out, the advantages and disadvantages of all the methods of spectral analysis of signals described above were revealed and the corresponding conclusions were made

Key words: spectral analysis, Fourier transform, wavelet transform

References

1. Marple S.L. “Digital spectral analysis and its applications” (“Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya”), Moscow, Mir, 1990, 584 p.
2. Krivosheev V.I. “Digital signal processing: manual” (“Tsifrovaya obrabotka signalov: ucheb. posobie”), N. Novgorod, NNSU, 2006, 232 p.
3. Visheratin K.N., Karmanov F.I. “Practical methods for estimating spectral parameters: manual” (“Prakticheskie metody otsenivaniya spektral'nykh parametrov: ucheb. posobie.”), Obninsk, OGTUAE, 2008, 60 p.
4. Krenyev A.N., Artemova T.K. “Digital spectral analysis: manual” (“Tsifrovoy spektral'nyy analiz: ucheb. posobie.”), Yaroslavl, Yaroslavl State Univ., 2002, 114 p.

Submitted 22.02.2019; revised 12.04.2019

Information about the authors

Ol'ga E. Zhurilova, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Suslovaoe@yandex.ru

Aleksey V. Bashkirov, Dr.Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fab7@mail.ru

Svetlana Yu. Beletskaya, Dr.Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sapris@vorstu.ru

Sergey N. Panychev, Dr.Sc. (Technical), Senior Researcher, State Research and Testing Institute for Technical Information Protection Problems of the Federal Service for Technical and Export Control (280a, 9 Yanvarya str., Voronezh 394020, Russia), e-mail: pany4ev@mail.ru

Aleksandr S. Kostyukov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЕ КОДИРОВАНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ФОРМАТАХ СВЯЗИ

А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин, О.Ю. Макаров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: помехоустойчивое кодирование является одной из важнейших отраслей радиосвязи, благодаря ей возможна передача больших объемов цифровой информации с минимальным количеством ошибок. Поэтому развитие данного направления чрезвычайно важно для радиотехнической отрасли. В данной статье будут рассмотрены различные помехоустойчивые коды, которые существуют в настоящий момент. Начиная от самых простых и распространенных, таких как код Хэмминга, коды с проверкой на чётность, блочный неравномерный код, код Боуза–Чаудхури–Хоквинггема, циклический избыточный код, потенциальное кодирование, код Рида–Соломона, манчестерское кодирование, биполярный код АМІ, свёрточные и каскадные коды, самоортогональные коды, турбокоды, низкоплотные коды. И заканчивая передовыми разработками области помехоустойчивого кодирования - стеганографический алгоритм и алгоритм Кловкого–Николаева, коды повторения – накопления и произведения – накопления. В статье рассмотрены их основные характеристики, такие как тактовая частота сигнала, число итераций кода, скорость декодирования сигнала, пропускная способность канала и длина кода. Представлено краткое описание каждого из помехоустойчивых кодов и рассмотрено, в каком стандарте связи используется тот или иной код и в каких отраслях радиосвязи он получил наибольшее распространение

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, турбокоды, каскадные коды, код Рида–Соломона, LDPC-код

Введение

В последние годы происходит бурный рост телекоммуникационной отрасли, в связи с научно-техническим прогрессом, разрабатываются новые способы передачи информации, увеличиваются скорость и объем передачи данных. Но вместе с тем происходит и нежелательное явление в виде повышенной зашумленности каналов связи, связанное с повышением возникновения различных ошибок и помех в передаваемых фалах. Борьба с данной проблемой призвано помехоустойчивое кодирование, и в связи с возникшими сложностями данное направление также переживает бурный подъём, а именно, разрабатываются новые кодовые алгоритмы, которые призваны повысить помехозащищенность, а также модернизируются старые образцы кодов.

В данной статье представлен большой обзор помехоустойчивых кодов, которые существуют в настоящее время, будут рассмотрены как уже давно известные и зарекомендовавшие себя с лучшей стороны коды, так и перспективные разработки в помехоустойчивом кодировании.

Простые помехоустойчивые коды

Сначала рассмотрим самые простые помехоустойчивые коды, данные алгоритмы от-

личают простота реализации, ограниченность обнаружения и исправления ошибок, а также тот факт, что данные коды в современном помехоустойчивом кодировании используются в составе других более сложных кодов (например, в составе кодов Рида–Соломона, Турбокодов, Каскадных кодов и т.п.). К ним относятся следующие коды.

Коды с проверкой на чётность, являются самими простыми и самыми распространенными в помехоустойчивом кодировании. Данные коды построены с помощью одной общей проверки на чётность, в которой проверочным разрядом является результат суммирования по модулю на два всех бит пакета информации. С помощью данных кодов можно обнаруживать одиночную ошибку, но восстановить поврежденные файлы он не в состоянии. Главным достоинством кодов с проверкой на чётность является простота реализации. В настоящее время данные коды используются в составе более сложных кодов, например в составе каскадных кодов.

Код Хэмминга, как и коды с проверкой на четность, позволяет обнаруживать одиночные ошибки, но в отличии от них имеет более совершенную структуру, а именно: в данном коде для каждого числа проверенных символов используется специальная маркировка, которая состоит из двух составляющих, а именно, количества символов в сообщении и количества информационных символов в сообщении.

Данный код также используется в составе более сложных кодов.

Код Боуза-Чаудхури-Хоквингхема или же, как его ещё называют, код БЧХ, данный код, в своё время, активно использовался в аппаратуре передачи данных, но в последнее время был вытеснен более совершенными кодовыми алгоритмами. Данный код отличается специальным выбором образующего циклический код полинома, что позволяет более просто декодировать передаваемую информацию, также данный код обладает нечётными значениями минимального кодового расстояния, всё это позволяет превосходно обнаруживать и исправлять ошибки с учётом группирования.

Блочные неравномерные коды, особенностью этих кодов является то, что в данных алгоритмах все кодовые комбинации содержат разное число разрядов с постоянной длительностью импульсов. Данный вид кодов не является корректирующим и способен только обнаруживать ошибки в передаваемой информации благодаря большой избыточности. Примерами таких кодов являются код Морзе, который в настоящее время используется как специализированный код передачи информации в военной сфере, и код Хафмена, который применяется для компрессии информации и в настоящий момент используется в составе некоторых Каскадных кодов [1].

Циклический избыточный код (CRC код) это еще один код, который занимается обнаружением ошибок, данный код используется наравне с кодом Хэмминга и с кодами с проверкой на чётность. Отличительной особенностью данного кода является его способ кодирования информации, основанный на свойстве деления с остатком двоичных многочленов, что позволяет с хорошей точностью определять ошибки в передаваемых сообщениях.

Помехоустойчивые коды, использующиеся в современных стандартах связи

Другими алгоритмами помехоустойчивого кодирования являются более сложные коды, которые зарекомендовали себя в поиске и исправлении ошибок, а также в защите от помех, в связи с чем, данные коды в настоящий момент используются повсеместно в телекоммуникационной отрасли. К ним относятся:

Код SMPTE, обладает возможностью самосинхронизации и, как следствие, восстановления поврежденных данных. Также данный код имеет и второе название, а именно: двух-

фазный код со скачком фазы при передаче нуля, данное название является профессиональным и полностью отражает всю суть кодирования информации этим кодом. Код SMPTE является профессиональным кодом и применяется для синхронизации носителей звуковой и видеoinформации.

Потенциальное кодирование или же NRZ код является цифровым двоичным кодом, особенностью которого является то, что при передаче цифрового нуля данный код передает потенциал, который был установлен на предыдущем такте, а при передаче единицы потенциал инвертируется на противоположный. Благодаря этому данный код может с хорошей точностью распознавать ошибки в передаваемой информации. Из недостатков можно выделить тот факт, что этот код не обладает свойством самосинхронизации, а также имеет низкочастотную составляющую [1].

Манчестерское кодирование, особенностью данного кода является его способ кодирования информации, а именно, передаваемая информация кодируется перепадами потенциала в середине каждого такта, единица кодируется перепадом от низкого уровня к высокому, а ноль – наоборот. В связи с этим данный код обладает хорошей самосинхронизацией, а также в нём отсутствует постоянная составляющая. Манчестерское кодирование применяется в стандарте передачи цифровой информации IEEE802.3.

Код Рида-Соломона это блочный недвоичный циклический код, символы которого представляют собой m -битовые последовательности. Данный код предназначен для исправления одиночных и групповых ошибок, кроме исправления ошибок код Рида-Соломона может также восстанавливать стёртые или же неразборчивые символы. Всё это позволило коду Рида-Соломона занять обширную нишу в телекоммуникационных системах, например, данные коды используются в таких стандартах связи, как IEEE802.16, Internet, CCSDS и т.п. [1].

Биполярный код AMI, особенность кодирования информации данным кодом заключается в том, что цифровой ноль в данном коде представляется нулевым напряжением, а цифровая единица представляется остальными значениями отличными от нуля. Благодаря этому код обладает хорошей синхронизацией, а также довольно прост в реализации, из недостатков можно выделить низкую скорость передачи данных. Данный код используется в телефонной связи.

Улучшенной версией кода АМІ является код HDB3, отличающийся от АМІ тем, что для представления цифрового нуля или единицы используется четыре значения в место одного. Данный код также используется в телефонной связи.

Код MLT-3 основывается на циклическом переключении уровней напряжения, где единице соответствует переход с одного уровня сигнала на другой. Данный код обладает хорошей синхронизацией и применяется в сетях FDDI, а также в FAST Ethernet 100BASE-TX. Более подробно об этом коде можно прочитать в [1].

Свёрточные коды с применением декодера Витерби являются оптимальными и достаточно легко реализуемыми для коротких сверточных кодов. Из недостатков можно выделить тот факт, что данный способ применяется только для декодирования коротких кодов, т.к. с ростом длины кода возрастает и его сложность реализации. Данный вид кодирования применяется в беспроводных сетях IEEE802.11, IEEE802.16 дальней космической связи CCSDS, спутниковой связи TIA-1008 и т.п. Подробнее о декодере Витерби можно узнать из [4].

Свёрточные коды с применением последовательного декодера, данный способ помехоустойчивого кодирования применяется в отношении сверточных кодов с большой конструктивной длиной. Из недостатков следует выделить, что данный способ кодирования работоспособен только в области меньшей, чем вычислительная скорость канала, что накладывает серьёзные ограничения на использование этого алгоритма. В частности последовательное декодирование применяется в стандарте TIA-10008. Более подробно сверточные коды с применением последовательного декодера рассматриваются в работе [4].

Каскадные коды, в основе которых лежит идея совместного использования нескольких составляющих кодов, например код Рида-Соломона, код Хэмминга, код с проверкой на чётность и т.п., широко применяются в таких стандартах связи, как CCSDS, DVB-H/T/S, IEEE802.16 и т.п. Более подробно данный способ кодирования информации рассматривается в [4].

Многопороговый декодер самоортогональных кодов (МПДСОК), с помощью данного декодера возможно декодировать очень длинные коды с линейной от длины кода сложностью реализации. При этом МПДСОК способен вплотную приближаться к решению

оптимального декодера в достаточно широком диапазоне кодовых скоростей и уровней шума в канале передачи данных. Более подробно МПДСОК рассматриваются в [4], данные алгоритмы используются в таких стандартах связи, как CCSDS, IEEE802.16 и т.п.

Турбокоды, образующиеся путём каскадирования двух или более составляющих кодов, данные коды могут получаться как при последовательном, так и при параллельном соединении кодов, разделяемых перемежителем.

Так, данные коды подразделяются на два подтипа, к первому относятся свёрточные турбокоды (Turbo Convolutional Code – TCC), данный вид алгоритмов образуется путём параллельного каскадирования двух кодов через перемежитель. Применяются такие алгоритмы в основном беспроводной связи в таких стандартах, как CCSDS, TIA-1008, CDMA2000, UMTS.

Ко второму подтипу относятся так называемые турбокоды произведения (Turbo Product Code – TPC), они образуются путём последовательного каскадирования алгоритмов и применяются в таких стандартах связи, как INTELSAT, IEEE 802.16.

Низкоплотностные коды (LDPC-коды), также данные коды называют кодами с малой плотностью проверок на чётность. LDPC-коды представляют собой линейные блочные коды, задаваемые с помощью проверочной матрицы H , характеризуемой относительно малым числом единиц в строках и в столбцах. Проверочной матрице кода ставится в соответствие граф Тоннера, в котором для представления столбцов проверочной матрицы используются определённым образом связанные между собой битовые и проверочные узлы. Всё это позволяет практически вплотную приблизиться к пропускной способности канала при относительно небольшой сложности реализации. Данные коды применяются в таких стандартах связи, как DVB-S2, 802.11n, 802.16e. Подробно LDPC-коды рассматриваются в работах [3], [4].

Перспективные разработки в области помехоустойчивого кодирования

Последняя группа кодов, которые будут рассмотрены в данной статье, это коды, в настоящее время не используемые в стандартах связи, но при этом они являются очень перспективными разработками в помехоустойчивом кодировании и в скором времени могут войти в стандарты связи. К ним относятся:

Стеганографический алгоритм, особенно данным алгоритмом является способ кодирования информации. Для более простого понимания кодировки стеганографического алгоритма представлена схема:

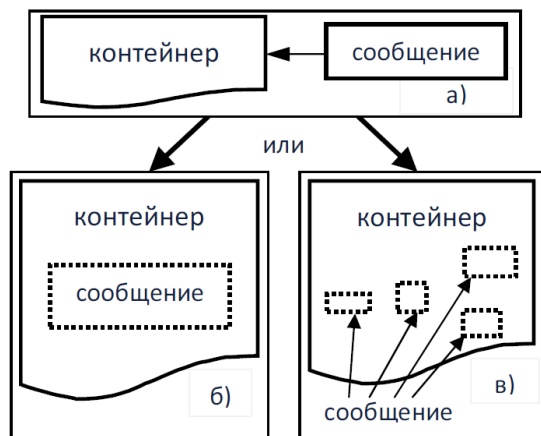


Схема работы стеганографического алгоритма

Согласно схеме, первоначально кодируемая информация записывается в открытый и при этом значительно больший по размеру и не чувствительный к малым искажениям поток данных (контейнер). Дальнейшая передача информации может происходить по нескольким путям, либо данный пакет информации остаётся единым, либо информация в конверте подразделяется на несколько подфайлов. Выбор пути передачи зависит от объёма передаваемой информации. Преимуществом данного метода является полная защита от внешних шумов и ошибок, к минусам можно отнести очень сложную реализацию алгоритма на практике. Подробно о стеганографическом алгоритме можно прочитать в [2].

Алгоритм Кловкого-Николаева (АКН) является перспективной разработкой кафедры ТОРС ПГАТЦ, который в настоящее время активно модернизируется и дорабатывается. АКН является алгоритмом с ограниченным расстоянием, то есть данный алгоритм помехоустойчивого кодирования исправляет все комбинации из n и менее ошибок, но при этом не исправляет ни одну из комбинаций большего веса. Данный факт открывает большие перспективы развития алгоритма. Подробно об алгоритме описано в [5].

Коды повторения – накопления (Repeat Accumulate – RA) являются одной из разновидностей каскадных кодов, данные алгоритмы сочетают в себе свойства турбо- и LDPC-

кодов, в своей основе состоят из повторителя, перемежителя и аккумулятора.

Улучшенной версией кодов повторения – накопления являются нерегулярные коды повторения – накопления (Irregular Repeat Accumulate – IRA). Как было отмечено выше, коды RA сочетают в себе свойства как турбокодов, так и кодов Галагера, благодаря свойствам последних в структуру кодов повторения – накопления можно внести нерегулярность и тем самым улучшить характеристики алгоритмов.

Коды произведения – накопления (Product Accumulate – PA) являются еще одной разновидностью каскадных кодов, отличительной особенностью которых является то, что в их структуре в качестве основных кодов используется турбокод произведения и рекурсивный свёрточный код, применение данных алгоритмов с последовательной схемой каскадирования позволяет получить наилучшие характеристики. Подробнее о кодах PA, RA и IRA можно прочитать в [7].

Характеристики помехоустойчивых кодов

Ниже приведены две таблицы, в первой представлено в каких стандартах связи и в каких областях применяются вышеописанные коды.

Таблица 1

Применение помехоустойчивых кодов

Название алгоритма	Стандарт	Применение
Код БЧХ	Ethernet 10BASE-T, Ethernet 100BASE-T	Локальные сети
Код Хэмминга	RAID2, ECC	Последовательный интерфейс ПК
Код SMPTE	DCP	Последовательный интерфейс, наземное телевидение
CRC код	MPEG-2, ANSIX 3.28	Наземное телевидение, последовательный интерфейс USB
NRZ код	RS232-C, RS-485, ATM155	Последовательный порт ПК, последовательный интерфейс
Манчестерское кодирование	IEEE 802.3, IEEE 802.4, IEEE 802.5	Локальные сети
Код Рида-Соломона	Ethernet 100BASE-T, IEEE 802.16	Локальные сети

Продолжение табл. 1

Код AMI	IEEE 802.4, Ethernet 100BASE-TX	Локальные сети
Код HDB3	IEEE 802.5, FDDI	Локальные сети
Код MLT-3	FDDI, Fast Ethernet 100BASE-TX	Локальные сети
Декодер Витерби СК	IEEE 802.11, IEEE 802.16, CCSDS, TIA-1008	Беспроводные сети, дальняя космическая связь, спутниковая связь
Последовательный декодер СК	TIA-1008	Спутниковая связь
Каскадный код	CCSDS, DVB-H/T/S, IEEE 802.16, TIA-1008	Дальняя космическая связь, спутниковая связь, наземное телевидение, беспроводные сети,
МПДСОК	CCSDS, TIA-1008, DVB-S2, IEEE 802.16	Дальняя космическая связь, спутниковая связь, беспроводные сети
Турбокод ТСС	CDMA2000, DVB-S, IEEE 802.16, CCSDS, TIA-1008, UMTS	3G, спутниковая связь, беспроводные сети, дальняя космическая связь
Турбокод ТРС	INTELSAT, IEEE 802.16.	Спутниковая связь, беспроводные сети
LDPC-код	DVB-S2, IEEE 802.16e, IEEE 802.11n, DVB – T2	Спутниковая связь, беспроводные сети, локальные сети, наземное телевидение
Стеганографический алгоритм	F5, FAT32, StegFS, ReiserFS, HIC-CUPS	Наземное телевидение, локальные сети, беспроводные сети
АКН	IEEE 802.11, IEEE 802.16,	Беспроводные сети,
Код RA	IEEE 802.16, TIA-1008	Спутниковая связь, беспроводные сети
Код IRA	IEEE 802.16	Беспроводные сети
Код PA	IEEE 802.16, IEEE 802.11	Беспроводные сети

В результате анализа таблицы можно прийти к выводу, что самыми распространенными областями применения помехоустойчивых кодов являются локальные сети, беспроводная радио и сотовая связь, спутниковая пе-

редача данных и наземное телевидение, что соответствует таким стандартам связи, как IEEE 802.4, IEEE 802.11, IEEE 802.16, TIA-1008, DVB – T2.

В табл. 2 сравниваются технические характеристики алгоритмов, такие как тактовая частота, количество итераций кода, пропускная способность и т.п.

Таблица 2

Характеристики помехоустойчивых кодов

Название алгоритма	Тактовая частота, МГц	Число итераций	Длина блока, бит	Кодовая скорость	E_b/N_0 дБ	
Код БЧХ	150	4	127	1/3	6,5	
	150	4	63	2/3	7,5	
	150	4	31	1/2	8	
	150	6	63	1/2	7	
	150	4	1023	1/2	5	
Код Рида-Соломона	150	6	31	1/3	8,5	
	160	5	255	0,7	6,3	
	160	10	255	0,48	6,8	
	160	5	255	0,9	7,3	
Декодер Витерби СК	160	10	255	0,35	7,5	
	220	14	7	1/2	4,5	
	200	10	7	1/2	4	
	200	5	7	1/2	3	
Турбокод ТСС	150	10	7	1/3	3,5	
	220	5	11	1/2	2	
	200	10	15	1/2	2	
	Последовательный декодер СК	140	34	41	1/2	3
		160	40	41	1/3	2,3
160		40	41	1/2	2,7	
Каскадный код	160	12	16000	1/2	2,5	
	150	12	16000	0,87	2,9	
	160	12	20000	0,4	2,9	
	150	12	20000	0,35	2,1	
МПДСОК	190	40	94100	1/2	2	
	200	40	40000	0,85	1,5	
	220	60	94100	1/2	1,6	
	200	220	94100	1/2	0,6	
	200	192	94100	1/2	1,2	
Турбокод ТСС	180	10	3060	1/2	1,5	
	180	25	16000	0,87	4,7	
	250	10	848	1/2	2,5	
	220	25	3060	1/2	1,3	
	200	30	1524	1/2	1,5	
	250	15	756	1/2	2	
	200	15	380	1/2	2,3	
Турбокод ТРС	200	10	4096	1/2	2	
	220	10	16000	0,88	1	
	200	10	16000	1/2	0,6	
	200	10	10000	1/2	1,7	
	200	10	1024	0,43	2,4	
	220	10	1024	0,66	3,4	
	200	10	4096	0,64	2,6	
	200	10	4096	0,79	3,4	

Продолжение табл. 2

LDPC-код	92	10	1000000	1/2	0,1
	100	10	64800	1/2	0,8
	100	20	16000	0,88	3,6
	100	20	2304	1/2	2
	90	10	64800	1/2	1,5
	100	10	700000	1/2	0,6
	100	20	10000	1/2	1,2
Стеганографический алгоритм	160	2	255	1/2	2,5
	160	2	1024	0,66	3,5
	160	2	16000	0,87	4,6
АКН	250	40	256	1/2	6,5
	250	20	256	1/2	5,6
	250	10	256	1/2	5,3
Код RA	200	20	10000	1/2	0,9
	200	20	16384	1/4	0,5
	200	20	4096	1/4	0,7
	200	20	16384	1/3	0,9
	200	20	4096	1/3	1,2
Код IRA	200	10	1000	1/2	1,5
	200	10	10000	1/2	0,9
	200	10	100000	1/2	0,5
Код PA	250	10	64536	1/2	1
	250	10	4096	1/2	1,6
	250	10	1024	1/2	1,8

Как видно из таблицы, лучшие характеристики по пропускной способности показывают турбокоды TRC, LDPC-коды и МПДСОК, что обуславливает их повсеместное применение во многих стандартах связи.

Самыми же простыми кодами в реализации (по числу итераций) являются такие коды, как БЧХ и коды Рида-Соломона, эти коды обладают простой структурой, но из-за этого неудовлетворяющей пропускной способностью, в связи с этим данные коды в настоящее время используются исключительно для обучения студентов или же в специализированных локальных сетях закрытого характера.

Новейшие коды, такие как стеганографический алгоритм и алгоритм Кловкого-Николаева, показывают средние показатели по пропускной способности, но этого не достаточно, особенно если сравнивать их с LDPC-кодом или же с МПДСОК. Также их техническая реализация в настоящее время достаточно сложна и требует доработки.

Наилучшими показателями по пропускной способности в сравнении с кодами Галагера показывают коды повторения – накопления и их модернизированная версия IRA. Данные

коды в скором будущем могут составить полноценную конкуренцию LDPC-кодам и МПДСОК, единственным ограничением использования данных алгоритмов в настоящее время является их сложная структура, которая не позволяет использовать данные алгоритмы во многих стандартах связи.

Заключение

В данной статье были рассмотрены алгоритмы помехоустойчивого кодирования, образцы кодов, которые уже давно существуют и зарекомендовали себя с наилучшей стороны, так и коды, которые в настоящий момент только разрабатываются. Из всего вышеописанного можно сделать вывод, что отрасль помехоустойчивого кодирования не стоит на месте и бурно развивается, и что в ближайшее время на рынке могут появиться новые виды помехоустойчивых алгоритмов, которые могут поменять в лучшую сторону стандарты связи.

Литература

1. Королев А.И. Коды и устройства помехоустойчивого кодирования информации. Минск: 2002. 286 с.
2. Асотов Д.В., Матвеев Б.В., Панычев С.Н. Применение стеганографических алгоритмов для повышения степени защиты конфиденциальности данных в цифровых системах передачи информации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12.1. С. 63 – 65.
3. Верификация LDPC-кодов / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков, М.В. Хорошайлова, О.Н. Чирков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 74 – 77.
4. Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных // Электросвязь. 2008. № 12. С. 58 – 61.
5. Багдасарян Д.А. Повышение помехоустойчивости передачи дискретных сообщений по радиоканалам в системах сотовой связи стандарта GSM при мягком декодировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13; Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики. Самара, 2005. 161 с.
6. Наконечный Б.М. Помехоустойчивые алгоритмы и процедуры отображения и передачи цифровой информации в телекоммуникационных системах с ограниченными энергетическими и частотными ресурсами: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13; МОУ «Институт инженерной физики». Серпухов, 2012. 142 с.
7. Гринченко Н.Н., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование для цифровых систем связи // Известия ТРТУ. 2006. № 15(70). С. 5 – 10.

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 21.03.2019

Информация об авторах

Костюков Александр Сергеевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Никитин Леонид Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: leonid-nikit@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0632-3041>

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bobylnkin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3300-3852>

Макаров Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: moy230@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2106-2027>

ANTI-INTERFERENCE CODING IN MODERN COMMUNICATION FORMATS

A.S. Kostyukov, A.V. Bashkirov, L.N. Nikitin, I.S. Bobylkin, O.Yu. Makarov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: noise-resistant coding is one of the most important branches of radio communications, thanks to which it is possible to transfer large amounts of digital information with a minimum number of errors. Therefore, the development of this area is extremely important for the radio engineering industry. This article considers various error-correcting codes that exist at the moment. Starting from the simplest and most common, such as Hamming code, parity codes, Bose-Chaudhuri-Hokvingham code, cyclic redundant code, potential coding, Reed-Solomon code, Manchester coding, etc. and ending with the advanced developments in the field of noise-resistant coding - the steganographic algorithm and the algorithm of Klovkoy-Nikolaev. The article describes their main characteristics, such as the signal clock frequency, the number of code iterations, the signal decoding rate, and the channel capacity. A brief description of each of the codes is presented and it is considered in which communication standard a particular noise-resistant code is used

Key words: anti-interference coding, turbo codes, cascade codes, Reed-Solomon code, LDPC code

References

1. Korolev A.I. "Codes and devices of noise-resistant information coding" ("Kody i ustroystva pomekhoustoychivogo kodirovaniya informatsii"), Minsk, 2002, 286 p.
2. Asotov D.V., Matveev B.V., Panychev S.N. "The use of steganographic algorithms to increase the degree of data privacy protection in digital information transfer systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 12-1, pp. 63-65.
3. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Kostyukov A.S., Khoroshaylova M.V., Chirkov O.N. "Verification of LDPC codes", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 74-77.
4. Zubarev Yu.B., Ovechkin G.V. "Interference-free coding in digital data transmission systems", *Telecommunications (Elektrosvyaz')*, 2008, no. 12, pp. 58-61.
5. Bagdasaryan D.A. "Improving the noise immunity of the transmission of discrete messages over radio channels in GSM cellular communication systems with soft decoding: Cand. tech. sci. diss." ("Povyshenie pomekhoustoychivosti peredachi diskretnykh soobshcheniy po radiokanalam v sistemakh sotovoy svyazi standarta GSM pri myagkom dekodirovani: dis. kand. tekhn. nauk"), Volga State Academy of Telecommunications and Informatics, Samara, 2005, 161 p.
6. Nakonechnyy B.M. "Interference-free algorithms and procedures for displaying and transmitting digital information in telecommunication systems with limited energy and frequency resources: Cand. tech. sci. diss." ("Pomekhoustoychivye algoritmy i protsedury otobrazheniya i peredachi tsifrovoy informatsii v telekommunikatsionnykh sistemakh s ogranichennymi energeticheskimi i chastotnymi resursami: dis. kand. tekhn. nauk"), Institute of Engineering Physics, Serpukhov, 2012, 142 p.
7. Grinchenko N.N., Ovechkin G.V. "Interference-free coding for digital communication systems", *News of TSURE (Izvestiya TRTU)*, 2006, no. 15 (70), pp. 5-10.

Submitted 22.02.2019; revised 21.03.2019

Information about the authors

Aleksandr S. Kostyukov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: fab7@mail.ru

Leonid N. Nikitin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: leonid-nikit@yandex.ru

Igor' S. Bobylkin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bobylnkin@bk.ru

Oleg Yu. Makarov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДЕКОДИРОВАНИЯ LDPC-КОДОВ ДЛЯ 5G БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложен обобщенный алгоритм декодирования min-sum, использующий линейное приближение (от англ. a Linear Approximation Min-Sum, LAMS) для кодов низкой плотности проверки на четность с квазициклическими структурами (от англ. Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check, QC-LDPC). Линейное приближение вводит некоторые факторы на каждой итерации декодирования, которые линейно корректируют обновление проверочного узла и выходные данные канала. Эти факторы итеративно оптимизируются с использованием нейронного обучения, где оптимизация может быть эффективно решена с помощью небольшой и неглубокой нейронной сети с обучающими данными, полученными с помощью декодера LAMS. Нейронная сеть построена в соответствии с матрицей проверки четности кода QC-LDPC со структурой контроля четности, которая может значительно уменьшить размер нейронной сети. Поскольку мы оптимизируем коэффициенты один раз за итерацию декодирования, оптимизация не ограничивается количеством итераций. Затем задаем оптимизированные результаты коэффициентов в декодере LAMS и выполняем моделирование декодирования для QC-LDPC кодов в мобильных сетях пятого поколения (5G). При моделировании алгоритм LAMS показывает заметное улучшение по сравнению с алгоритмами нормализованной и минимальной суммы смещения и даже лучшую производительность, чем алгоритм распространения доверия (the belief propagation algorithm) в некоторых областях с высоким отношением сигнал/шум

Ключевые слова: квази-циклические низкоплотностные коды, алгоритм декодирования min-sum, нейронные сети, оптимизация декодирования

Введение

За последние десятилетия большое внимание уделялось кодам низкой плотности проверки на четность (LDPC). Коды LDPC (QC-LDPC) с квазициклическими структурами постепенно становятся технологией кодирования основного потока для различных систем связи. Важным событием является то, что вариант расширенной мобильной широкополосной связи (от англ. the enhanced mobile broadband, EMBB) в мобильных сетях 5-го поколения (5G) принимает два набора кодов QC-LDPC, определенных матрицами проверки на четность BG1 и BG2. Матрицы BG1 и BG2 построены из протографов [1] с квазициклическими (QC) масштабируемыми структурами, которые могут поддерживать скорость совместимого кодирования от десятков до тысяч ГГц передачи информации.

Хотя алгоритм распространения доверия (BP) может достигать почти оптимальной производительности для LDPC-кодов 5G технологии, упрощенные версии алгоритма BP, такие как минимальная сумма (MS), нормализованная MS (NMS) и MS со смещением (OMS) алгоритма, широко используются в практических приложениях благодаря их легкой аппаратной реализации [1 - 3].

Здесь алгоритмы NMS и OMS могут достичь заметного улучшения производительности при декодировании MS с нормализованным и смещенным коэффициентами соответственно. Поскольку функции tanh заменяются операциями сравнения в вычислениях обновления проверочного узла, существуют значительные потери производительности для упрощенных алгоритмов по сравнению с алгоритмом BP, особенно для условий низкой скорости, средней и короткой длины и конечных итераций.

В последнее время использование нейронных сетей предоставляет новую перспективу для оптимизации декодирования. В [4 - 6] декодеры BP и MS для коротких длин с высокой плотностью контроля четности (HDPC) оптимизированы глубоко рекуррентными нейронными сетями. Стандартные декодеры значительно улучшены за счет оптимизации различных факторов для вывода каждого переменного узла и проверки узла на каждой итерации.

Однако размер сети увеличивается с длиной кода и максимальным количеством итераций. Для большей длины кода и большего количества итераций сеть может быть слишком сложной для ее дальнейшей оптимизации. В [7] рассматривается идея использования глубоких нейронных сетей для декодирования случайных и полярных кодов.

В этой статье мы предлагаем метод, основанный на машинном обучении для оптимизации

ции упрощенных алгоритмов на основе ВР. Во-первых, мы предлагаем обобщенный алгоритм MS с использованием линейного приближения (LAMS), в котором величины выходного сигнала проверочного узла модифицируются не только с помощью нормализованного или смещенного коэффициента, такого как алгоритм NMS или OMS, но и с помощью линейной функции, содержащей оба фактора. Кроме того, алгоритм LAMS также модифицирует выходной сигнал канала с помощью аналогичной линейной функции. Затем мы строим нейронную сеть через граф QC-LDPC-кода и настраиваем параметры алгоритма LAMS для оптимизации соответствующей сети.

Наша нейронная сеть не глубокая, потому что она выполняет только один итерационный процесс декодирования и получает соответствующие оптимизированные факторы. Когда текущая итерация завершена, оптимизированные коэффициенты сохраняются для расчета входных данных сети для следующей итерации. Оптимизация следующей итерации начинается, когда нейронная сеть переинициализируется и входные данные отправляются обратно. Мы используем локальное оптимальное решение каждой итерации вместо глобального оптимального решения всех итераций, чтобы уменьшить глубину сети и сложность вычислений. С помощью структур контроля качества LDPC-кодов стандарта 5G сложность нашей нейронной сети существенно не увеличится с длиной кода, где несколько битов могут обрабатываться параллельно. Количество операционных единиц в каждом слое нейронной сети также прямо пропорционально масштабу протографа, который намного меньше, чем у матрицы контроля четности.

Поскольку нейронная сеть не слишком сложна, мы можем оптимизировать декодер LAMS для LDPC-кодов с длиной кода в тысячами бит и десятками номеров итераций. Мы используем алгоритм LAMS на матрице 5G BG2 и выполняем моделирование для различных длин кода, скоростей кода и числа итераций. Результаты моделирования показывают, что алгоритм LAMS имеет очевидные преимущества перед алгоритмами NMS и OMS. По мере того как отношение сигнал / шум (от англ. the signal-to-noise ratio, SNR) увеличивается, а частота ошибок блока (от англ. block error rate, BLER) уменьшается, разрыв между алгоритмами LAMS и ВР постепенно уменьшается. Для некоторых условий с высоким SNR производительность BLER алгоритма LAMS превышает производительность алгоритма ВР.

Оптимизация декодирования с использованием нейронных сетей

Коэффициенты $\alpha_i, \beta_i, \alpha_i^{ch}$ и β_i^{ch} каждой итерации $i=0, 1, \dots, I-1$ в алгоритме LAMS можно оптимизировать итеративно с использованием машинного обучения, как показано на рис. 1 (а). Здесь α – нормированный коэффициент для минимизации ошибки аппроксимации упрощения минимальной суммы, β – коэффициент смещения, коэффициенты $\alpha_i^{ch}, \beta_i^{ch}$ используются для линейной регулировки величины накала LLR.

Полный LAMS алгоритм показан в алгоритме 1, где выходные данные канала r_n обрабатываются для получения окончательных закодированных битов $w = w^j$. Поскольку четыре коэффициента очень трудно оптимизировать для каждой итерации с помощью традиционных методов анализа и моделирования, мы используем машинное обучение для оптимизации.

Ниже приведены некоторые формулы, необходимые при вычислении алгоритма декодирования LSMS.

Матрица может быть представлена двудольным графом, который образован N переменными узлами $v_n, n \in N = \{0, 1, \dots, N-1\}$, M проверочными узлами $c_m, m \in M = \{0, 1, \dots, M-1\}$ и J ребер $e_j, j \in J = \{0, 1, \dots, J-1\}$.

В начале ВР-декодирования, 0-й итерации, LLR отправляется с переменного узла $v_n, n \in N$ к соседнему проверочному узлу $c_m, m \in A(n)$ обозначается следующим образом

$$l_{n \rightarrow m}^0 = l_n^{ch}. \quad (1)$$

Для каждой итерации $i=0, 1, \dots, I-1$, проверочный узел $c_m, m \in M$ получает $l_{n \rightarrow m}^i$ от своих соседних $v_n, n \in B(m)$ и передает обратно LLR соответствующим переменным узлам.

Для следующей итерации $i+1$ обновленное LLR должно быть отправлено с переменного узла $v_n, n \in N$ к проверочному узлу $c_m, m \in A(n)$ снова, что отличается от начала декодирования в уравнении (1). Это можно представить следующим образом:

$$l_{n \rightarrow n}^{i+1} = l_n^i - l_{m \rightarrow n}^i, \quad (2)$$

где $l_{n \rightarrow m}^i$ и l_n^i являются выходами проверочных узлов и переменных узлов в предыдущей итерации, соответственно. Затем итеративное декодирование продолжается до тех пор, пока декодирование не закончится.

Аппроксимация для каждой итерации определяется уравнением

$$l_{m \rightarrow n}^i = \left(\prod_{n' \in B(m), n} \text{sign}(l_{n' \rightarrow m}^i) \right) \max(\alpha_i \min(\|l_{n' \rightarrow m}^i\|) + \beta_i, 0), \quad (3)$$

где коэффициенты α_i, β_i имеют только линейное влияние на величину LLR и не меняют ее знак.

Кроме того, коэффициенты α_i^{ch} и β_i^{ch} также используются для линейной регулировки величины канала LLR следующим образом

$$l_n^i = \text{sign}(l_n^{ch}) \max(\alpha_i^{ch} |l_n^{ch}| + \beta_i^{ch}, 0) + \sum_{m \in A(n)} l_{m \rightarrow n}^i. \quad (4)$$

Машинное обучение использует нейронную сеть только с тремя слоями на рис. 1 (б), которая снабжается базой данных LLR для обучения.

Алгоритм 1. Алгоритм декодирования LAMS

```

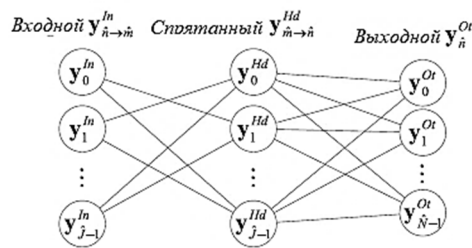
1: Инициализация.
2: for all n ∈ N do
3:   for all m ∈ A(n) do
4:     Установить l_{n→m}^0 = l_n^{ch} = r_n
5:   end for
6: end for
7: Установить i=0
8: repeat
9:  Обновление проверочного узла:
10:  for all m ∈ M do
11:   for all n ∈ B(m) do
12:    Получить l_{m→n}^i, используя выражение (3)
13:   end for
14: end for
15: Расчет выхода:
16: for all n ∈ N do
17:  Получить l_n^i, используя выражение (4)
18:  Получить w_n^i = (1 - sign(l_n^i)) / 2
19: end for
20: Получить w^i = [w_0^i, w_1^i, ..., w_{N-1}^i]^T
21: Обновление проверочных узлов для следующих итераций:
22: for all n ∈ N do
23:   for all m ∈ A(n) do
24:    Получить l_{n→m}^{i+1}, используя уравнение (2)
25:   end for
26: end for
27: Получить i=i+1
28: until i = I или Hw^i = 0
29: return w^i
    
```

На первом уровне, называемом входным уровнем, принятые LLR нейронной сети назначаются следующему уровню, подобно сообщению, проходящему от переменных узлов Γ проверочным узлам. На втором уровне, называемом скрытым уровнем, LLR вычисляются и передаются на последний уровень, где процедура аналогична обновлению проверочного узла уравнением (3) в алгоритме LAMS. На последнем уровне, называемом выходным уровнем, LLR

окончательно обновляются в соответствии с уравнением (4). Подобно одной итерации LDPC-декодирования, нейронная сеть управляет потоком LLR и оптимизирует четыре коэффициента на внутреннем и последнем уровнях. При больших объемах LLR данных нейронная сеть может обучать коэффициенты в i -й итерации, $\alpha_i, \beta_i, \alpha_i^{ch}$ и β_i^{ch} , чтобы минимизировать разрыв между выходными и целевыми кодами посредством стохастического градиентного показателя. Когда оптимизация коэффициентов завершена, четыре оптимизированных коэффициента сохраняются и используются для вычисления LLR для следующей итерации с помощью LAMS декодера, описанного в алгоритме 1. Затем LLR отправляются обратно в качестве обучающих данных, чтобы начать оптимизацию для следующей итерации, где нейронная сеть должна была быть инициализирована.



а)



б)

Рис. 1. Процедура оптимизации с использованием нейронной сети и итеративного LAMS декодера (а); нейронная сеть для оптимизации с входным, скрытым и выходным слоями, которые имеют операционные блоки, подключенные в соответствии с протографом (б)

Поскольку LDPC-коды в 5G новой радиосвязи принадлежат к семейству LDPC-кодов со структурами QC, операционный блок нейронной сети на рис. 1 (б) может работать с набором Z битов одновременно, где Z является коэффициентом подъема матрицы контроля четности. Это делает количество рабочих единиц равным количеству ребер или узлов в протографе.

Результаты моделирования

При моделировании использовали нейронную сеть с частотой обучения 0,1, количеством

тренировок 500, размером партии 500. Начальные значения четырех коэффициентов $\alpha_i, \beta_i, \alpha_i^{ch}$ и β_i^{ch} установлены 0,7, 0, 1 и 0 соответственно. Чтобы сделать коэффициенты более практичными для реализации, мы устанавливаем точность четырех коэффициентов на 0,1, что означает округление значения после обучения. Нейронная сеть построена в соответствии с матрицей проверки четности скорости BG2 [8] с размером подъема $Z = 52$ и информационной длиной $K = 520$. Начальные обучающие данные LLR собираются путем приема модулированных сигналов двоичной фазовой манипуляции (от англ. binary phase-shift keying, BPSK) из битов с нулевым кодированием через канал с аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN) с отношением сигнал/шум (от англ. signal-to-noise ratio, SNR) $E_s/N_0 = -4,0$ (дБ), где первые $2Z=104$ битов кодового слова пробиты. Если у большого количества промежуточных переменных недостаточно места для хранения, мы будем использовать двоичный файл для чтения и записи переменных на жесткий диск. Результаты обучения приведены в таблице, где четыре переменных перечислены в соответствии с итерацией $i = 0, 1, \dots, 29$.

Таблица нормированных и смещенных коэффициентов, оптимизированных нейронной сетью для каждой итерации

i	α_i	β_i	α_i^{ch}	β_i^{ch}	i	α_i	β_i	α_i^{ch}	β_i^{ch}
0	0.8	0	1.5	0.1	15	0.9	-0.2	1.3	0.2
1	0.7	-0.2	1.5	0.1	16	0.8	-0.2	1.3	0.2
2	0.7	-0.2	1.5	0.1	17	0.9	-0.2	1.3	0.2
3	0.8	-0.2	1.5	0.1	18	0.8	-0.2	1.3	0.2
4	0.8	-0.2	1.5	0.1	19	0.8	-0.2	1.3	0.2
5	0.8	-0.2	1.5	0.1	20	0.8	-0.2	1.3	0.2
6	0.8	-0.2	1.4	0.1	21	0.8	-0.2	1.2	0.2
7	0.9	-0.2	1.4	0.1	22	0.8	-0.2	1.2	0.2
8	0.9	-0.2	1.4	0.1	23	0.8	-0.2	1.2	0.1
9	0.9	-0.2	1.4	0.1	24	0.9	-0.2	1.2	0.1
10	0.9	-0.3	1.4	0.2	25	0.8	-0.2	1.2	0.1
11	0.9	-0.3	1.4	0.2	26	0.8	-0.1	1.2	0.1
12	0.9	-0.3	1.4	0.2	27	0.8	-0.2	1.2	0.1
13	0.9	-0.3	1.3	0.2	28	0.8	-0.1	1.2	0.1
14	0.9	-0.3	1.3	0.2	29	0.8	-0.1	1.2	0.1

Мы используем BG2 [10] 3GPP в качестве матрицы проверки четности декодера. Мы сравниваем различные декодеры, BP, NMS и OMS-декодеры, чтобы проиллюстрировать преимущества нашего оптимизированного LAMS-декодера. Алгоритмы NMS и OMS устанавливают нормализованные коэффициенты и коэффициенты смещения равными 0,7 и -0,2 соответственно, которые оптимизируются путем моделирования в пределах диапазона точности 0,1, как коэффициенты алгоритма LAMS.

Кодированные биты модулируются посредством BPSK и передаются по каналу AWGN.

На рис. 2 показаны четыре схемы декодирования, алгоритмы BP, LAMS, OMS и NMS при моделировании на различных итерациях $I = 10, 15, 30$. Разрывы производительности декодирования между алгоритмом LAMS и алгоритмом BP с большим количеством итераций меньше, чем с меньшим количеством итераций.

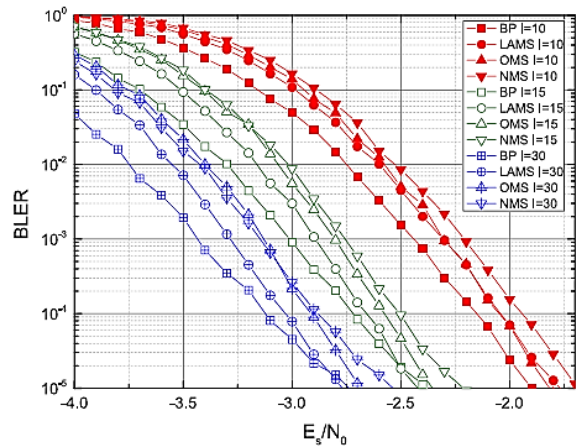


Рис. 2. BLER производительность 5G кодов с информационной длиной $K = 520$, кодовая скорость $R = 1/3$ и разные итерации $I = 10, 15, 30$

Когда число итераций равно $I = 10$, производительность алгоритма LAMS аналогична производительности алгоритма OMS и не показывает существенных преимуществ. Однако для итерации $I = 15$ наш LAMS-декодер явно лучше, чем алгоритмы OMS и NMS. Когда SNR больше чем -2,5 (дБ), алгоритм LAMS даже показывает лучшую производительность, чем алгоритм BP, что может быть результатом лучшего минимального уровня ошибки алгоритма LAMS. Аналогичная ситуация может наблюдаться, когда число итераций равно 30. Результат, когда алгоритм LAMS работает лучше в области высокого SNR, неудивителен, поскольку алгоритм BP не оптимален для коротких длин кода и ограниченного числа итераций, что вызвано увеличением корреляций при передаче сообщений [9]. Следовательно, благодаря уменьшению отрицательного эффекта корреляций оптимизированные декодеры LAMS могут превзойти BP-декодер в некоторых конкретных случаях.

На рис. 3 показаны рабочие характеристики кодов скорости 1/3 с различной длиной информации для четырех декодеров, где максимальное число итераций установлено в $I = 15$. Как видно из рисунка, наш алгоритм LAMS работает лучше при коротких информационных длинах. Для информационных длин $K = 260$ и $K = 520$ декодеры LAMS даже превосхо-

дят ВР-декодеры, когда SNR больше, чем примерно -2,2 (дБ) и -2,5 (дБ) соответственно.

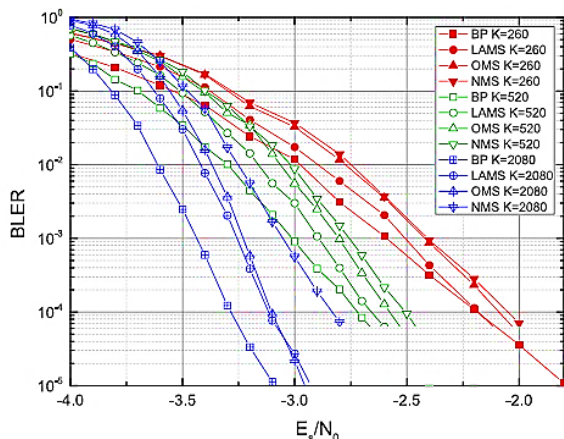


Рис. 3. BLER производительность 5G кодов с кодовой скоростью $R = 1/3$, число итераций $I = 15$ и различные длины информации $K = 260; 520; 2080$

Как показано на рис. 4, мы также сравниваем четыре алгоритма для LDPC-кодов с разными скоростями кодирования. Хотя прототипы LDPC-кодов с более низкими скоростями $1/4$ и $1/5$ весьма различны для кода со скоростью $1/3$, в декодировании LAMS используются те же оптимизированные коэффициенты в каждой итерации, показанной в таблице. Для этих трех кодовых скоростей алгоритм LAMS может обеспечить лучшую производительность, чем алгоритмы NMS и OMS. Чем выше кодовая скорость, тем больше преимущество производительности для декодера LAMS. По мере увеличения SNR разрыв между декодером LAMS и декодером ВР постепенно сокращается. По сравнению с алгоритмом OMS алгоритм LAMS обладает большей устойчивостью, чтобы поддерживать отличную производительность при одинаковых оптимизированных коэффициентах для разных скоростей кодирования.

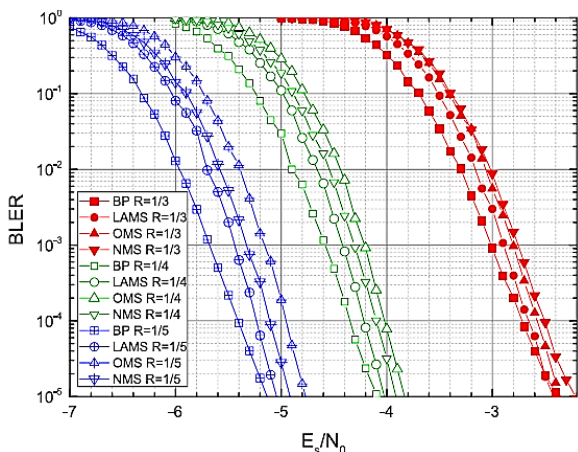


Рис. 4. Эффективность BLER кодов 5G с длиной информации $K = 520$, количеством итераций $I = 15$ и различными скоростями кодирования $R = 1/3, 1/4, 1/5$

Заключение

Здесь предложен алгоритм LAMS, который использует линейную аппроксимацию вместо одной нормализации или смещения для модифицированного обновления проверочного узла. Кроме того, также модифицируем вычисление LLR из канала AWGN с линейным приближением. Используем небольшую и неглубокую нейронную сеть для обучения соответствующих значений каждой итерации, где коэффициенты устанавливаются в одинаковые значения для всех ребер прохождения сообщений в декодере. Используя структуры контроля качества, мы делаем размер нейронной сети сопоставимым с размером протографа. Поскольку здесь оптимизируются параметры только одной итерации за раз, нейронная сеть имеет только три уровня, что позволяет проводить обучение, не требуя обширных вычислительных ресурсов. Наконец, обучаем набор коэффициентов для 30 итераций и проводим моделирование для LAMS декодера. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый LAMS декодер может работать лучше, чем декодеры NMS и OMS, и даже при высоком SNR, чем декодер ВР.

Литература

1. Protograph-based raptor-like LDPC codes / T.Y. Chen, K. Vakilinia, D. Divsalar, and R.D. Wesel // IEEE Trans. Commun. 2015. Vol. 63. № 5. Pp. 1522-1532.
2. Reduced-complexity decoding of LDPC codes / J. Chen, A. Dholakia, E. Eleftheriou, M.P.C. Fossorier, and X.-Y. Hu // IEEE Trans. Commun. 2005. Vol. 53. № 8. Pp. 1288-1299.
3. Richardson T. and Urbanke R. Modern Coding Theory // Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2008.
4. Nachmani E. and Be'ery Y., and Burshtein D. Learning to decode linear codes using deep learning // in Proc. 54th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput. (Allerton), Sep. 2016. Pp. 341-346.
5. Lugosch L. and Gross W.J. Neural offset min-sum decoding // in Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory. 2017. Pp. 1361-1365.
6. Deep learning methods for improved decoding of linear codes / E. Nachmani, E. Marciano, L. Lugosch, W.J. Gross, D. Burshtein, and Y. Be'ery // IEEE J. Sel. Topics Signal Process. 2018. Vol. 12. № 1. Pp. 119-131.
7. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., and ten Brink S. On deep learning-based channel decoding // in Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS). 2017. Pp. 1-6.
8. Хорошайлова М.В. Анализ сложности алгоритмов декодирования двоичных LDPC-кодов // Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах: тез. докл. 3-й Междунар. конф. с элементами научной школы. 2016. С. 155-156.
9. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
10. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В. Использование вынужденной конвергенции для снижения сложности

Поступила 29.01.2019; принята к публикации 12.04.2019

Информация об авторах

Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Хорошайлова Марина Владимировна – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

USING NEURAL NETWORKS TO OPTIMIZE DECODING LDPC CODES FOR 5G WIRELESS NETWORK**I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova****Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

Abstract: in this article, we propose a generalized min-sum decoding algorithm using linear approximation (LAMS) for low density parity check codes with quasi-cyclic structures (QC-LDPC). The linear approximation introduces some factors at each decoding iteration that linearly correct the update of the test node and the output of the channel. These factors are iteratively optimized using neural learning, where optimization can be effectively solved using a small and shallow neural network with training data obtained using a LAMS decoder. The neural network is built in accordance with the parity check matrix of the QC-LDPC code with a parity structure that can significantly reduce the size of the neural network. Since we optimize coefficients once per iteration of decoding, optimization is not limited to the number of iterations. Then we set the optimized coefficient results in the LAMS decoder and perform decoding simulation for QC-LDPC codes in fifth-generation mobile networks (5G). In the simulation, the LAMS algorithm shows a noticeable improvement compared to the normalized and minimum amount of bias algorithms and even better performance than the belief propagation algorithm in some areas with a high signal-to-noise ratio

Key words: quasi-cyclic low-density codes, min-sum decoding algorithm, neural networks, decoding optimization

References

1. Chen T.Y., Vakilinia K., Divsalar D., Wesel R.D. "Protograph-based raptor-like LDPC codes", *IEEE Trans. Commun.*, 2015, vol. 63, no. 5, pp. 1522-1532.
2. Chen J., Dholakia A., Eleftheriou E., Fossorier M.P.C., Hu X.-Y. "Reduced-complexity decoding of LDPC codes", *IEEE Trans. Commun.*, 2005, vol. 53, no. 8, pp. 1288-1299
3. Richardson T., Urbanke R. "Modern coding theory", Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, 2008.
4. Nachmani E., Be'ery Y., Burshtein D. "Learning to decode linear codes using deep learning", *Proc. 54th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput. (Allerton)*, 2016, pp. 341-346.
5. Lugosch L., Gross W.J. "Neural offset min-sum decoding", *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, 2017, pp. 1361-1365
6. Nachmani E., Marciano E., Lugosch L., Gross W.J., Burshtein D., Be'ery Y. "Deep learning methods for improved decoding of linear codes", *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 119-131.
7. Gruber T., Cammerer S., Hoydis J., ten Brink S. "On deep learning-based channel decoding", *Proc. 51st Annu. Conf. Inf. Sci. Syst. (CISS)*, 2017, pp. 1-6.
8. Khoroshaylova M.V. "Analysis of the complexity of decoding algorithms for non-binary LDPC codes", *Proc. of the 3rd International Conf. with Elements of a Scientific School: Actual Problems of Energy Saving and Efficiency in Technical Systems (Aktual'nye problemy energosberezheniya i effektivnosti v tekhnicheskikh sistemakh: tez. dokl. 3-y Mezhdunar. konf. s elementami nauchnoy shkoly)*, Tambov, 2016, 155-156 pp.
9. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105
10. Bashkurov A.V. "Use forced to reduce the convergence complexity LDPC decoding", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 69-73

Submitted 29.01.2019; revised 12.04.2019

Information about the authors

Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: riss-ka@mail.ru

Marina V. Khoroshaylova, Assistant, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel.: 8-910-732-66-13

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.2.019

УДК 621.828.3 (035)

ПОГРЕШНОСТИ БАЛАНСИРОВКИ РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.М. Рыженков, В.В. Тихомиров

**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия**

Аннотация: рассмотрены возможные причины возникновения основных погрешностей балансировки при изготовлении роторных систем газотурбинных двигателей. К ним относятся погрешности от несовмещения установочных баз при сборке роторов и погрешности в технологической системе «станок+оснастка+ротор». Как показывают расчёты, погрешности от несовмещения баз (монтажные дисбалансы) могут многократно превышать допустимые. Измерение биений посадочных мест роторов, расчёт и установка соответствующих корректирующих масс во многих случаях позволяют достаточно точно компенсировать монтажные дисбалансы. Если же достигнутая при этом точность не соответствует техническим требованиям к ротору, то при балансировке следует использовать специальные технологические оправки, а погрешности в системе «станок+оснастка+ротор» определять экспериментально-аналитическими методами. Проверку паспортной точности балансировочного оборудования осуществляют в соответствии с рекомендациями ISO контрольными роторами трёх основных типов. В серийном производстве погрешности оценивают с помощью тарировочных роторов, геометрически и физически подобных выпускаемым. При экспериментальных исследованиях кроме определения дисбалансов следует измерять значения и угловые положения (фазы) биения контрольных поверхностей роторов. Разработанные в результате проведённых исследований рекомендации позволяют выявить доминирующие погрешности балансировки, определить и устранить их причины, что без существенных затрат может обеспечить заметное повышение качества выпускаемых двигателей

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, определение погрешностей балансировки ротора, уменьшение погрешностей балансировки

Введение

Балансировка – обязательная операция технологического процесса производства деталей, сборочных единиц и роторов двигателей. Технические требования чертежей устанавливают допустимые остаточные дисбалансы, способы коррекции масс и установочные базы при балансировке сборочных единиц и роторов. По объективным, а чаще по субъективным причинам, заданные установочные базы не совпадают с осью ротора в составе роторных каскадов – ротора низкого давления и ротора высокого давления. Несовмещение баз приводит к погрешностям балансировки, назовём которые погрешностями первого рода.

Балансировку выполняют в технологической системе «балансировочный станок+оснастка+ротор», в которой возникают производственные погрешности [1] – погрешности второго рода. Эти погрешности разделяют на три группы: 1) неточности балансировочного станка; 2) погрешности установки ротора в приспособлении; 3) погрешности установки приспособления на станке.

Погрешности первого рода определяются расчётным способом, а второго рода – экспериментально – аналитическими методами.

1. Погрешности балансировки от несовмещения баз

В газотурбинных двигателях роторы низкого давления состоят из роторов компрессора (КНД) (рис. 1) и турбины (ТНД), соединение которых осуществляется посредством фланцев, по эвольвентным шлицам или с помощью шлицевого промежуточного вала. На эксплуатационных режимах работы несущими поверхностями этих роторов являются поверхности цапф (или внутренние беговые дорожки подшипников) и профили шлицев. Линии, соединяющие центры этих поверхностей, образуют геометрическую ось ротора. При несовмещении геометрической оси с балансировочной осью возникает погрешность балансировки, называемая монтажным дисбалансом. Его значение зависит от геометрии масс ротора и точности изготовления шлицев. На рис. 2 показано положение несомещённых геометрической и балансировочной осей ротора.

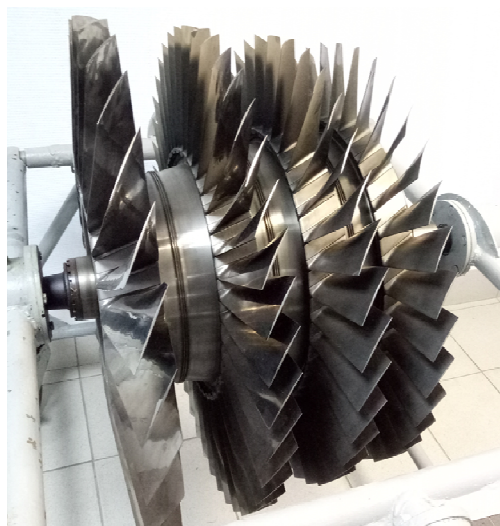


Рис. 1. Ротор компрессора низкого давления

Эксцентриситет центра масс ротора определяется по формуле:

$$e_{ст} = e / L, \quad (1)$$

а угол между осями:

$$\Theta = e / L. \quad (2)$$

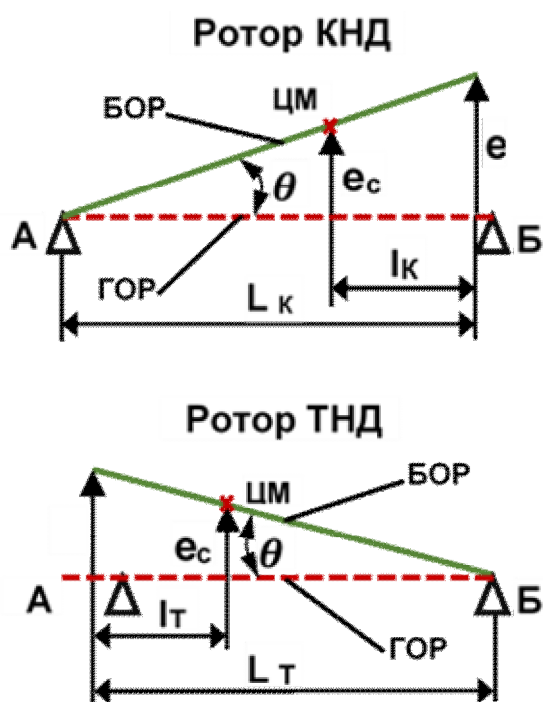


Рис. 2. Несоосность осей роторов низкого давления. А, Б - опоры; ЦМ – центр масс; ГОР – геометрическая ось ротора; БОР – балансировочная ось ротора

Значение и угол монтажных дисбалансов вычисляется по следующим формулам: главный вектор дисбалансов

$$D_{ст} = m_{рот} e_{ст}, \quad (3)$$

главный момент дисбалансов

$$M_D = (I_э - I_о) \Theta. \quad (4)$$

Здесь $m_{рот}$ – масса ротора, $I_э$, $I_о$ – соответственно экваториальный и полярный моменты инерции ротора.

Рассмотрим пример расчёта монтажных дисбалансов ротора КНД. Исходные данные для расчёта:

масса – 180 кг;

моменты инерции – 14 и 5 кгм²;

расстояние от цапфы до шлицев – 700 мм, расстояние от шлицев до центра масс ротора – 230 мм;

допустимый эксцентриситет делительной окружности шлиц Эв.100 x 2,5 x 40 S₄ – 0,025 мм (25 мкм);

допустимые остаточные дисбалансы в плоскостях опор – 120 гмм и 255 гмм (класс точности балансировки G3).

В результате расчётов по формулам (1...4) получаем предельно возможные монтажные дисбалансы: $D_{ст} = 3020$ гмм, $M_D = 320000$ гмм², а в плоскостях опор – 1380 гмм и 1570 гмм.

Монтажный дисбаланс может превышать допустимый остаточный во много раз. Но его можно уменьшить расчётным способом. Рассмотрим это на примере ротора ТНД, который балансируют относительно баз (опор) А и Б (рис. 2). Порядок выполнения работ следующий.

1) Измерить значение и фазу радиального биения профиля шлицев A_0 относительно контрольной поверхности вала. В качестве такой поверхности выбирается наиболее точная по форме поверхность.

2) Установить ротор на балансировочный станок базами А и Б.

3) Измерить величину и фазу радиального биения контрольной поверхности A_1 относительно поверхностей вала А и Б.

4) Вычислить несоосность Δ_0 и перекося Θ_0 балансировочной и геометрической осей ротора в плоскости крепления вала к колесу ступени ротора по формулам:

$$\Delta_0 = 0,5 (A_0 + A_1) \text{ [мкм]} \quad (5)$$

$$\Theta_0 = \Delta_0 : L \times 10^{-3} \text{ [рад.]} \quad (6)$$

Здесь А, Δ , Θ – векторные величины.

5) Вычислить главный вектор $D_{ст}$ и главный момент дисбалансов M_D , возникающие от несовмещения геометрической и балансировочной осей ротора ТНД.

6) Вычислить уравновешивающие массы, компенсирующие монтажный дисбаланс, и установить их в плоскостях коррекции.

После компенсации монтажного дисбаланса ротор балансируют до допустимых остаточных дисбалансов и снимают уравнивающие массы.

Точность этого способа зависит от погрешности измерения величин и фаз биений. В производственных условиях измерение биений поверхностей обычно выполняют по 8-ми равномерно расположенным точкам окружности с погрешностью около 2 мкм. Если расчётный способ компенсации монтажного дисбаланса не удовлетворяет требуемой точности балансировки, то тогда надо балансировать ротор относительно геометрической оси. Для реализации такой балансировки требуется специальная оснастка – шлицевая цанговая оправка, которая устанавливается на шлицы вала и является балансировочной базой ротора.

2. Производственные погрешности балансировки роторов

2.1. Неточности балансировочного станка

Проверку точности балансировочного станка выполняют по рекомендациям ISO 21940-21 с контрольными роторами типа А, В или С и набором контрольных грузов для этих роторов. Основным показателем точности станка – минимально достижимый остаточный дисбаланс, который выражается через удельный дисбаланс в гмм/кг. Его допустимое значение для станков нормальной точности – 0,4 гмм/кг.

Балансировка конкретного ротора ведётся в технологической системе «балансировочный станок+оснастка+ротор». Поэтому неточность станка будет зависеть от погрешностей измерительной системы, системы привода, наличия паразитной массы оснастки и геометрии масс ротора. Значение и угол этой погрешности находится экспериментально-аналитическим способом с помощью тарировочного ротора – одного из серийных роторов, используемого для тарирования технологической системы. Порядок выполнения экспериментальных работ следующий:

1) Сбалансировать тарировочный ротор до допустимых остаточных дисбалансов постановкой временных грузов. Измерить главный вектор $\mathbf{D}_{\text{ст.ост}}$ и главный момент $\mathbf{M}_{\text{д.ост}}$ остаточных дисбалансов.

2) Выключить привод станка, ослабить натяжение приводного ремня. Натянуть приводной ремень, включить привод станка, измерить главный вектор $\mathbf{D}_{\text{ст1}}$ и главный момент $\mathbf{M}_{\text{д1}}$ дисбалансов.

3) Вычислить изменение показаний главного вектора и главного момента дисбалансов по формулам:

$$\Delta_{1D} = \mathbf{D}_{\text{ст1}} - \mathbf{D}_{\text{ст.ост}} \quad (7)$$

$$\Delta_{1M} = \mathbf{M}_{\text{д1}} - \mathbf{M}_{\text{д.ост}} \quad (8)$$

4) Повторить работы по п. 1...3 четыре раза.

В результате получаем пять векторов статических: Δ_{1D} , Δ_{2D} , Δ_{3D} , Δ_{4D} , Δ_{5D} и моментов: Δ_{1M} , Δ_{2M} , Δ_{3M} , Δ_{4M} , Δ_{5M} дисбалансов.

Неточность балансировочного станка – постоянная, систематическая и случайная производственные погрешности вычисляются по методике анализа точности технологических операций. Отличительная особенность методики для выявления погрешностей балансировки заключается в том, что значение дисбаланса подчиняется закону распределения Рэлея, а угла дисбаланса – закону равной вероятности [2].

Исходные данные для расчёта – допустимый остаточный дисбаланс ротора и экспериментально-расчётные данные.

Порядок расчёта:

1) Найти поле рассеяния значений дисбалансов $\mathbf{V} = \Delta_{\text{макс}} - \Delta_{\text{мин}}$.

2) Вычислить дисперсию $s_1 = \Delta_{\text{мин}} + V/k$ выборки, где коэффициент k , зависящий от закона распределения параметра. Для закона Рэлея при доверительной вероятности 95% он равен 2,45.

3) Вычислить среднее значение погрешности $\Delta_{\text{ср}} = 1,256 s_1$.

4) Вычислить среднее значение $D_{\text{срт}}$ и дисперсию s_2 теоретического распределения значения допустимого остаточного дисбаланса. Здесь поле рассеяния равно значению допустимого остаточного дисбаланса ротора.

5) Определить наличие постоянной погрешности по значению коэффициента $\mu = D_{\text{срт}} - \Delta_{\text{ср}} \geq 0,5s_2$; систематической – по отношению дисперсий s_2/s_1 и критерию F-распределения.

2.2. Погрешности установки приспособления на станке

Балансировочные приспособления применяют для соединения со станком балансируемого ротора. Они бывают универсальными и специальными. Первые – приводные валы, роликовые и косовалковые опоры, ленточные ремни и т.п., обычно прилагаются в качестве принадлежностей к станкам заводом-изготовителем.

Специальные приспособления проектируют и изготавливают для конкретной технологической системы. К ним относят: технологические опоры, балансировочные оправки, балан-

сировочные рамки, технологические корпуса и др. [3]. Основное требование к конструкции приспособления – обеспечить заданную точность балансировки ротора. Это требование выдвигает задачи об ожидаемой точности, которую способно обеспечить приспособление, и о точности самого приспособления. При изготовлении элементов приспособления и его сборке возникают производственные погрешности. Поэтому перед вводом в эксплуатацию и периодически эти погрешности необходимо находить экспериментальным путём с помощью тарировочного ротора.

Методика определения погрешностей установки приспособления на станке состоит в следующем.

1) Сбалансировать тарировочный ротор до допустимых остаточных дисбалансов постановкой временных грузов. Измерить главный вектор $D_{ст\ ост}$ и главный момент $M_{D\ ост}$ остаточных дисбалансов.

2) Снять приспособление с ротором с опор станка и вновь установить.

3) Натянуть приводной ремень, включить привод станка, измерить главный вектор $D_{ст1}$ и главный момент M_{D1} дисбалансов. Сбалансировать ротор до допустимых значений дисбалансов.

4) Вычислить изменение показаний по формулам (7) и (8).

5) Повторить работы по п. 1...4 четыре раза.

В результате получить пять векторов статических: Δ_{1D} , Δ_{2D} , Δ_{3D} , Δ_{4D} , Δ_{5D} и моментных: Δ_{1M} , Δ_{2M} , Δ_{3M} , Δ_{4M} , Δ_{5M} дисбалансов.

Расчёт погрешностей установки приспособления на станке выполняется в порядке, изложенном в п. 2.1.

2.3. Погрешности установки ротора в приспособлении

В приспособление (балансировочную рамку или технологический корпус) ротор устанавливают на технологические опоры качения или скольжения. Погрешности установки обусловлены точностью геометрии подшипников, перекосом колец, их посадками на вал и в корпус приспособления.

Методика определения погрешностей установки ротора в приспособление аналогична вышеизложенным. Ротор несколько раз снимают и вновь устанавливают в исходное положение в приспособлении и измеряют его дисбалансы. Обработку экспериментальных данных выполняют по методике анализа точности технологических операций (см. п. 2.1).

Отличительная особенность экспериментальных работ состоит в том, что кроме дисбалансов нужно определять величины и фазы биений контрольных поверхностей ротора, находить связь между биениями и дисбалансами и использовать её при монтаже ротора в приспособлении. Например, после перестановки ротора турбины высокого давления (ТВД) на рамке изменение биений составило:

по контрольной поверхности ротора
77 мкм/ 65°,

по роликовому подшипнику 11 мкм/ 23°,

а изменение дисбаланса – 75 гмм/189°. Для ротора компрессора высокого давления (КВД) получены аналогичные результаты: биение контрольной поверхности ротора изменилось на 47 мкм / 32°, а изменение дисбаланса на 45 гмм/ 88°.

Коэффициент влияния биения на дисбаланс ротора – отношение изменения дисбаланса к изменению биения и соответственно равен для ротора ТВД – 1,0 гмм/мкм/124°, ротора КВД – 1,0 гмм/мкм/66°.

Примечание: все расчёты выполнены для главного вектора дисбалансов ротора.

3. Результаты экспериментальных работ по определению производственных погрешностей технологических систем «станок+оснастка+ротор»

Производственные погрешности определялись для трёх технологических систем:

А. Вертикальный дорезонансный станок + оправка + рабочее колесо ТВД с параметрами
- минимально достижимый остаточный дисбаланс станка 1,0 гмм/кг;
- допустимый остаточный дисбаланс рабочего колеса не более 500 гмм;
- масса рабочего колеса 91 кг.

Б. Горизонтальный дорезонансный станок + оправка + ротор ТВД с параметрами
- минимально достижимый остаточный дисбаланс станка 0,4 гмм/кг;
- допустимые остаточные дисбалансы ротора ТВД не более 400 гмм (статический) и 200 гмм (моментный);
- масса ротора 200 кг.

В. Горизонтальный зарезонансный станок + (рамка + оправка) + ротор КВД. Параметры системы:

минимально достижимый остаточный дисбаланс станка 0,3 гмм/кг;

допустимые остаточные дисбалансы ротора ТВД не более 80 гмм (статический) и 100 гмм (моментный);

масса ротора 41 кг.

Полученные экспериментально-расчётные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Суммарные производственные погрешности балансировки роторов

№ пп	Технологическая система	Погрешность балансировки, гмм/°	
		статическая	моментная
Неточности станка			
1	А	126/230 (1,4 гмм/кг)	-
2	Б	31/114 (0,16 гмм/кг)	30/44
3	В	17/83 (0,4 гмм/кг)	-
Погрешности установки приспособления на станке			
4	Б	1125/27	670/272
5	В	70/254	-
Погрешности установки ротора в приспособлении			
6	А	664/240	-
7	В	75/189	22/210

Сравнение значений суммарных производственных погрешностей с допустимыми остаточными дисбалансами ротора показывает возможность его балансировки дисбалансами в данной технологической системе. Суммарные производственные погрешности технологических систем А и Б превышают допустимые остаточные дисбалансы балансируемых в них роторов.

Доминирующая элементарная погрешность находится как векторная разность последующей и предыдущей погрешностей. Результаты расчётов элементарных погрешностей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Элементарные производственные погрешности технологических систем

№ пп	Технологическая система	Вид погрешности	Погрешность	
			Значение, гмм	Угол, °
1	А	Установка ротора в приспособлении	540	243
2	Б	Установка приспособления на станке	1095	27
3	В	Установка приспособления на станке	85	260
		Установка ротора в приспособлении	78	134

Доминирующими элементарными погрешностями в технологической системе А является установка ротора в приспособлении, в технологической системе Б - установка приспособления на станке, в технологической системе В нет доминирующей погрешности.

Заключение

1. Для уменьшения погрешности балансировки от несовмещения балансировочной оси с геометрической осью ротора рекомендуем компенсировать монтажный дисбаланс до балансировки ротора.

2. Для уменьшения производственных погрешностей балансировки рекомендуем:

2.1. При проектировании технологической системы вычислять ожидаемую точность главного вектора и главного момента балансировки ротора.

2.2. При вводе в эксплуатацию и периодически определять элементарные погрешности экспериментально-аналитическим способом с помощью тарировочного ротора.

3. Окончательный контроль остаточных дисбалансов выполнять после полной разборки и сборки технологической системы.

Литература

1. Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. М.: Машиностроение, 1986. 248 с.
2. Глейзер А.И. Вероятностные аспекты динамики и уравнивания роторных систем. Тольятти: ТолПИ, 1993. 183 с.
3. Справочник по балансировке/ М.Е. Левит, Ю.А. Агафонов, Л.Д. Вайнгорин и др.; Под общ. ред. М.Е. Левита. М.: Машиностроение, 1993. 464 с.
4. Разработка и внедрение в производство технологии снижения вибраций роторных узлов ТВД-1500 и РД-600. Отчёт об ОКР (заключительный) МАИ, 2003. 65 стр., 5 рис., 1 приложение.
5. Исследование причин повышенных вибраций двигателя НК-38СТ и разработка рекомендаций по их устранению. Отчёт об ОКР (заключительный) МАИ, 2012. 25 стр., 3 рис.

Информация об авторах

Рыженков Валентин Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Московский авиационный институт (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), тел. +7(985)983-38-33, e-mail: balans@list.ru

Тихомиров Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов, Московский авиационный институт (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), тел. +7(915)342-32-89, e-mail: tihomirov@mai.ru

ERRORS FOR BALANCING ROTORS OF GAS TURBINE ENGINES

V.M. Ryzhenkov, V.V. Tikhomirov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract: the possible causes of the main balancing errors in the manufacture of rotary systems of gas turbine engines are considered. These include errors from the misalignment of the installation bases when assembling rotors and errors in the “machine + rigging + rotor” technological system. As the calculations show, the errors from the misalignment of the bases (mounting imbalances) can be many times higher than the allowable ones. Measurement of the beats of the rotor seats, the calculation and installation of the corresponding corrective masses in many cases can quite accurately compensate for mounting imbalances. If the accuracy achieved at the same time does not meet the technical requirements for the rotor, then when balancing, special technological mandrels should be used, and the errors in the “machine + tooling + rotor” system should be determined by experimental and analytical methods. The verification of passport accuracy of the balancing equipment is carried out in accordance with the ISO recommendations of the control rotors of three main types. In serial production, errors are estimated using calibration rotors that are geometrically and physically similar to those produced. In experimental studies, in addition to determining imbalances, the values and angular positions (phases) of the beating of the control surfaces of the rotors should be measured. The recommendations developed as a result of the research will reveal the dominant balancing errors, identify and eliminate their causes, which, without significant costs, can provide a noticeable improvement in the quality of the engines produced

Key words: gas-turbine engine, definition of errors of rotor balancing, reduction of balancing errors

References

1. Levit M. Ye., Ryzhenkov V. M. “Balancing parts and assemblies” (“Balansirovka detaley i uzlov”), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 248 p.
2. Glazer A.I., “Probabilistic aspects of dynamics and balancing of rotary systems” (“Veroyatnostnye aspekty dinamiki i uravnoveshivaniya rotornykh system”), Tolyatti, TolPI, 1993, 183 p.
3. Levit M.E., Agafonov Yu.A., Weingortin L.D. et al., ed. Levit M.E. “Handbook of balancing” (“Spravochnik po balansirovke”), Moscow, Mashinostroenie, 1993, 464 p.
4. “Development and introduction into the production of vibration reduction technology for TVD-1500 and RD-600 rotor assemblies” (“Razrabotka i vnedrenie v proizvodstvo tekhnologii snizheniya vibratsiy rotornykh uzlov TVD-1500 i RD-600”), Report on Experimental Design Work (final) of MAI, 2003, 65 p.
5. “Study of the causes of increased vibration of the NK-38CT engine and development of recommendations for their elimination” (“Issledovanie prichin povyshennykh vibratsiy dvigatelya NK-38ST i razrabotka rekomendatsiy po ikh ustraneniyu”), Report on Experimental Design Work (final) of MAI, 2012, 25 p.

Submitted 17.01.2019; revised 21.03.2019

Information about the authors

Valentin M. Ryzhenkov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Moscow Aviation Institute (4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia), tel. +7 (985) 983-38-33, e-mail: balans@list.ru

Vladimir V. Tikhomirov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Moscow Aviation Institute (4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia), tel. +7 (915) 342-32-89, e-mail: tihomirov@mai.ru

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.2.020
УДК 621.941.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

А.В. Анцев¹, Ч.Х. Данг¹, Е.С. Янов², М.В. Полев³

¹Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

²АО «НПО «Сплав», г. Тула, Россия

³ООО ИТМ Групп К, г. Москва, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы учета вариабельности процесса резания путем сбора статистики об износе режущего инструмента. В качестве косвенного параметра, характеризующего процесс износа режущего инструмента, выбран уровень вибрации технологической системы. Уровень вибрации технологической системы зависит от автоколебаний, вызванных отклонением припуска на обработку вследствие технологической наследственности, и колебаний из-за действия силы резания, меняющейся по мере износа режущего инструмента. На примере токарной обработки продемонстрирована структура экспериментального измерительного стенда оценки уровня износа реза. Экспериментальный измерительный стенд состоит из персонального компьютера и подключенных к нему трех блоков датчиков, размещенных на основных узлах технологической системы. Представлен метод обработки полученных с датчиков сигналов, включающий в себя удаление влияния ускорения свободного падения на результат измерения, фильтрацию полученного сигнала, интегрирование сигнала и анализа спектра. Приведен пример сигналов вибрации разных частей технологической системы, полученных при обработке новой и изношенной по задней поверхности до уровня 0,35 мм твердосплавной режущей пластиной ССМТ 060204-14 IC807 фирмы Iscar. Было установлено, что имеется сильная связь между состоянием режущего инструмента и вибрацией технологической системы, и контроль уровня вибрации может применяться для диагностики состояния режущего инструмента в конкретных условиях работы

Ключевые слова: процесс резания, вариабельность, период стойкости, износ, вибрация, измерительный стенд, точение

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00849

Введение

Для снижения себестоимости отечественной продукции машиностроения и повышения на этой основе ее конкурентоспособности необходимо повышение эффективности всех процессов, выполняемых при ее производстве. Одним из важнейших технологических процессов при производстве продукции машиностроения является обработка резанием. По экспертным оценкам, 15 % стоимости деталей узлов и машин, производимых в мире, приходится на операцию обработки резанием с использованием лезвийного режущего инструмента [1].

Эффективность процессов обработки резанием лезвийным режущим инструментом в значительной мере определяется назначаемыми на основе известных стойкостных зависимостей режущего инструмента режимами резания и периодичностью восстановления или замены режущего инструмента. Однако, несмотря на то, что процессы резания имеют вероятностный характер, в современном машиностроении ис-

пользуют стойкостные зависимости, описывающие лишь зависимость среднего периода стойкости лезвийного режущего инструмента от режимов резания и не учитывающие стохастическую природу износа лезвийного режущего инструмента [2]. При этом разброс периода стойкости в пределах одной партии инструментов может достигать до 15-35 % [3].

Проектные решения при проектировании технологического процесса продукции машиностроения, принимаемые только лишь на основе средних значений периода стойкости лезвийного режущего инструмента без учёта вариабельности процесса резания, могут приводить к значительным ошибкам в назначении параметров технологического процесса и увеличению издержек производства, а следовательно, к увеличению цены и снижению конкурентоспособности продукции.

Постановка задачи

Для оценки и учета вариабельности процесса резания необходимо организовать сбор статистики об износе режущего инструмента в процессе обработки. Постепенное изменение гео-

метрии режущих частей инструмента сказывается на процессе резания. Количественные параметры процесса резания претерпевают изменения соразмерно стадиям износа. На сегодняшний день непосредственная оценка износа режущего инструмента затруднена. Поэтому имеется необходимость использовать другие косвенные характеристики износа [4], в том числе силу резания [3], термо-ЭДС [5], мощность приводных электродвигателей [6]. Помимо указанных характеристик с практической точки зрения интерес представляет контроль уровня вибрации технологической системы [7, 8].

Теоретическая часть

При обработке технологическая система совершает вынужденные колебания под действием сил резания [9]. При этом в процессе обработки сила резания будет колебаться из-за разных факторов. Во-первых, из-за автоколебаний, вызванных отклонением припуска на обработку в начале обработки и на последующих операциях [10] вследствие технологической наследственности [11]. Интенсивность автоколебаний будет зависеть от режима резания [12]. Во-вторых, по мере износа режущей кромки будет меняться геометрия режущего инструмента и, соответственно, геометрическая погрешность технологической системы. При этом часть режущего инструмента полагают идеальным и при оценке состояния технологической системы не учитывают [13].

Процесс износа режущего инструмента в процессе резания можно разбить на три стадии (рис. 1).

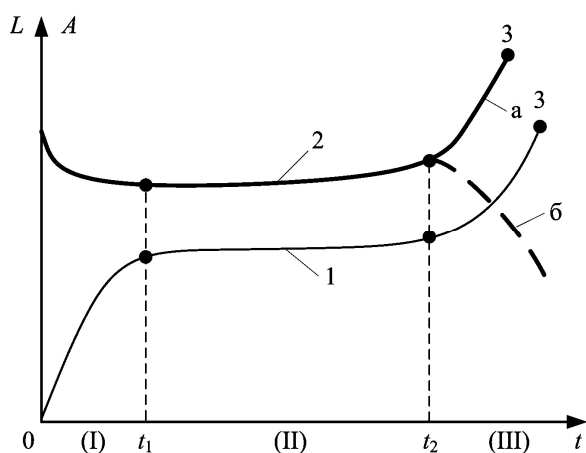


Рис. 1. Стадии износа режущего инструмента
 1 – износ режущего инструмента,
 2 – вибрация технологической системы,
 а – отказ из-за износа инструмента,
 б – отказ из-за разрушения

Вначале происходит приработка, характеризующаяся интенсивным износом до определенного уровня. Затем скорость износа уменьшается и стабилизируется. Начинается вторая стадия, которая захватывает большую часть рабочего времени инструмента. Достигнув определенного значения, скорость износа начинает резко возрастать до поломки инструмента [7, 8].

Изменения в характере протекания процесса резания из-за износа сопровождаются соответствующим изменением параметров вибрации технологической системы. Эти параметры ведут себя закономерно со стадиями износа инструмента и позволят получить объективную картину состояния режущего инструмента [14]. При переходе в стадию катастрофического износа уровень вибрации начинает резко возрастать (ветвь а). Также возможен вариант с разрушением режущей кромки, что приведет к резкому снижению уровня вибрации (ветвь б).

Описание экспериментальной установки

Для контроля изменения уровня вибрации по мере износа режущего инструмента необходима разработка экспериментальной установки. Распространенным методом для решения данной задачи является использование виброметров и акселерометров. Данный метод предоставляет надежность и устойчивость к внешним воздействиям. Для получения полной картины процесса обработки предлагается использовать несколько датчиков, расположенных в ключевых местах технологической системы (рис. 2).

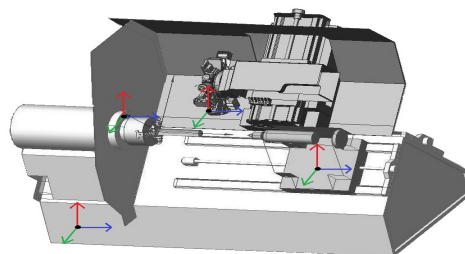


Рис. 2. Расположение датчиков на токарном станке

Экспериментальная установка измерения вибрации при токарной обработке включает в себя персональный компьютер, собирающий информацию с подключенных к нему блоков (рис. 3).

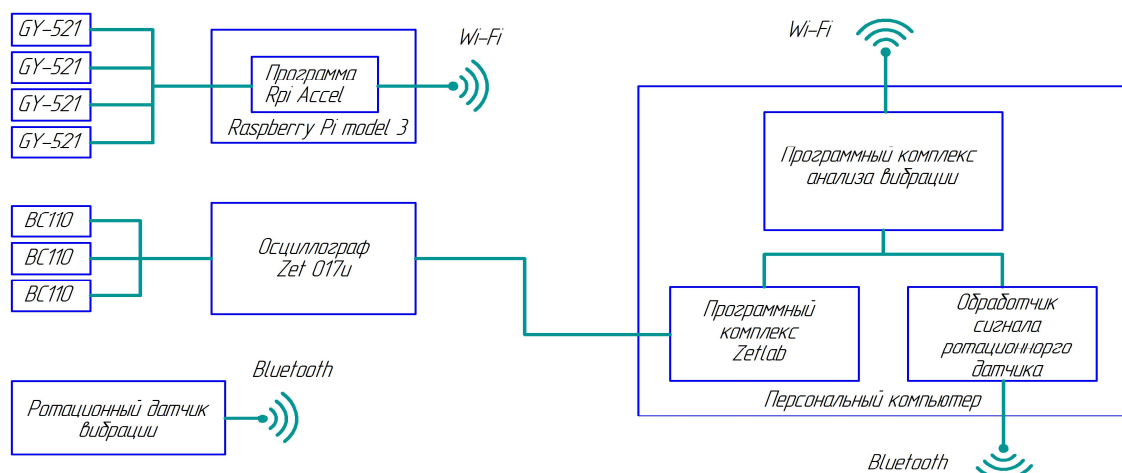


Рис. 3. Структурная схема измерительного стенда

Первый блок состоит из четырех трехосевых акселерометров GY-521. Показания акселерометров собираются с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 Model B+ по шине данных I2C. Затем по беспроводной технологии Wi-Fi данные передаются на персональный компьютер в разработанный программный комплекс анализа вибрации.

Второй блок построен на базе аппаратно-программного комплекса Zetlab и включает в себя датчики вибрации BC110, осциллограф Zet 017-U4, а также сопроводительное программное обеспечение. Датчики установлены на резцедержателе.

Третий блок используется для регистрации вибрации непосредственно на заготовке и состоит из ротационного датчика вибрации, представляющего собой связку акселерометра ADXL377 и микроконтроллера ATmega 328PAU (рис. 4).

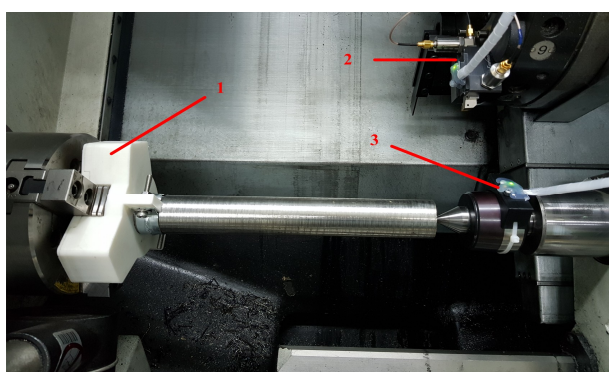


Рис. 4. Фрагмент измерительной установки
1 – ротационный датчик вибрации, 2 – резцедержатель с акселерометром и виброметрами, 3 – задняя бабка с акселерометром

Датчик соединен с компьютером по беспроводной технологии Bluetooth. Его компоновка выполнена в отдельном корпусе, обеспечивающем крепление устройства к заготовке и его автономную работу от аккумулятора.

Обработка полученных сигналов

Собранные с датчиков сигналы должны пройти ряд обработок для их преобразования в удобный для анализа вид (рис. 5).

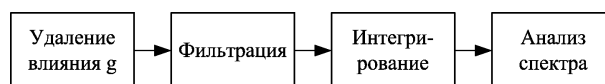


Рис. 5. Цепочка преобразований сигналов с датчиков

Первоначальная обработка исходного сигнала состоит в удалении из него ускорения свободного падения g , постоянно влияющего на акселерометры. Рассмотрим основные примеры такого влияния в зависимости от расположения датчика. В простейшем случае датчик расположен неподвижно и одна из его осей расположена параллельно вектору ускорения свободного падения (рис. 6). Такое размещение датчика возможно на державке резца в револьверной головке, на задней бабке и на станине станка. В этом случае колебания технологической системы могут быть пересчитаны из показаний датчика следующим образом:

$$a_x' = a_x; a_y' = a_y; a_z' = a_z - g, \quad (1)$$

где a_x, a_y, a_z – показания акселерометра, a_x', a_y', a_z' – колебание технологической системы.

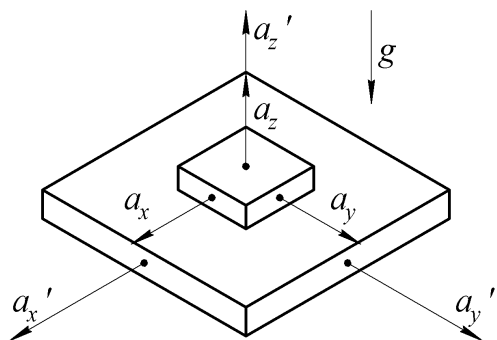


Рис. 6. Простейший случай размещения акселерометра

На многих токарных станках ось X находится под углом α к поверхности направляющих. В этом случае воздействие ускорения свободного падения g распределяется на две оси акселерометра (рис. 7).

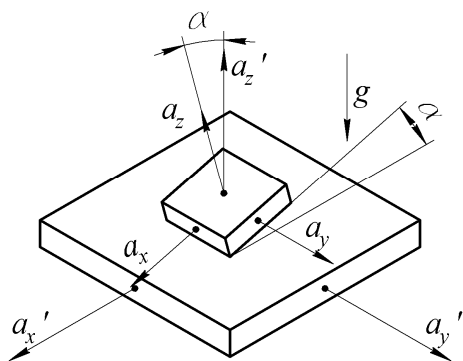


Рис. 7. Расположение акселерометра под углом к направляющим

В данном случае перерасчет колебаний технологической системы будет проходить следующим образом:

$$a_x' = a_x - g \cdot \cos \alpha; a_y' = a_y; a_z' = a_z - g \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

Отдельную задачу представляет обработка сигнала с акселерометра, расположенного на вращающейся заготовке (рис. 8).

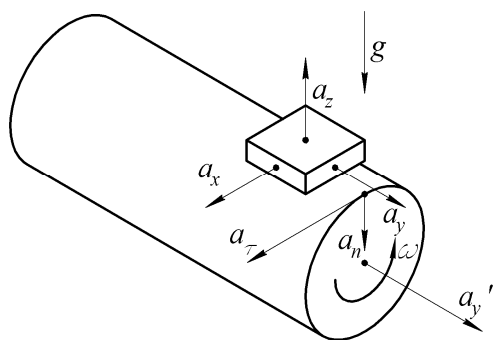


Рис. 8. Размещение акселерометра на вращающейся заготовке

В этом случае на акселерометр будет действовать кроме ускорения свободного падения еще центростремительное (нормальное) a_n и тангенциальное ускорения a_τ . Учитывая вращение заготовки с установленным на ней датчиком, что приводит к переменному влиянию ускорения свободного падения на две оси, получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} a_x' &= a_x - a_\tau - g \cdot \cos(\omega t) = \\ &= a_x - \frac{dv}{dt} - g \cdot \cos(\omega t); \\ a_y' &= a_y; \\ a_z' &= a_z - a_n - g \cdot \sin(\omega t) = \\ &= a_z - \omega^2 R - g \cdot \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

где ω – частота вращения заготовки, v – скорость на поверхности заготовки, R – расстояние от акселерометра до оси вращения заготовки. Чем дальше находится акселерометр от оси вращения заготовки, тем больше становится центростремительное ускорение, что затрудняет выделение из полученных данных полезного сигнала. Поэтому акселерометр необходимо располагать как можно ближе к оси вращения.

Результаты экспериментальных исследований

С помощью разработанной экспериментальной установки были собраны сигналы с различных частей технологического оборудования (рис. 9-12). На данных рисунках слева от вертикальной черты изображены данные, полученные при обработке новым инструментом, а справа от вертикальной черты – изношенным.

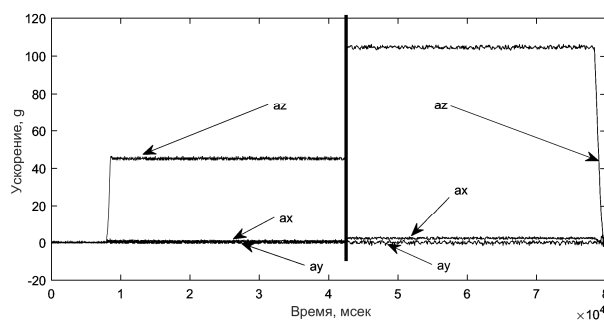


Рис. 9. Сигнал с ротационного датчика вибрации, расположенного на заготовке

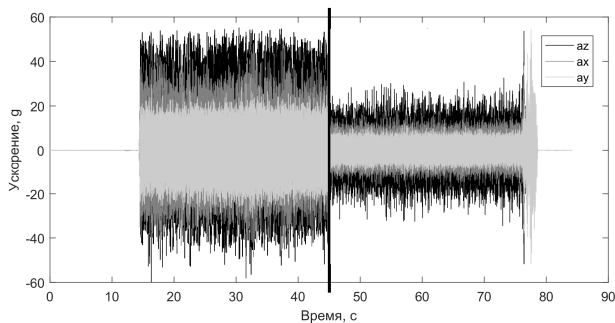


Рис. 10. Сигнал с датчика, расположенного на резце

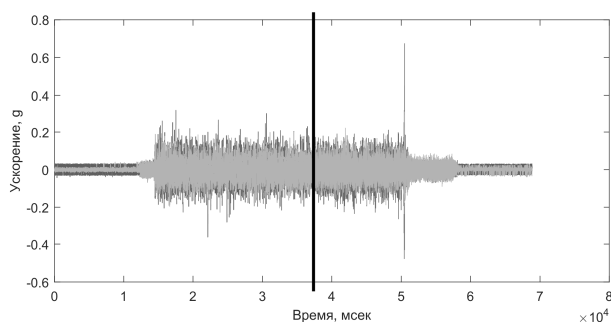


Рис. 11. Сигнал с датчика с задней бабки

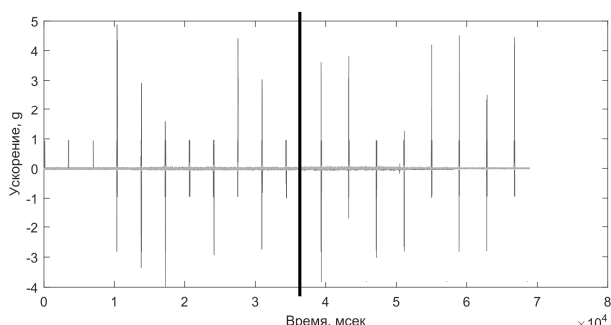


Рис. 12. Сигнал с корпуса шпинделя станка

Из анализа рис. 9-12 можно сделать следующие выводы:

1. Нормальное ускорение с ростом частоты вращения шпинделя сильно влияет на показания по оси Z акселерометра, расположенного на обрабатываемой заготовке, поэтому возможности использования данного канала датчика сильно ограничены для практического использования. Колебания по оси Y незначительны при наружном точении и их показаниями можно пренебречь. Показания датчика по оси X могут быть использованы для диагностики состояния инструмента.

2. Датчики, расположенные как можно ближе к зоне резания, предоставляют максимальную информацию о протекании процесса резания, поэтому разработка компактных

устройств контроля вибрации режущего инструмента является актуальной задачей. При этом амплитуда колебаний a_y составляет 0,25-0,5 амплитуды a_z , а амплитуда колебаний a_x составляет 0,1-0,25 амплитуды a_z , что пропорционально соответствует значениям вызывающим их составляющим силам резания. Левая часть рис.10 соответствует I стадии износа режущего инструмента, а правая – II стадии.

3. Показания датчика, расположенного на задней бабке, также потенциально могут быть использованы для диагностики состояния режущего инструмента, однако полезный сигнал заметно затухает при прохождении упругих элементов этой технологической оснастки.

4. Датчики, размещенные на корпусе шпинделя и дальше на станине станка, не получают сигналы вибрации из зоны резания, так как они полностью демпфируются упругими элементами технологической системы. При этом во время эксперимента были зафиксированы колебания корпуса технологической системы с периодом примерно 3 секунды, связанные с работой вспомогательных агрегатов технологического оборудования.

5. Вибрации на режущем инструменте и заготовке различны по амплитуде и частоте из-за разной жесткости соответствующих частей технологической системы.

Для снижения шума сигнала, очищенного по формулам (1)-(3), необходимо провести его фильтрацию. Затем полученный сигнал можно проинтегрировать для перехода от ускорения к амплитуде вибрации. Анализ спектра позволяет точно определить частотные характеристики полученного сигнала во времени и их изменения, а также выявить нестационарности в работе технологической системы [15].

Износ инструмента определялся по задней поверхности с помощью микроскопа. На рис. 13, а) представлена фотография задней поверхности новой сменной твердосплавной пластины ССМТ 060204-14 IC807 фирмы Iscar, а на рис. 13, б) – изношенной, с износом по задней поверхности $VB = 0,35$ мм.

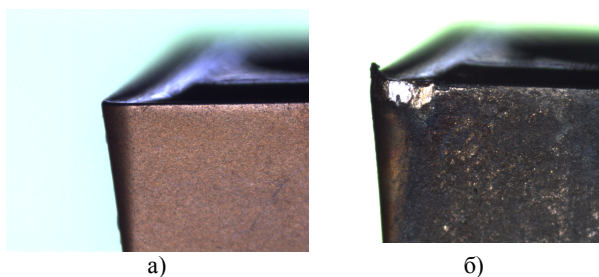


Рис. 13. Фотографии задней поверхности новой и изношенной пластины:
а – новая пластина;
б – изношенная пластина

Анализ спектра вибрации для составляющей вибрации a_z для трех уровней износа представлен на рис. 14.

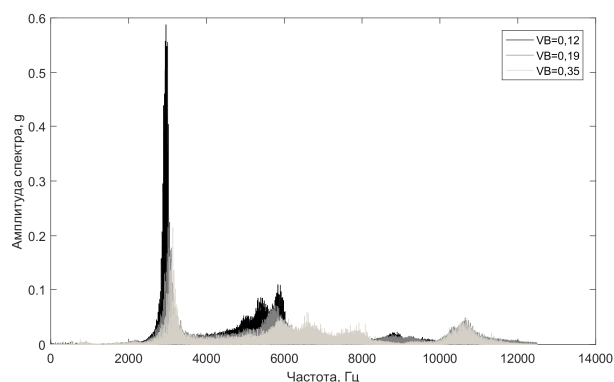


Рис. 14. Анализ спектра вибрации для составляющей вибрации a_z при уровне износа пластины VB 0,12 мм, 0,19 мм и 0,35 мм

Как видно из рис. 14, максимальная амплитуда колебаний наблюдается в районе частоты 3000 Гц и по мере износа режущего инструмента смещается в сторону более высоких частот. По мере приработки инструмента и перехода ко второй стадии износа амплитуда вибрации снизилась.

Заключение

В результате исследования было установлено, что имеется сильная связь между состоянием режущего инструмента и вибрацией технологической системы. При этом вибрация технологической системы изменяется в широком диапазоне и несет обобщенную информацию о процессе резания.

Таким образом, контроль уровня вибрации может применяться для диагностики состояния режущего инструмента в конкретных условиях работы, что, в свою очередь, позволит учесть

вариабельность процесса резания и рациональнее использовать период стойкости инструмента и, следовательно, уменьшить производственные затраты.

Литература

1. Астахов В.П. Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. №8-1. С. 141-153.
2. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.
3. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. №12. С. 23-27.
4. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под ред. С.Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
5. Тимофеев В.Ю., Зайцев А.А., Крутов А.В. Модель устройства диагностики металлорежущего инструмента по сигналу термо-ЭДС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 5. С. 42-45.
6. Сальников В.С., Жмурин В.В., Анцев А.В. Практическое применение диагностических возможностей современных многоцелевых станков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №10. С. 257-264.
7. Анцев А.В., Янов Е.С. Контроль уровня износа режущего инструмента по уровню вибрации при токарной обработке // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. науч. тр. нац. заоч. науч.-техн. конф. с междунар. участием «АПИР-23» / под ред. В.В. Прейса. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. С. 155-159.
8. Анцев А.В., Данг Х.Ч. Прогнозирование периода стойкости режущего инструмента на основе контроля вибрации в процессе фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 3-11.
9. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. 184 с.
10. Быкадор В.С., Костенко Г.Ю., Бабенко Т.С. Возникновение автоколебаний в простейшей системе резания металлов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 119-123.
11. Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроении // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 1 (40). С. 198-202.
12. Быкадор В.С., Шаламов Е.С., Тетенко О.В. Влияние значений технологических режимов процесса точения на возникновение автоколебаний // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 147-152.

13. Аникеева О.В. Синтез допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 95-103.

14. Орнис Н.М. Основы механической обработки металлов. М.: "Машиностроение", 1968. 230 с.

15. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента / Ю.Г. Кабалдин и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 47-50.

Поступила 26.02.2019; принята к публикации 22.03.2019

Информация об авторах

Анцев Александр Витальевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: a.antsev@yandex.ru

Данг Чонг Хыу – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: danghuutrong@gmail.com

Янов Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, ведущий специалист отдела техперевооружения и технологического аудита, АО «НПО «Сплав» (300004, Россия, г. Тула, ул. Шегловская засека, 33), e-mail: dexaik@mail.ru

Полев Максим Владиславович – заместитель генерального директора, ООО ИТМ Групп К (107023, Россия, г. Москва, ул. Семёновская Б., д. 40 стр. 18, пом. № 27), e-mail: info@itm-info.ru

EXPERIMENTAL UNIT FOR VIBRATION CONTROL DURING PROCESSING ON NPC MACHINES

A.V. Antsev¹, T.H. Dang¹, E.S. Yanov², M.V. Polev³

¹Tula State University, Tula, Russia

²JSC "NPO "SPLAV", Tula, Russia

³ITM Group K LLC, Moscow, Russia

Abstract: the issues of accounting for the variability of the cutting process by collecting statistics on the wear of the cutting tool were considered. The level of vibration of the technological system was chosen as an indirect parameter characterizing the process of wear of the cutting tool. The level of vibration of the technological system depends on the self-oscillations caused by the deviation of the allowance for processing due to technological heredity, and fluctuations due to the action of the cutting force, which varies with the wear of the cutting tool. Using the example of turning, the structure of an experimental measuring stand for estimating the level of tool wear was demonstrated. The experimental measurement bench consists of a personal computer and three sensor blocks connected to it, located on the main nodes of the technological system. A method for processing the signals received from the sensors was presented, including the removal of the effect of gravitational acceleration on the measurement result, filtering the received signal, integrating the signal and analyzing the spectrum. An example of vibration signals of different parts of the technological system, obtained by processing a new and worn on the back surface to the level of 0.35 mm hard-alloy cutting plate CCMT 060204-14 IC807 of the company Iscar, was given. It was found that there is a strong relationship between the state of the cutting tool and the vibration of the technological system, and the monitoring of the level of vibration can be used to diagnose the state of the cutting tool in specific working conditions

Key words: cutting operation, variability, tool life, wear, vibration, measuring bench, turning

Acknowledgements: the study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of a research project no. 18-38-00849.

References

1. Astakhov V.P. "The principle of the least energy of plastic deformation during fracture as a basis for understanding and optimizing metal cutting", *News of Tula State University. Technical science. (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2016, no. 8-1, pp. 141-153.
2. Pas'ko N.I., Antsev A.V., Antseva N.V., Sal'nikov S.V. "Generalized stochastic model of cutting tool failures and its application" ("Obobshchennaya stokhasticheskaya model' otkazov rezhushchego instrumenta i eye primeneniye"), Tula, Publishing House of TSU, 2016, 174 p.
3. Martinov G.M., Grigoriev A.S. "Diagnosing cutting tools and predicting their residual durability on CNC machines during machining", *STIN*, 2012, no. 12, pp. 23-27.
4. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. et al. "Diagnostics of automated production" ("Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva"), Moscow, Mashinostroenie, 2011, 600 p.

5. Timofeev V.Yu., Zaitsev A.A., Krutov A.V. "Model of the device for diagnostics of metal-cutting tools by the signal of thermo-EMF", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 5, pp. 42-45.
6. Sal'nikov V.S., Zhmurin V.V., Antsev A.V. "Practical application of diagnostic capabilities of modern multi-purpose machines", *News of Tula State University. Technical science. (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2018, no. 10, pp. 257-264.
7. Antsev A.V., Yanov E.S. "Control of the level of wear of the cutting tool according to the level of vibration during turning processing", *Bulletin of Tula State University, Proc. of the National Correspondence Sci. and Technical Conf. with Int. Participation "APIR-23": Automation: Problems, Ideas, Solutions, November 8-9, 2018 (Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Avtomatizatsiya: problemy, idei, resheniya: sbornik nauchnykh trudov natsional'noy zaochnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «APIR-23», 8-9 noyabrya 2018 goda)*, 2018, pp. 155-159.
8. Antsev A.V., Dang T.H. "Prediction of the period of durability of the cutting tool on the basis of vibration control in the milling process", *News of Tula State University. Technical science. (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2018, no. 7, pp. 3-11.
9. Zharkov I. G. "Vibrations when machining with a blade tool" ("Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom"), *Lenin-grad, Mashinostroenie*, 1986, 184 p.
10. Bykador V.S., Kostenko G.Yu., Babenko T.S. "The emergence of self-oscillations in the simplest metal cutting system", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 119-123.
11. Vasiliev A.S. "Technological heredity in mechanical engineering", *Bulletin of the P.A. Solovyev Rybinsk State Aviation Technological Academy (Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solov'yeva)*, 2017, no. 1 (40), pp. 198-202.
12. Bykador V.S., Shalamov E.S., Tetenko O.V. "The influence of the values of the technological modes of the process of turning on the occurrence of self-oscillations", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 147-152.
13. Anikeeva O.V. "Synthesis of tolerances of parameters of geometrical accuracy of machine tools", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 95-103.
14. Ornis N.M. "Fundamentals of metal machining" ("Osnovy mekhanicheskoy obrabotki metallov"), *Moscow, Mashinostroenie*, 1968, 230 p.
15. Kabaldin Yu.G. et al. "Intelligent systems for diagnosing the state of equipment and tool wear", *Mechanical Engineering (Mashinostroenie): the network electronic scientific journal*, 2014, no. 2, pp. 47-50.

Submitted 26.02.2019; revised 22.03.2019

Information about the authors

Aleksandr V. Antsev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92, Lenina Ave., Tula 300012, Russia), e-mail: a.antsev@yandex.ru
Trong Huu Dang, Graduate student, Tula State University (92, Lenina Ave., Tula 300012, Russia), e-mail: danghuutrong@gmail.com
Evgeny S. Yanov, Cand. Sc. (Technical), Leading Specialist, JSC "NPO "SPLAV" (33 Shcheglovskaya Zaseka str., Tula 300004, Russia), e-mail: dexaik@mail.ru
Maksim V. Polev, Vice Director, ITM Group K LLC (40, buil. 18, off. 27, Semenovskaya B. str., Moscow 107023, Russia), e-mail: info@itm-info.ru

**ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ
ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

С.Г. Бишутин, С.С. Алехин

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Аннотация: статья посвящена исследованию производительности и качества алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин для обоснования направлений совершенствования рассматриваемого процесса механической обработки. Установлено, что с уменьшением зернистости алмазно-абразивной пасты (с 60/40 до 28/20 мкм) шероховатость обработанной поверхности уменьшается в 2,5...3 раза. Меньшая шероховатость поверхности ($Ra=0,5...0,6$ мкм) достигается при использовании стеклянного притира. Исследования показали, что производительность процесса составляет 5...10 мкм/ч при использовании алмазной пасты АСМ 60/40 и АСМ 40/28, 4...7 мкм/ч при использовании алмазной пасты АСМ 28/20. Производительность алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин возрастает с увеличением скорости вращения инструмента и усилия его прижатия к заготовке. Кроме того, на скорость съема материала с заготовки существенно влияет режущая способность инструмента (притира), размеры, форма и количество обрабатываемых пластин. Получена зависимость для расчета скорости съема материала с заготовки, учитывающая основные факторы алмазно-абразивной обработки. Показано, что изменение схемы обработки добавлением осциллирующих движений планшайбы, применение стальных или чугунных притиров, повышение концентрации в пасте сверхтвердых режущих материалов являются наиболее эффективными путями совершенствования данной алмазно-абразивной обработки

Ключевые слова: алмазно-абразивная обработка, керамические материалы

Введение

Обработка деталей из керамических материалов, например, карбидокремниевых пластин, вызывает известные трудности вследствие повышенной твердости и хрупкости этих материалов, высоких требований к качеству и форме обработанной поверхности [1]. Финишным этапом механической обработки керамических пластин является алмазно-абразивная обработка [2, 3]. Однако такая обработка, в силу указанных особенностей, характеризуется высоким уровнем брака пластин (до 20%) и малой производительностью, что приводит к возрастанию себестоимости указанных изделий. Поэтому данная работа, направленная на преодоление указанных недостатков исследуемого процесса, является актуальной.

Постановка задачи

Исследование производительности и качества алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин для обоснования направлений совершенствования рассматриваемого процесса механической обработки.

Применяемое технологическое оборудование

Алмазно-абразивное шлифование пластин осуществлялось на специальном технологическом оборудовании (рис. 1), на каркасе 1 которого смонтирован корпус 4. На корпусе крепится притир 6, контактирующий с обрабатываемыми заготовками.

Данное оборудование имеет плиту с двигателем и редуктором 2. С помощью блока управления 5 изменяется частота вращения притира при обработке керамических пластин. Держатель 3 имеет на конце ролики, с которыми контактирует алюминиевая планшайба с закрепленными на ней обрабатываемыми заго-

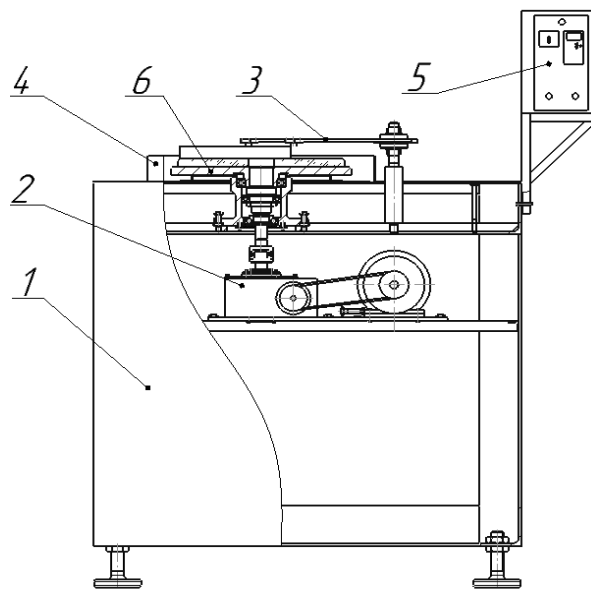


Рис. 1. Схема технологического оборудования

Данное оборудование имеет плиту с двигателем и редуктором 2. С помощью блока управления 5 изменяется частота вращения притира при обработке керамических пластин. Держатель 3 имеет на конце ролики, с которыми контактирует алюминиевая планшайба с закрепленными на ней обрабатываемыми заго-

товками. Рабочая зона данного технологического оборудования (рис. 2) имеет прозрачное ограждение для наблюдения за ходом процесса обработки.

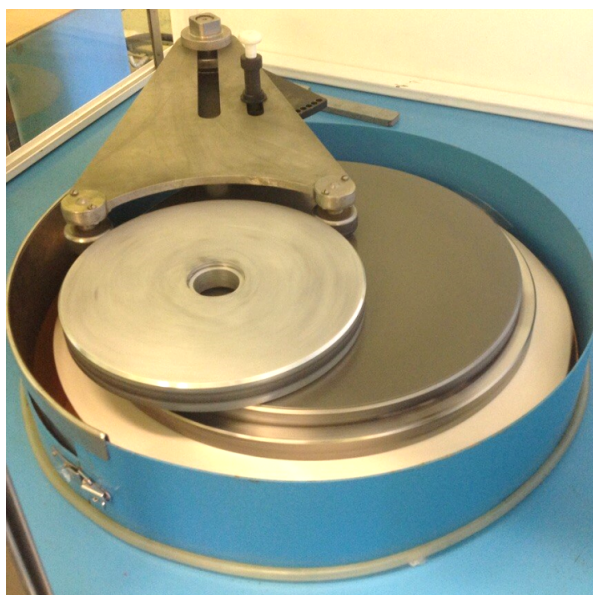


Рис. 2. Рабочая зона установки для алмазно-абразивной обработки пластин из карбида кремния

Исследование формирования шероховатости обработанной поверхности

Исследования включали несколько серий экспериментов. Обработке подвергались как цельные пластины, так и части пластин на различных режимах резания (рис. 3), с варьированием количества этапов обработки, использованием алмазных паст разной зернистости и двумя типами притиров. Данные о параметрах шероховатости обработанной поверхности, а также профиль образцов в виде профилограммы, были получены с помощью профилографа-профилометра «Mahr GmbH».

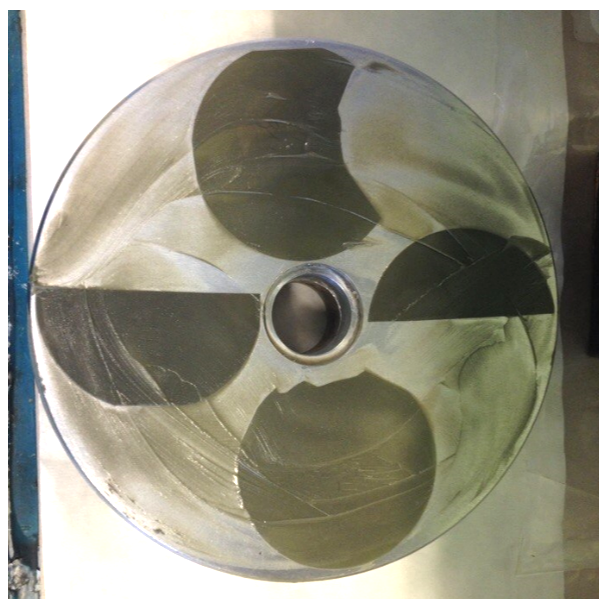


Рис. 3. Карбидокремниевые пластины, наклеенные на планшайбу и покрытые алмазно-абразивной пастой

На первом этапе была проведена одновременная обработка двух цельных пластин и нескольких их частей. Целью данного расположения пластин на планшайбе служит исключение биения карбидокремниевых заготовок о притир в процессе финишной абразивной обработки. Условия алмазно-абразивной обработки и параметры шероховатости представлены в табл. 1.

На втором этапе было проведено шлифование четырех карбидокремниевых заготовок и четырех частей кремниевой пластины на одной планшайбе. Измерение параметров шероховатости осуществлялось в продольном и поперечном направлениях. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Таблица 1

Условия проведения первой серии экспериментов и шероховатость поверхности пластины

Наименование параметра или элемента режима обработки	Обозначение или величина
Алмазно-абразивный материал	Паста АСМ 60/40 ПОМ ГОСТ 22593-83
Частота вращения инструмента, мин ⁻¹	48
Материал притира	Сталь 45
Этапы и время обработки, нагрузка на планшайбу	I этап: 30 минут без груза II этап: 105 минут с грузом 4,8 кг
Параметры шероховатости обработанной поверхности по ГОСТ 2789-73	Поперечная шероховатость
Ra, мкм	0,9...1,6
Rz, мкм	6,0...7,5
Rmax, мкм	6,5...9,0
Базовая длина шероховатости, мм	5,6

Условия проведения второй серии экспериментов и параметры шероховатости поверхности

Наименование параметра или элемента режима обработки	Обозначение или величина	
Абразивный материал	Паста АСМ 40/28 ПОМ ГОСТ 22593-83	
Частота вращения инструмента, мин ⁻¹	30	
Материал притира	Стекло листовое, бесцветное ГОСТ 111-2014	
Время обработки и нагрузка на планшайбу	120 минут с грузом 4,8 кг на планшайбе	
Параметры шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73	Продольная шероховатость	Поперечная шероховатость
Ra, мкм	0,5...0,6	0,4...0,6
Rz, мкм	4,3...5,0	3,4...4,4
Rmax, мкм	4,7...5,9	5,3...5,5

Далее проводилась одновременная алмазно-абразивная обработка двух частей карбидокремниевых пластин и трех целых заготовок (рис. 4) следующим образом: обработка пастой АСМ 60/40 при частоте вращения планшайбы 30 мин⁻¹ в течение 5 часов (четыре из которых с грузом 4,8 кг на планшайбе); обработка пастой АСМ 40/28 при частоте вращения планшайбы 35 мин⁻¹ в течение 3-х часов с грузом; обработка пастой АСМ 28/20 при частоте вращения планшайбы 35 мин⁻¹ в течение 2-х часов без нагрузки на планшайбу. Шероховатость обработанных керамических пластин в продольном направлении составила Ra=1,0...1,1 мкм, Rz=6,0...6,2 мкм, Rmax=7,7...8,0 мкм в поперечном – Ra=0,95...0,98 мкм, Rz=6,5...6,7 мкм, Rmax=7,5...7,7 мкм.



Рис. 4. Планшайба с тремя целыми пластинами и двумя их четвертинами

Растрескивание пластин в ходе экспериментальных исследований не наблюдалось.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показывает, что с уменьшением зернистости алмазно-абразивной пасты (с 60/40 до 28/20 мкм) шероховатость обработанной поверхности уменьшается в 2,5...3 раза. С увеличением количества этапов механической обработки поверхности снижается шероховатость поверхности и глубина дефектного слоя.

Меньшая шероховатость обработанной поверхности достигается при использовании стеклянного притира. Это объясняется тем, что абразивные зерна практически не шаржируются в стеклянные притиры и их количество не уменьшается.

Соотношения между высотными параметрами шероховатости поверхности карбидокремниевых пластин после алмазно-абразивной обработки следующие: Rmax/Ra=8...10, Rz/Ra=6...8.

Шероховатая поверхность пластин после рассмотренной обработки изотропна. Значения параметров шероховатости поверхности, при измерениях в различных направлениях, существенно не меняются.

Исследования производительности процесса алмазно-абразивной обработки

Исследования состояли из следующих этапов:

1. Подбор заготовок пластин таким образом, чтобы отклонение по толщине было не более 3-5 мкм.

2. Отрезание алмазным кругом требуемой части от целой пластины-заготовки.

3. Нанесение адгезионной пленки на одну сторону пластины-заготовки. Вторая сторона заготовки будет подвергнута обработке.

4. Нанесение на планшайбу смеси парафина и воска (толщина смеси – 5-8 мкм) и размещение на ней заготовок пластин. Суммарная толщина заготовки, состоящая из толщин пластины, пленки и клеевой смеси, находилась в пределах от 472 до 476 мкм.

5. Приклеивание заготовок к планшайбе путем их нагрева и охлаждения при комнатной температуре в течение 3-4 минут.

6. Установка планшайбы с заготовками на технологическом оборудовании и нанесение на притир (стеклянный диск) алмазной пасты.

7. Алмазно-абразивная обработка керамических заготовок на технологических режимах, представленных в табл. 3.

8. Оценка величины съема материала через каждые 40-50 минут путем измерения с помощью индикатора толщины пластин. Расчет скорости съема карбида кремния при алмазно-абразивной обработке.

9. Визуальный и инструментальный контроль качества обработанной поверхности. Удаление адгезионной пленки.

Из табл. 3 следует, что производительность процесса составляет 5...10 мкм/ч при использовании алмазной пасты АСМ 60/40 и АСМ 40/28, 4...7 мкм/ч – использовании алмазной пасты АСМ 28/20.

Обоснование направлений совершенствования процесса алмазно-абразивной обработки

Для обоснования направлений совершенствования проведем математическое моделирование процесса съема материала с пластин из карбида кремния (рис. 5).

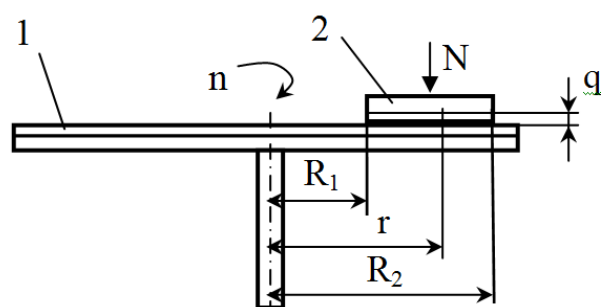


Рис. 5. Схема алмазно-абразивной обработки

К притиру (инструменту) 1, вращающемуся с частотой n, с силой N прижимается заготовка 2 из карбида кремния и обрабатывается в течение времени t. За это время с пластины удаляется слой материала толщиной q. Формулу для расчета величины q можно получить следующим образом.

Скорость съема материала с заготовки при рассматриваемой алмазно-абразивной обработке можно представить в виде [4]

$$\omega = kpV = kp2\pi n, \tag{1}$$

где k – коэффициент, учитывающий свойства карбида кремния и условия обработки; p – давление в зоне контакта; V – скорость перемещения рассматриваемой точки поверхности заготовки относительно притира; r – радиус, на котором находится рассматриваемая точка поверхности заготовки.

Из формулы (1) следует, что величина давления

$$p = \frac{\omega}{2\pi kn}. \tag{2}$$

Таблица 3

Режимы и производительность алмазно-абразивной обработки

Стадия обработки	Тип алмазной пасты по ГОСТ 25593-83	Время обработки, ч		Толщина удаляемого слоя, мкм	Скорость вращения притира, мин ⁻¹	Сила прижатия заготовок к притиру, Н
		Цельная пластина	Часть пластины			
I	АСМ 60/40 ПОМ	8	6	40...60	30-48	60
II	АСМ 40/28 ПОМ	4	3	20...30	30-48	60
III	АСМ 28/20 НОМ	4	3	15...20	30-48	35

Примечание. Применялся стеклянный притир (ГОСТ 111-2014).

Из условия равновесия обрабатываемой пластины следует, что

$$N = \iint_{[S]} p ds, \quad (3)$$

где N – усилие прижатия заготовки к инструменту; $[S]$ – поверхность контакта инструмента (притира) и заготовки.

Уравнение (3) можно представить следующим образом:

$$N = \int_{R_1}^{R_2} p f 2\pi r dr, \quad (4)$$

где $R_2 - R_1$ – размер карбидокремниевой пластины (рис.5); f – коэффициент, зависящий от формы и площади обрабатываемой пластины.

При совместном решении уравнений (2) и (4) получим

$$N = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\omega f}{kn} dr.$$

Решая это уравнение, можно определить, что

$$\omega = \frac{knN}{(R_2 - R_1)f}.$$

Тогда толщина слоя материала, удаляемого с заготовки при алмазно-абразивной обработке,

$$q = \omega t = \frac{knN}{(R_2 - R_1)f} t. \quad (5)$$

Для вычислений по формуле (5) требуется определить величину коэффициента k . Применительно к рассмотренным условиям обработки (см. табл. 3) можно получить, что $k = (2,5 \dots 5,0) \cdot 10^{-8}$.

Из последней формулы следует, что производительность алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин возрастает с увеличением скорости вращения инструмента и усилия его прижатия к заготовке. Кроме того, на скорость съема материала существенно влияет режущая способность инструмента (притира), размеры, форма и количество обрабатываемых пластин.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при одновременной алмазно-абразивной обработке нескольких карбидокремниевых пластин,

размещенных на одной планшайбе при большей частоте вращения инструмента, увеличивается производительность технологического процесса (до 50%), снижается шероховатость обработанной поверхности (до $Ra=0,5 \dots 0,6$ мкм), однако существенно возрастает интенсивность изнашивания притира. Если же осуществлять финишную абразивную обработку карбидокремниевых пластин совместно с кремниевыми пластинами на аналогичных режимах резания, то производительность процесса снижается, шероховатость обработанной поверхности возрастает до $Ra=0,9 \dots 1,1$ мкм вследствие загрязнения кремниевой стружкой поверхностей карбидокремниевых пластин. Однако величина износа притира в этом случае незначительна. Повышению производительности способствует увеличение пути трения обрабатываемой поверхности в процессе контактирования с притиром и числа режущих алмазно-абразивных зерен.

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что изменение схемы обработки добавлением осциллирующих движений планшайбы, применение стальных или чугунных притиров, повышение концентрации в пасте сверхтвердых режущих материалов являются наиболее эффективными путями совершенствования данной алмазно-абразивной обработки.

Полученные результаты позволяют осуществлять выбор условий и режимов алмазно-абразивной обработки карбидокремниевых пластин, обеспечивающих требуемую скорость съема материала (производительность) и шероховатость обработанной поверхности.

Литература

1. Влияние механической обработки на структуру поверхности монокристаллов карбида кремния / Н.И. Долотов и др. // Физика и химия обработки материалов. 1986. № 4. С. 69–71.
2. Душко О.В., Шумячер В.М. Алмазное шлифование карбидокремниевой керамики для машиностроения: монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. 80 с.
3. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И.П. Филонов и др. Минск: Дизайн ПРО, 1995. 208 с.
4. Бишутин С.Г., Алехин С.С. Совершенствование технологии финишной абразивной обработки пластин из карбида кремния // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 5(66). С. 9-13.

Информация об авторах

Бишутин Сергей Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел.: 8-483-256-09-95, e-mail: nad-bisch@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

Алехин Сергей Сергеевич - аспирант, Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел. 8-483-256-09-95, e-mail: salekhin@outlook.com

PRODUCTIVITY AND QUALITY OF DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING OF PLATES FROM SILICON CARBIDE

S.G. Bishutin, S.S. Alekhin

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: the article is devoted to the study of the productivity and quality of diamond-abrasive machining of silicon carbide plates to substantiate the directions for improving the machining process under consideration. It was established that with a decrease in the grit size of the diamond abrasive paste (from 60/40 to 28/20 μm), the roughness of the treated surface decreases 2.5...3 times. Smaller surface roughness ($R_a=0.5...0.6 \mu\text{m}$) is achieved using glass lapping. Studies have shown that the productivity of the process is 5...10 $\mu\text{m}/\text{h}$ with the use of diamond paste ACM 60/40 and ACM 40/28, and it is 4...7 $\mu\text{m}/\text{h}$ - using diamond paste ACM 28/20. The performance of diamond-abrasive machining of silicon carbide plates increases with an increase in the speed of rotation of the tool and the efforts of its pressing to the workpiece. In addition, the rate of removal of material from the workpiece significantly affects the cutting ability of the tool (lapping tool), the size, shape and number of plates processed. The dependence for calculating the rate of removal of material from the workpiece is shown, taking into account the main factors of diamond abrasive machining. It is shown that changing the processing scheme by adding oscillating movements of the faceplate, using steel or cast iron lap, increasing the concentration of super hard cutting materials in the paste are the most effective ways to improve this diamond abrasive machining

Key words: diamond abrasive processing, ceramic materials

References

1. Dolotov N.I. "Impact of machining on structure of surface of monocrystals of silicon carbide", *Physics and Chemistry of Processing of Materials (Fizika i khimiya obrabotki materialov)*, 1986, no. 4, pp. 69-71.
2. Dushko O.V., Shumyacher V.M. "Diamond grind of silicon carbideceramics for mechanical engineering: monograph" ("Almaznoye shlifovanie karbidokremniyevoy keramiki dlya mashinostroyeniya: monografiya"), Volgograd, VGASU, 2009, 80 p.
3. Filonov I. P. et al. "Controlling the shaping of precision surfaces of details of machinery and equipment" ("Upravlenie formoobrazovaniem pretsizionnykh poverkhnostey detaley mashin i priborov"), Minsk, Dezain PRO, 1995, 208 p.
4. Bishutin S.G., Alekhin S.S. "Improvement of technology of finishing abrasive processing of plates from silicon carbide", *The Messenger of the Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 5(66), pp. 9-13.

Submitted 26.02.2019; revised 22.03.2019

Information about the authors

Sergey G. Bishutin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Bryansk State Technical University (7, Boul. of 50 Let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: nad-bisch@yandex.ru, tel.: 8-483-256-09-95

Sergey S. Alekhin, Graduate student, Bryansk State Technical University (7, Boul. of 50 Let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: salekhin@outlook.com, tel.: 8-483-256-09-95

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ С РЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ ПРИ МАРКИРОВАНИИ

А.А. Козлов, А.М. Козлов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: в многономенклатурном производстве все чаще отказываются от бумажных носителей информации и для идентификации изделий на них наносят маркировочные знаки. В машиностроении применяются различные варианты маркировок - красками, ударным методом, электроэрозионным, лазером и др. Однако большинство из них при нанесении знаков повреждает поверхность детали и может вызвать концентрацию напряжений. Для предохранения нанесенной информации от механических повреждений и негативного воздействия окружающей среды маркировочные знаки защищают различными покрытиями. Представлена схема нанесения маркировочных знаков растровым методом под электроизоляционным покрытием без его разрушения, когда в качестве рабочей среды используется реологическая жидкость. Описаны физические явления, происходящие в реологической жидкости при действии на нее магнитного поля. Установлено, что механизм формирования информационных знаков из магнитных жидкостей под слоем эластичного диэлектрического покрытия зависит от электропроводности используемой реологической жидкости. Показано, что постоянное магнитное поле играет роль аксиальной магнитной линзы, фокусное расстояние которой зависит от импульса и заряда ионов, величины тока и радиуса "токового шнура". Меняя ток и радиус электрода инструмента, можно регулировать ширину контура знака, оказывая благоприятное воздействие на четкость контура

Ключевые слова: маркирование, магнитное поле, реологическая жидкость

Введение

Для современного машиностроительного предприятия устойчивой тенденцией является расширение номенклатуры выпускаемых изделий. При выполнении операций технологического процесса это приводит к необходимости постоянного распознавания деталей. В условиях все более широкого применения вычислительной техники и перехода на цифровые технологии сопровождение деталей информацией на бумажных носителях становится неприемлемым. Решением проблемы является маркирование деталей, т.е. нанесение информации непосредственно на саму деталь или изделие в целом.

Постановка задачи

В промышленности применяются различные методы маркирования – красками, ударным методом, электроэрозионным, лазером [1] и т.д.

Одним из наиболее подробно разработанных способов является электрохимическое маркирование [2, 3]. Развитием этого способа является маркирование растровым инструментом [4], при котором имеется возможность изменять наносимую информацию без использования индивидуальных маркеров, стоимость которых

достаточно высока. Принцип формирования информационных знаков растровым инструментом аналогичен «пиксельному» формированию изображения на экране компьютера. Растр, состоящий из набора элементов простейшей формы – круглой, представлен на рис. 1.

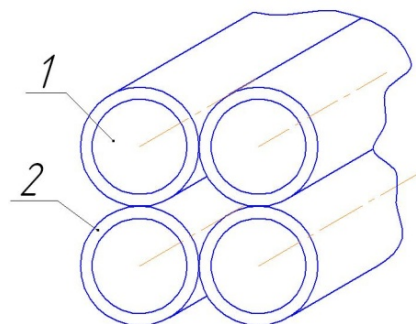


Рис. 1. Элементы растровой решетки:

- 1 – токопроводящий элемент;
- 2 – диэлектрическое покрытие

Многие изделия эксплуатируются в агрессивной окружающей среде, поэтому нанесенная информация должна быть защищена от повреждения. В качестве защитного слоя используются различные покрытия – лаки, краски, резина, полиуретан и т.д., отличительной особенностью которых является то, что все они – диэлектрики. В этом случае нанесение информации под такое покрытие электрическими методами вызывает значительные трудности. Ранее считалось, что маркировать по-

верхность с диэлектрическим покрытием можно только после разрушения покрытия для обеспечения доступа к поверхности детали [5].

Методы исследования

Исследованиями установлено [6], что если в качестве защитного покрытия используется материал, имеющий эластичные свойства, то при некоторых условиях – соответствующей форме заточки инструмента-электрода, высоком давлении жидкости - можно обеспечить раскрытие покрытия на время подачи электролита к поверхности детали. При этом, вследствие упругих свойств покрытия, отверстие, после извлечения инструмента, закрывается, а поданный электролит в герметичном пространстве не нарушает качества поверхности под покрытием. В качестве рабочей среды для маркирования представляют интерес реологические жидкости с магнетиком в виде металлического наполнителя с величиной фракции от 80 до 100 нм, которые под действием локального электромагнитного поля на поверхности детали формируют контур информационного знака.

Однако действие магнитного поля на частицы реологической жидкости в таком процессе не изучены.

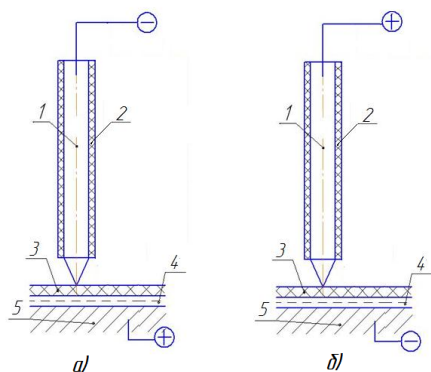


Рис. 2. Формирование магнитных полей при маркировании металлических деталей с диэлектрическим покрытием: а - деталь из ферромагнитного материала; б - деталь немагнитная. 1 – электрод-инструмент; 2 – диэлектрическое покрытие электрода-инструмента; 3 – диэлектрическое покрытие детали; 4 – реологическая жидкость; 5 – деталь

На рис. 2 показана схема формирования фрагмента знака, где в электрическую схему включен электрод-инструмент 1.

При прохождении электрического тока через электрод-инструмент создаётся магнитное поле. Такой же результат можно получить, если электрод-инструмент изготовить из по-

стоянного магнита, а маркируемую поверхность поместить между его полюсами.

В процессе маркирования вначале под диэлектрическое покрытие 3 впрыскивается реологическая жидкость 4 в количестве, достаточном для формирования требуемой информации. Поскольку покрытие 3 имеет эластичные свойства, жидкость 4 подается в пространство между ним и деталью 5 при помощи специально заточенного электрода-инструмента в форме полый иглы [7], без нарушения сплошности материала покрытия.

Рассмотрим влияние на качество маркировки магнитного поля, которое возникает при прохождении электрического тока.

На механизм формирования информационных знаков из магнитных жидкостей под слоем эластичного диэлектрического покрытия в значительной мере влияет электропроводность реологической жидкости.

В случае слабопроводящей жидкости между электродом-инструментом и деталью возбуждается переменное электрическое поле, которое характеризуется током смещения в диэлектрическом покрытии и реологической жидкости, плотность которого

$$\vec{j} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

где \vec{D} - электрическое смещение.

При гармоническом напряжении между полюсами источника тока

$$U = U_m \cdot \sin \cdot \omega \cdot t,$$

плотность тока смещения меняется также по гармоническому закону. Как следует из формулы

$$j_m = \frac{\epsilon_0 \cdot \omega \cdot U_m}{d},$$

его амплитуда зависит от амплитуды подаваемого напряжения U_m , его циклической частоты ω , электрической постоянной ϵ_0 и расстояния d между электродом и деталью.

Напряженность \vec{H} магнитного поля, возбуждаемого током смещения, зависит от расстояния r от оси тока

$$H(r) = \begin{cases} \frac{j(r) \cdot r}{2}, & r \leq R \\ \frac{j(r) \cdot R^2}{r}, & r > R \end{cases}$$

Магнитное поле "азимутальное" (охватывает ток) и меняет направление напряжения на обратное с изменением полярности подаваемого напряжения.

Полагая $j(r) \approx const$ в пределах "токового шнура", границы которого определяются радиусом инструмента-электрода, получим линейный рост напряженности H магнитного

поля от оси тока до его границы, где H достигает максимума, а затем спадает обратно пропорционально r . В результате в радиальном направлении возникает градиент индукции магнитного поля

$$\frac{\partial B}{\partial r} = \begin{cases} \frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot j}{2}, r \leq R \\ -\frac{\mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2}{r^2}, r > R \end{cases}$$

где μ_0 - магнитная постоянная,

μ - магнитная проницаемость реологической жидкости, зависящая от концентрации находящихся в ней частиц ферромагнетика.

В неоднородном магнитном поле на частицы, обладающие магнитным моментом \vec{p}_m , действует сила, направленная в данном случае радиально

$$F_r = p_{mr} \cdot \frac{\partial B}{\partial r}.$$

Внутри "токового шнура" это сила направлена к его периферии и определяется формулой

$$F_r = p_{mr} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2.$$

За пределами "токового шнура" сила, действующая на ферромагнитные частицы, направленных к оси тока,

$$F_r = -p_{mr} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot j \cdot R^2$$

и быстро убывает с увеличением r .

Таким образом, частицы ферромагнетика под действием магнитного поля, возбуждаемого переменным электрическим полем в реологические жидкости, перемещаются к границе области, "занятой" током смещения, создавая контур знака наносимой информации. Регулируя амплитуду и частоту переменного напряжения, можно менять время формирования и (или) высоту знаков.

В случае использования проводящей жидкости - электролита подается постоянное напряжение между электродом-инструментом и деталью. Возникающий в электролите ток проводимости имеет плотность порядка 1-10 А/мм², что на несколько порядков превышает ток смещения в диэлектрической жидкости. Механизм воздействия возбуждаемого магнитного поля на частицы ферромагнетика такой же, однако интенсивность воздействия существенно выше. Для достижения такой же высоты знака требуется меньше времени и меньшее значение подводимого напряжения.

При нанесении выпуклых знаков на поверхность немагнитного металла при протекании тока происходит осаждение ионов металла из электролита. Возникающее постоянное магнитное поле играет роль аксиальной магнитной линзы, фокусное расстояние которой

$F = p \cdot c^2 \cdot R^2 / 2 \cdot q \cdot I$ зависит от импульса p и заряда ионов, величины тока I и радиуса "токового шнура". Меняя ток и радиус электрода R можно регулировать ширину контура знака.

При маркировании деталей из ферромагнетика происходит вынос ионов металла с его поверхности под действием тока в электролите. В результате, в области эрозии металла магнитное поле становится заметно неоднородным. В эти области неоднородности перемещаются ферромагнитные частицы, что позволяет формировать информационные знаки достаточно высокой четкости.

Результаты

В ходе экспериментальных исследований в качестве рабочей реологической жидкости использовалась техническая вода с добавкой магнетита (30-40%) и соляной кислоты (2%) [8].

Электрод-инструмент с двумя элементами и фрагмент растрового контура, формируемого под слоем эластичного покрытия, на примере знака шрифта №5 представлен на рис. 3.

Для формирования четкого выпуклого контура знака важно обеспечить как можно меньшее его растекание под диэлектрическим покрытием. Характеристикой такого отклонения может служить угол α отклонения от вертикали касательной, проведенной к поверхности капли жидкости (рис. 3).

За счет рассеивания электрического поля границы выступов имеют уклоны $\alpha = 3,5^\circ$ (рис. 3, а). При относительно тонком слое диэлектрического покрытия трубок расстояние между соседними элементами перекрывается электромагнитным полем и формируется сплошной контур знака (рис. 3, б).

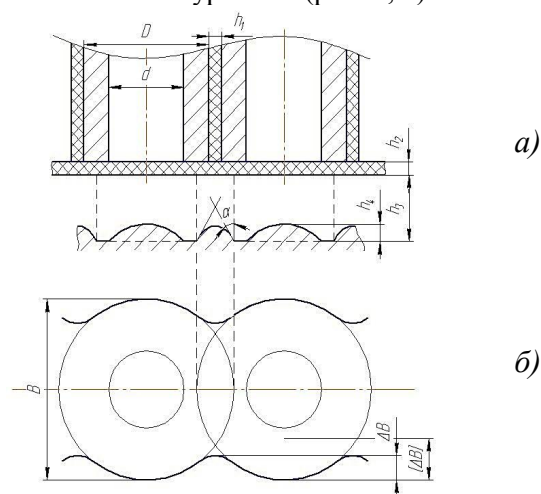


Рис. 3. Формирование контура штриха (шрифт № 5) на поверхности детали под диэлектрическим покрытием

За счет рассеивания электрического поля границы выступов имеют уклоны $\alpha = 3,5^\circ$ (рис. 3, а). При относительно тонком слое диэлектрического покрытия трубок расстояние между соседними элементами перекрывается электромагнитным полем и формируется сплошной контур знака (рис. 3, б). Полученная в результате эксперимента ширина штриха ($B = 0,55$ мм) при допуске на ширину ($[\Delta B] = 0,1$ мм) соответствует стандарту на данный размер шрифта.

Упругое покрытие фиксирует контур знака и защищает его от повреждений и действия внешней среды, что значительно улучшает эксплуатационные показатели маркированной поверхности. После маркирования в течение некоторого времени происходит испарение реологической жидкости. Растворенные в ней магнетики образуют осадок, который формирует информационный массив. Под покрытием информация сохраняется в течение всего периода эксплуатации изделия и может быть считана без разрушения покрытия, например, рентгеновским способом. Для немагнитных материалов детали информация может наноситься со стороны детали на внутреннюю сторону покрытия.

Качество маркирования также можно повысить, если поверхность, на которую наносятся знаки, имеет перекрещивающийся микрорельеф [9], что снижает растекание капли вдоль следов обработки.

Маркирование металлической поверхности проводилось на детали с упругим диэлектрическим покрытием – резина. На деталь наносилась информация в виде служебных слов и символов. Толщина слоя резины $0,5 \pm 0,1$ мм, номер шрифта 5 (рис. 4). Исследование покрытия под микроскопом показало, что после извлечения электрода-инструмента нарушения сплошности покрытия не наблюдалось.



Рис. 4. Вид поверхностей деталей с нанесенными информационными знаками (покрытие снято)

Вывод

В результате выполнения работы установлено, что магнитное поле, возникающее при электрохимическом маркировании металлических деталей реологической жидкостью, позволяет управлять высотой знака и формировать качественные надписи.

Литература

1. Лазерная маркировка материалов / С.Г. Горный, Ю.Б. Гречко, М.И. Патров, К.В. Юдин, В.И. Юревич // Фотоника. 2007. № 3. С. 16-22.
2. Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б. Электрохимическое маркирование деталей. М.: Машиностроение, 1983. 72 с.
3. Смоленцев Г.П., Коптев И.Т., Смоленцев В.П. Теория электрохимической обработки в нестационарном режиме. Воронеж: ВГТУ, 2000. С. 103.
4. Пат. 2284882 РФ. Способ растрового маркирования металлов информацией с переменной шириной штриха и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Л.В. Квасова. 2006. Бюл. № 28.
5. Козлов А.М., Осекон А.Н. Нанесение надписей на металлические поверхности с вязким электроизоляционным покрытием // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. № 2(24.) С. 96-100.
6. Пат. 2542216 РФ. Устройство для электрохимического маркирования поверхности металлической детали под упругим диэлектрическим покрытием и способ с его применением / В.П. Смоленцев, А.А. Козлов, Е.В. Смоленцев, А.М. Козлов. 2015. Бюл. № 5.
7. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2010. 560 с.
8. Пат. 2237569 РФ. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / А.Н. Некрасов и др. № 2004. Бюл. № 28.
9. Подготовка поверхности деталей с диэлектрическим покрытием под электрохимическое маркирование / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, А.М. Козлов, Б.И. Омигов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3.1. С. 73-76.

Информация об авторах

Козлов Андрей Александрович - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: soy4astnik@mail.ru, тел.+7-904-218-85-44, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-7106>

Козлов Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: kam-48@yandex.ru, тел. 8-905-044-90-10, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>

INTERACTION OF THE MAGNETIC FIELD WITH THE RHEOLOGICAL FLUID WHEN MARKING

A.A. Kozlov, A.M. Kozlov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: in diversified production, paper carriers of information are increasingly being abandoned and markings are applied on them to identify products. Various types of markings are used in mechanical engineering: paints, percussion, EDM, lasers, etc. However, most of them damage the surface of a part when applied to signs and can cause stress concentration. To protect the applied information from mechanical damage and negative environmental impact, the markings are protected with various coatings. A scheme of applying markings by a raster method under an insulating coating without its destruction is presented, when rheological fluid is used as the working medium. Physical phenomena occurring in a rheological fluid under the action of a magnetic field on it are described. It is established that the mechanism for the formation of informational signs from magnetic fluids under a layer of an elastic dielectric coating depends on the electrical conductivity of the rheological fluid used. It is shown that a constant magnetic field plays the role of an axial magnetic lens, whose focal length depends on the impulse and charge of the ions, the magnitude of the current and the radius of the "current cord". By changing the current and the radius of the electrode tool, you can adjust the width of the contour of the mark, providing a beneficial effect on the clarity of the contour

Key words: marking, magnetic field, rheological fluid

References

1. Gornyy S.G., Grechko Yu.B., Petrov M.I., Yudin K.V., Yurevich V I. "Laser marking of materials", *Photonics (Fotonika)* 2007, no. 3, pp. 16-22
2. Smolentsev V.P., Smolentsev G.P., Sadykov Z.B. "Electrochemical marking details" ("Elektrokhimicheskoe markirovanie detaley"), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 72 p.
3. Smolentsev G.P., Koptev I.T., Smolentsev V.P. "Theory of electrochemical treatment in non-stationary mode" ("Teoriya elektrokhimicheskoy obrabotki v nestatsionarnom rezhime"), Voronezh, VSTU, 2000, 103 p.
4. Smolentsev V.P., Smolentsev G.P., Kvasova L.V. "Method of raster marking of metals with information with variable stroke width and device for its implementation" ("Sposob rastrovogo markirovaniya metallov informatsiyey s peremennoy shirinoy shtrikha i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya"), patent of the Russian Federation #2284882, 2006, bul. no. 28
5. Kozlov A.M., Osekov A.N. "The inscriptions on the metal surface with a viscous insulating coating", *News Of Higher Educational Institutions of Chernozem Region (Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2011, no. 2(24), pp. 96-100
6. Smolentsev V.P., Kozlov A.A., Smolentsev E.V., Kozlov A.M. "Device for electrochemical marking of surfaces of metal parts under elastic dielectric coating and the method of its application" ("Ustroystvo dlya elektrokhimicheskogo markirovaniya poverkhnosti metallicheskoj detali pod uprugim dielektricheskim pokrytiem i sposob s ego primeneniem"), patent of the Russian Federation #2542216, 2015, bul. no. 5
7. Malkin A.Ya., Isaev A.I. "Rheology: concepts, methods, applications" ("Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya"), St. Petersburg, Pofessiya, 2010, 560 p.
8. Nekrasov A.N. et al. "Method of sharpening hollow piercing medical instruments" ("Sposob zatochki pustotelykh kolyushchikh meditsinskikh instrumentov"), patent of the Russian Federation #2237569, 2004, bul. no. 28
9. Kozlov A.A., Smolentsev V.P., Kozlov A.M., Omigov B.I. "Preparation of surfaces with a dielectric coating under electrochemical marking", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 3-1, pp. 73-76

Submitted 15.02.2019; revised 26.03.2019

Information about the authors

Andrey A. Kozlov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: soy4astnik@mail.ru; tel.: +7-904-218-85-44

Aleksandr M. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: kam-48@yandex.ru; tel.: +7-905-044-90-10

Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 0,5 до 1 п. л. Материал статьи следует представить в электронном и печатном виде.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее - 2 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см.

Шрифт текста - Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисовочные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ - 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Если в статье одна таблица, то слово «Таблица» в названии не пишется. Если в статье несколько таблиц, то над

названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисовочные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Если в статье несколько рисунков, то перед названием пишут «Рис. 1». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1». Если в статье один рисунок, то слово «Рис. 1» под рисунком опускают.

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

Россия, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», к. 212
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: (473)246-28-63; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 29.04.2019.
Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 21,1. Уч.-изд. л. 20,6.
Тираж 500 экз. Заказ № 59.
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84