



ISSN1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021 Т. 29. №2

Самара

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021. Том 29. № 2

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

В.К. Тянь (д.т.н., проф.)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2021. Том 29. № 2)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка И.Г. Минова

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 18.06.21
Выход в свет 8.07.21

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 21,6 п.л.
Уч.-изд. л. 21,0 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 46/21.
Заказ № 333

Телефон: (846) 337 03 42
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2021
© Самарский государственный
технический университет, 2021

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2021. Vol. 29. Issue 2

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L. S. Zimin L.S. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)

Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.K. Tian (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by I. G. Minakova

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106
ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Губин П.Ю., Обоскалов В.П.</i> Инициализация множества начальных планов ремонтов генерирующего оборудования энергосистем при использовании метаэвристических подходов оптимизации на примере метода дифференциальной эволюции.....	6
<i>Ворожейкин В.Н., Баранов А.С.</i> Метод решения задачи выбора стратегии движения охранника при поиске преступника в условиях неопределенности.....	24
<i>Ильина Н.А.</i> Синтез оптимальной по быстродействию системы двухканального управления процессом индукционного нагрева неограниченной пластины.....	47
<i>Рапопорт Э.Я., Рогачев Н.Г.</i> Нечеткая оптимизация в задаче позиционного управления установкой индукционного нагрева.....	61

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Лихтциндер Б.Я.</i> Сенсорные сети – распределенные информационно-измерительные и информационно-управляющие системы.....	76
<i>Ярославкина Е.Е., Суслов А.В.</i> Теоретико-экспериментальное исследование зависимости собственных частот колебаний пластины от толщины отложений.....	88

Электротехника

<i>Базаров А.А., Навасардян А.А., Бондарева Н.В.</i> Конструкция электромагнитного кристаллизатора алюминия периодического действия.....	100
<i>Ведерников А.С., Дунаев Д.И.</i> Коррекция статической характеристики частотного преобразователя для уменьшения амплитуд резонансных колебаний вибростола.....	117
<i>Попов А.В., Плешивцева Ю.Э.</i> Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной закалки стальных заготовок.....	129
<i>Стариков А.В., Кирдяшев В.А.</i> Синтез финитного регулятора для следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем.....	145

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 621.315 + 621.313.12 + 519.688

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ МНОЖЕСТВА НАЧАЛЬНЫХ ПЛАНОВ РЕ- МОНТОВ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ОП- ТИМИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

П.Ю. Губин¹, В.П. Обоскалов^{1,2}

¹ Уральский федеральный университет, УралЭНИИ
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

² Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин»
Уральского отделения РАН
Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, 54А

Аннотация. Одним из возможных подходов к планированию ремонтов оборудования электроэнергетических систем является применение эвристических методов, которые основаны на итерационном преобразовании множества допустимых решений. При этом эффективность метода во многом зависит от выбора начального множества допустимых планов (инициализация метода). Широко принята сегодня методика, согласно которой исходное множество строится на основе псевдослучайной равномерной генерации управляющих переменных, в ряде случаев является лишь паллиативным решением поставленной задачи.

В данной статье на примере решения задачи планирования ремонтов генерирующего оборудования методом дифференциальной эволюции предлагается альтернативная процедура инициализации расчета. Сущность метода заключается в получении начальных планов ремонта с помощью нормально распределенных случайных отклонений от предварительного субоптимального решения, рассчитываемого с применением метода направленного поиска. Применение данного подхода позволяет улучшить вероятностные показатели результирующего плана ремонтов, а именно снизить медианное значение целевой функции и ее коэффициент вариации, а также максимизировать вероятность получения комбинации моментов вывода из работы энергоблоков, полностью удовлетворяющей накладываемым на результат планирования эксплуатационным ограничениям.

Ключевые слова: планирование ремонтов генерирующего оборудования, метод дифференциальной эволюции, метод направленного поиска, моделирование, эвристический метод.

Губин Павел Юрьевич, аспирант.

Обоскалов Владислав Петрович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ.

Введение

Вычислительные ресурсы, которые предоставляет современный персональный компьютер рядового пользователя, на порядки превосходит расчетные возможности вычислительных устройств второй половины XX века. Революция вычислительных мощностей, с одной стороны, позволила менее критично относиться к системе допущений, направленных на снижение вычислительных затрат, а с другой, что представляется особенно важным в рамках данного исследования, открыла возможность использования вероятностно-статистических и эвристических методов и алгоритмов поиска решений сложных технических задач, что, как правило, приводит к повышению качества решения. Прозрачность функционирования и простота реализации этих подходов, а также результативность их применения полностью компенсируют основной недостаток статистических методов – увеличение длительности расчетов. Это предопределило расширение спектра задач науки и техники, для решения которых сегодня используются данные методы.

В электроэнергетике сегодня предложен целый ряд технических решений, базирующихся на генетических, эволюционных и прочих вероятностных алгоритмах. Здесь можно упомянуть следующие области применения обсуждаемых методов в задачах управления, планирования и оптимизации режимов энергосистем: выбор оптимальной конфигурации сети по критерию минимума потерь мощности и обеспеченности уровней напряжения [1, 2]; выбор мощности и места установки средств компенсации реактивной мощности [3, 4]; выбор мощности и места установки возобновляемых источников электроэнергии [5, 6]; прогнозирование энергопотребления [7]; настройка параметров регулировочного оборудования энергосистем [8] и др. В представленной работе основное внимание уделяется применению эвристических алгоритмов поиска решения в приложении к задаче планирования ремонтов генерирующего оборудования энергосистем.

Выбор плана ремонтов генераторов заключается в определении оптимальных моментов отключения энергоблоков ЭЭС для восстановительных работ. В качестве критериев оптимизации, как правило, применяются: максимум обеспеченности заявок на ремонт оборудования; минимум математического ожидания недоотпуска электроэнергии [9]; минимум затрат на производство электроэнергии [10, 11]; минимум вероятности появления дефицита мощности в ЭЭС; оптимальный резерв мощности в ЭЭС [10] и др. [12]. Трудность решения этих задач классическими методами заключается, с одной стороны, в дискретном характере управляющих переменных, а с другой – в многоэкстремальности пространства решений. Достаточно сказать, что при решении задачи планирования ремонтов 10 энергоблоков на горизонте 1 год с недельной дифференциацией периода планирования полным перебором возможных вариантов требуется рассмотрение (анализ допустимости и эффективности плана) более чем 10^{16} возможных комбинаций, что практически невозможно (и нецелесообразно) в современных условиях. С учетом специфики учитываемых ограничений (неопределенность объема и длительности ремонта, возможностей ремонтной базы и др.), а также преимуществ эвристических методов излишним становится обоснование того, что методики, основанные на использовании таких методов, предлагаются международным научным сообществом в качестве инструментария планирования ремонтов [13–15].

Погружаясь в детали исследований применимости эвристических методов в электроэнергетике, можно обратить внимание на то, что в большинстве случаев на этапе инициализации некоторым образом выбирается начальный набор вариантов (эволюционные и генетические алгоритмы) или единственная начальная точка

(метод симуляции отжига). Как правило, исходный набор управляющих переменных формируется случайным образом в диапазоне допустимых значений в соответствии с равномерным вероятностным распределением [13, 16–20]. В частности, возвращаясь к задаче планирования ремонтов, для некоторого энергоблока, ремонт которого требуется выполнить с 10-й по 30-ю недели периода планирования, начальное решение определяется на основе псевдослучайного выбора, равномерно распределенного на рассматриваемом интервале момента времени вывода энергоблока в ремонт. Данный подход к инициализации в полной мере соответствует философии метаэвристических методов, согласно которой во многом успешность оптимизационного процесса определяется многообразием первоначальных решений. Тем не менее такой ход рассуждений не всегда может быть целесообразен с точки зрения результативности решения задачи поиска оптимума.

В данной работе для формирования начального множества планов ремонтов генерирующего оборудования и получения заданного количества опорных векторов предлагается и исследуется возможность применения метода направленного поиска порядка [21] с последующей генерацией нормально распределенных случайных отклонений. В качестве эвристического метода в исследовании используется метод дифференциальной эволюции [22] в приложении к задаче планирования ремонтов [9].

Далее в работе последовательно рассмотрены: постановка задачи планирования ремонтов с кратким описанием методов направленного поиска и дифференциальной эволюции, предлагаемый подход к инициализации расчета, методика экспериментов, выводы по работе.

Задача планирования ремонтов: постановка, методы решения

Постановка задачи планирования ремонтов генерирующего оборудования по критерию минимума математического ожидания (МО) недоотпуска электроэнергии детально рассмотрена в [9, 23]. Далее приводится ее сокращенная версия.

Задача. Определить план ремонтов основного оборудования ЭЭС, удовлетворяющий заданному критерию оптимизации.

Критерий. Минимум МО недоотпуска электроэнергии за расчетный период при вероятностном характере нагрузки.

Математический метод. На этапе оптимизации плана – метод дифференциальной эволюции [22]; на этапе инициализации и разработки вариантов плана – методы направленного поиска 1-го и 2-го порядков [23].

Варьируемые переменные. Моменты вывода в ремонт генерирующих агрегатов, $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n, x_i \in N\}$.

Горизонт планирования. Период времени T (1 год), в рамках которого должны быть выполнены все ремонтные работы. Интервал дискретности принимается равным одной неделе ($T = 52$).

Целевая функция. Для учета требований, предъявляемых к результирующему плану ремонтов, используется целевая функция $f(\mathbf{x})$, включающая величину недоотпуска электроэнергии $h(\mathbf{x})$, а также функцию штрафов $\rho(\mathbf{x})$, которую, в свою очередь, можно представить в виде суммы штрафов $\pi_m(x)$ по каждому из ограничений

$$f(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}) + \rho(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}) + \sum_{m=1}^M c_m \pi_m(\mathbf{x}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\varphi(\mathbf{x})$ – целевая функция оптимизации решаемой задачи (в данном работе – минимум МО недоотпуска электроэнергии, но в общем случае это может быть иная функция, например максимум прибыли генерирующих компаний [9] или минимум расхода топлива [11]);

$\rho(\mathbf{x})$ – штрафная функция, минимум которой соответствует отсутствию нарушений заданных ограничений;

$\pi_m(\mathbf{x})$ – расчетная величина, характеризующая степень нарушения ограничения m для рассматриваемой версии плана ремонтов;

c_m – коэффициент составляющей штрафной функции, масштабирующий нарушения к единицам целевой функции.

В качестве критерия оптимизации используется критерий минимума МО суммарного недоотпуска электроэнергии за расчетный период, то есть основной акцент при планировании ремонтов электротехнического оборудования ставится на задачу обеспечения надежности функционирования ЭЭС. При этом функция $h(\mathbf{x})$ рассчитывается следующим образом:

$$h(\mathbf{x}) = \sum_{w=1}^{52} M(D_w^{\max}(\mathbf{x})). \quad (2)$$

Согласно [24] для отдельной реализации плана ремонтов

$$M(D_w) = (m_{L_{\max,w}} - G_w) \cdot (1 - F_L(G_w, m_{L_{\max,w}}, \sigma_{L,w})) + \sigma_{L,w}^2 \cdot f_L(G_w, m_{L_{\max,w}}, \sigma_{L,w}), \quad (3)$$

где $m_{L_{\max,w}}$ – МО максимума мощности нагрузки в неделю w ;

G_w – располагаемая мощность генерации в неделю w ;

$\sigma_{L,w}$ – среднеквадратичное отклонение (СКО) нагрузки в неделю w ;

$F_L(G_w, m_{L_{\max,w}}, \sigma_{L,w})$ и $f_L(G_w, m_{L_{\max,w}}, \sigma_{L,w})$ – соответственно функции распределения и плотности вероятности мощности нагрузки.

Величина $\pi_m(\mathbf{x})$ рассчитывается в зависимости от вида ограничения.

Ограничения. При планировании ремонтов энергоблоков нами учитываются следующие ограничения:

1. Все ремонты длительностью $\{\tau_i, i = 1, \dots, n\}$ должны быть выполнены в пределах допустимого расчетного периода $x_i \in [x_{i,\min}; x_{i,\max}]$. Ограничение учитывается косвенно. В частности, если значения варьируемых переменных выходят за пределы разрешенного интервала, то они приравняются ближайшей границе $[x_{i,\min}; x_{i,\max}]$.

2. Для N_g генераторов, относящихся к некоторому району либо узлу энергосистемы g , суммарная располагаемая мощность не должна быть меньше порогового значения G_g^{\min} . Степень нарушения этого ограничения для энергосистемы, состоящей из N_R энергорайонов g , может быть рассчитана следующим образом:

$$\pi_1 = \sum_{g=1}^{N_R} \left(\sum_{w=1}^{52} \max \left(G_g^{\min} - \sum_{k=1}^{N_g} (1 - \gamma_{k,g,w}) \cdot G_{k,g}; 0 \right) \right)^2, \quad (4)$$

где $G_{k,g}$ – мощность отдельного энергоблока;

N_g – число энергоблоков;

G_g^{\min} – минимально допустимая располагаемая генерирующая мощность энергорайона g ;

$\gamma_{k,g,w}$ – вспомогательная переменная, идентифицирующая состояние генерирующего агрегата k группы g в неделю w : если генератор k находится в ремонте, то $\gamma_{k,g,w} = 1$, в противном случае – $\gamma_{k,g,w} = 0$.

3. Ограничение ремонтной базы вводится в задачу в виде возможного числа одновременно выполняемых ремонтов оборудования класса $s = 1, \dots, S$, определяемого числом ремонтных бригад r_s . Таким образом, для n генераторов системы:

$$\pi_2 = \left(\sum_{w=1}^{52} \max_{\forall s} \left(-r_s - \sum_{i=1}^n \gamma_{i,s,w}; 0 \right) \right)^2. \quad (5)$$

Допущения. Для всех генераторов расчетный период ограничивается интервалом $(x_i \leq 52 - \tau_i)$, т. е. все ремонты должны быть выполнены в пределах 1 года без дополнительных ограничений. Нагрузка описывается нормальным вероятностным распределением с индивидуальными МО и дисперсией для каждой недели.

Отдельного упоминания требует то, что при планировании ремонтов не учитывается неравномерность недельного графика нагрузки, а в качестве МО и дисперсии нагрузки для каждой недели принимаются вероятностные параметры максимальной за недельный период мощности $L_{\max,w}$ [9]. В общем случае МО недоотпуска электроэнергии на недельном интервале

$$\varphi_w = \sum_{t=1}^{168} M(D_{t,w}) = \tau_w M(D_{\max,w}), \quad (6)$$

где t – номер часа недели w ;

τ_w – число часов недельного максимума дефицита мощности.

Неопределенность $L_{t,w}$ для прогнозных на год вперед почасовых значений нагрузки энергосистемы, относительно которой рассчитывается величина $D_{t,w}$, существенно больше неопределенности МО $m_{L_{\max,w}}$ (3). В то же время величина τ_w в период ремонтной кампании колеблется в узком диапазоне, что позволяет с учетом сказанного выше принять ее постоянной для всех недель w ремонтного периода $\tau_w = \tau = const$. В результате при выборе дискретности периода ремонтов предпочтение следует отдать недельному интервалу постоянства состояний системы.

Следует заметить, что согласно действующему законодательству, регламентирующему правила вывода объектов электроэнергетики в ремонт [25], планирование ремонтов субъектами оперативно-диспетчерского управления должно проводиться в два этапа: составление сводного годового графика в год, предшествующий планируемому, и составление сводного месячного графика на предстоящий месяц с учетом предложений о выводе в ремонт от заявителей и действующего сводного годового графика ремонтов. Отсюда задача планирования ремонтов разбивается на два этапа: планирование ремонтов с годовым упреждением и коррекция ранее разработанного плана на месячном интервале. Поскольку годовой план ремонтов в дальнейшем уточняется, то требования по результирующей точности к нему снижаются, что обосновывает недельную дискретность планового периода. Коррекция плана ремонтов оборудования на месячном периоде является самостоятельной задачей, возможно с иным математическим обеспечением.

Методы планирования ремонтов генерирующего оборудования

В работе для планирования ремонтов применяются два математических метода – метод направленного поиска и метод дифференциальной эволюции.

Метод направленного поиска предложен, описан и исследован в работах [21, 23]. Данный подход можно подразделить на два этапа: на первом из них производится сортировка перечня генераторов, подлежащих ремонту (в начале перечня оказываются энергоблоки с наибольшей располагаемой мощностью, наиболее надежные и подлежащие самому длительному ремонту), а на втором итерационно производится последовательный полный перебор всех возможных сочетаний моментов отключения d генераторов с фиксацией моментов выше стоящих в списке агрегатов. В зависимости от числа генераторов d , участвующих в комбинаторной группе на каждой итерации второго этапа расчета, определяется порядок метода: один генератор – метод 1-го порядка, два генератора – метод 2-го порядка, три генератора – метод 3-го порядка и т. д. Как правило, при повышении порядка повышается качество решения, но при этом нелинейно увеличиваются вычислительные затраты [23].

Метод дифференциальной эволюции – это эвристический метод, обеспечивающий в ходе итерационного процесса постепенное приближение к некоторому оптимальному решению [22]. Последовательность действий, регламентируемых этим методом, можно кратко описать в виде следующей последовательности шагов:

1. Инициализируется набор начальных планов ремонтов, представленных векторами варьируемых переменных \mathbf{x}_j – популяция. Как было показано при обзоре существующих подходов, наиболее распространенным способом инициализации является генерация в допустимом диапазоне значений начальных вариантов решений методом генерации псевдослучайных чисел.

2. Дополнительно каждому элементу популяции (плану) \mathbf{x}_j случайным образом выбираются два других вектора \mathbf{x}_a и \mathbf{x}_b . Для этой тройки определяется промежуточный вектор \mathbf{v} :

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,j} \\ \dots \\ x_{n,j} \end{bmatrix} + \theta \times \left[\begin{bmatrix} x_{1,a} \\ \dots \\ x_{n,a} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{1,b} \\ \dots \\ x_{n,b} \end{bmatrix} \right], \quad (7)$$

где θ – коэффициент скрещивания, в общем случае единый для всех элементов. Если в результате выполнения операции (7) один или несколько моментов отключения энергоблоков v_i выходят за предел допустимого диапазона, то эти моменты заменяются предельными значениями. Таким образом обеспечивается косвенный учет ограничений на допустимый период вывода в ремонт генерирующих агрегатов.

3. Путем случайного замещения части варьируемых переменных $x_{i,j}$ вектора \mathbf{x}_j переменными вновь полученного промежуточного вектора \mathbf{v} определяется новый элемент популяции \mathbf{u} . Если $\varphi(\mathbf{u}) < \varphi(\mathbf{x}_j)$, то вектор-потомок \mathbf{u} заменяет вектор \mathbf{x}_j в множестве возможных решений. Если $\varphi(\mathbf{u}) \geq \varphi(\mathbf{x}_j)$ – вектор \mathbf{u} отбрасывается.

4. Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет выполнено одно из следующих условий:

4.1. на протяжении $k_{\text{lim}1}$ итерационных расчетов целевая функция остается неизменной-(популяция остановилась в развитии);

4.2. достигнуто предельное число итераций расчета $k_{\text{lim}2}$.

В работе [9] алгоритм реализации метода дифференциальной эволюции в приложении к задаче планирования ремонтов генерирующих агрегатов разбирается детально. Кроме того, там показано влияние величины коэффициента скрещивания θ и величины популяции на эффективность расчетной процедуры. В следующем разделе описывается предлагаемая методика инициализации процедуры поиска оптимального плана ремонтов.

Методика инициализации метода дифференциальной эволюции

Как отмечалось во введении, в подавляющем большинстве случаев принято в качестве начального множества решений на этапе инициализации принимать вектор варьируемых переменных, равномерно распределенных в области допустимых значений. Нами рассматривается возможность использования метода инициализации, основанного на случайном рассеивании возможных начальных решений в окрестности субоптимального, предварительно полученного вектора моментов отключения энергоблоков. Для формирования такого вектора предлагается использовать метод направленного поиска 1-го порядка. Множество случайных отклонений определяется на базе нормального распределения Гаусса, где дисперсия моментов вывода агрегатов в ремонт определяется исходя из соответствующей длительности ремонта. Идея, лежащая в основе предлагаемого подхода, заключается в том, что случайные отклонения одновременно обеспечивают и разнообразие исходных точек процесса оптимизации, и их локализацию в сравнительно небольшой области пространства решений. При этом простой в реализации и вычислительно эффективный метод направленного поиска, практически не увеличивая общие вычислительные затраты, позволяет получить более качественное решение, обеспечивающее большую вероятность определения глобального оптимума. Далее приводится рассматриваемый пошаговый алгоритм инициализации процедуры планирования.

1. Для списка генераторов, подлежащих ремонту, выполняется планирование ремонтов методом направленного поиска 1-го порядка, результатом чего является вектор \mathbf{x}_0 моментов вывода агрегатов в ремонт.

Создается «сырая» популяция $B^{(0)}$, представляющая собой матрицу с одинаковыми столбцами, равными \mathbf{x}_0 :

$$B^{(0)} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,s} \\ \vdots & x_{i,j} & \vdots \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,s} \end{pmatrix} = [\mathbf{x}_0, \dots, \mathbf{x}_0], \quad (8)$$

где n – число генераторов, подлежащих ремонту; s – величина популяции; $x_{i,j}$ – момент вывода в ремонт i -го энергоблока согласно j -му варианту плана ремонтов.

2. На базе матрицы $B^{(0)}$ формируется начальная популяция $B^{(1)}$ согласно преобразованию:

$$B^{(1)} = \begin{pmatrix} x_{1,1} + \Delta x_{1,1} & \cdots & x_{1,s} + \Delta x_{1,s} \\ \vdots & x_{i,j} + \Delta x_{i,j} & \vdots \\ x_{n,1} + \Delta x_{n,1} & \cdots & x_{n,s} + \Delta x_{n,s} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $\Delta x_{i,j}$ – сгенерированное согласно нормальному вероятностному распределению (10) с нулевым МО и СКО псевдослучайное отклонение момента вывода в ремонт генератора i вектора популяции j :

$$f(\Delta x_{i,j}) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{\Delta x_{i,j}}{\sigma_i \sqrt{2}}\right)^2} = \frac{1}{\beta(x_{i\max} - x_{i\min}) \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{\Delta x_{i,j}}{\beta(x_{i\max} - x_{i\min}) \sqrt{2}}\right)^2}, \quad (10)$$

где $\sigma_i = \beta(x_{i\max} - x_{i\min})$ – среднеквадратичное отклонение момента вывода в ремонт i -го генератора, пропорциональное с коэффициентом β длине интервала, в течение которого должен быть окончен ремонт i -го генератора. Поскольку после задания отклонений $\{\Delta x_{i,j}\}$ моменты $\{x_{i,j} + \Delta x_{i,j}\}$ вывода в ремонт могут оказаться ненатуральными числами $\{x_{i,j} \in N\}$, значения в матрице популяции B_1 округляются до ближайших целых значений.

Таким образом, все элементы начальной популяции случайны, но при этом локализованы в окрестности некоторого субоптимального решения. Такое ограничение начального пространства состояний имеет своей целью увеличить интенсивность поиска в сравнительно малой области, включающей в себя глобальный оптимум при сохранении числа необходимых итераций расчета.

Экспериментальная часть и дальнейший обзор результатов направлены на анализ результативности применения предлагаемой методики.

Методика эксперимента и тестовая модель

В представленной работе в качестве тестовой модели используется двоякая тестовая схема (TS1) IEEE RTS [26]. Подробное описание данной модели, перечень генераторов, подлежащих ремонту, а также результаты планирования, полученные с помощью метода дифференциальной эволюции, приводятся в работе [9]. На рис. 1 представлена схема данной тестовой модели.

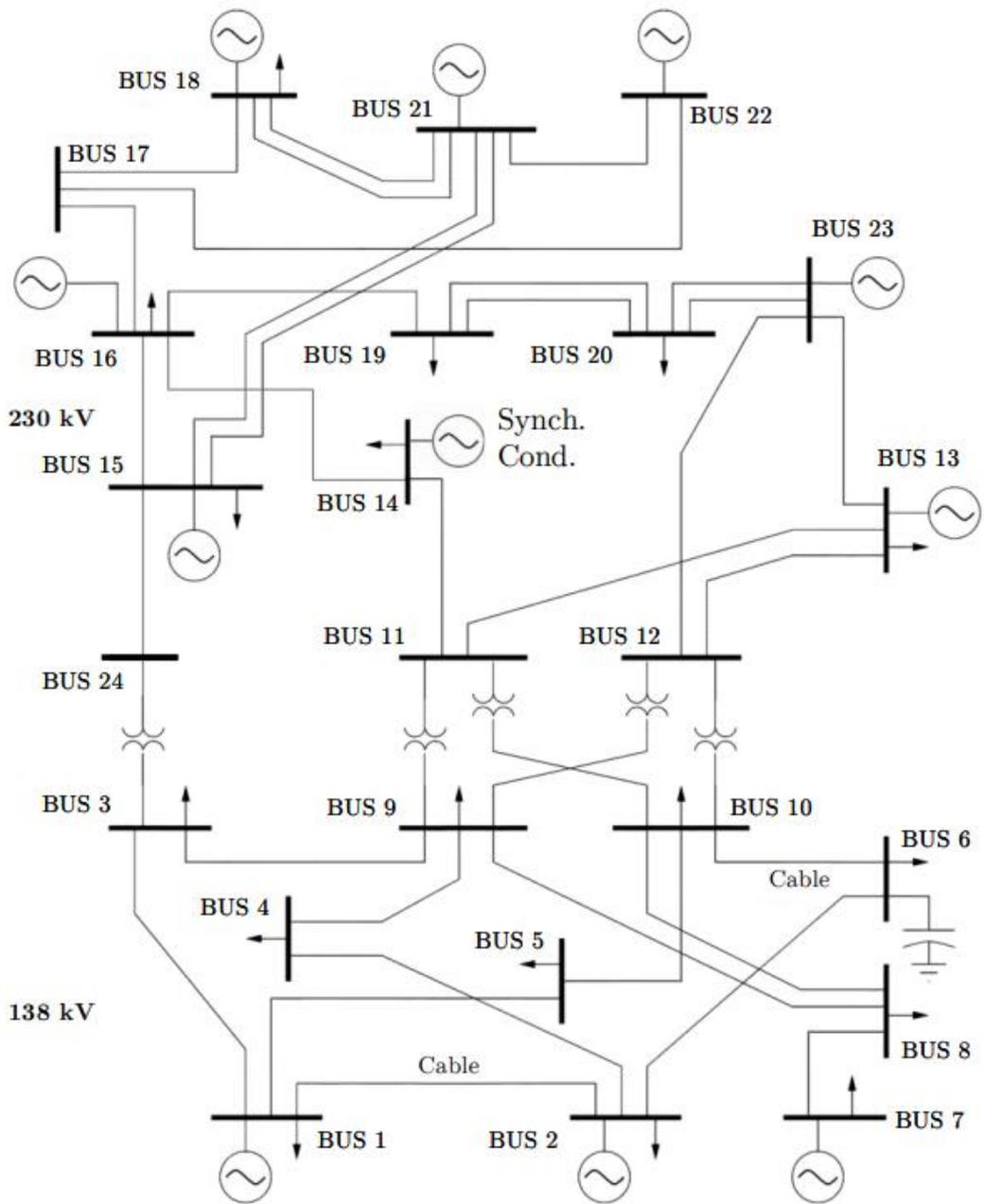


Рис. 1. Однолинейная схема TS1

В таблице представлена сводная информация об ограничениях, накладываемых на план ремонтов энергоблоков, в ходе вычислительных экспериментов, когда это оговаривается.

Рассматриваемые ограничения планирования ремонтов

Тип ограничения	Пороговое значение	Весовой коэффициент штрафа c_m
Число ремонтных бригад	$r = 4$	2,00
Минимальная мощность сети 138 кВ	$G_{\min} = 780$ МВт	0,45

С целью анализа эффективности предлагаемой процедуры инициализации проведены два вычислительных эксперимента:

1. Выполняются последовательные 100 расчетов плана ремонтов генераторов системы при значениях коэффициента

$$\beta = \{0.025; 0.050; 0.075; 0.100; 0.200; 0.300; 0.400; 0.500\},$$

а также для случая, когда все начальные элементы популяции генерируются случайным образом по традиционной методике. Такой расчет выполняется для двух сценариев, согласно которым на шаге 0 предложенной методики используются соответственно методы направленного поиска 1-го или 2-го порядков.

2. Выполняются последовательные 100 расчетов плана ремонтов генераторов системы с учетом ограничений, представленных в таблице, также для случая, когда все начальные элементы популяции генерируются случайным образом по традиционной методике и при значениях коэффициента

$$\beta = \{0.050; 0.075; 0.100; 0.200; 0.300; 0.400; 0.500; 0.600; 0.700; 0.800; 0.900\}.$$

Результатом описанного вычислительного эксперимента являются значения общей целевой функции и ее составляющих: целевой функции надежности и штрафной компоненты, а также расчетные вероятности нахождения плана, удовлетворяющего всем ограничениям без штрафа ($\rho = 0$).

3. Выполняются последовательные 100 расчетов плана ремонтов генераторов системы при случайных равномерно распределенных в диапазоне $[0; 1]$ значениях коэффициента скрещивания θ (7) для двух сценариев: первый – когда начальная популяция генерируется по традиционной методике, т. е. случайно; и второй – когда для получения исходного множества решения используется предлагаемая методика инициализации с методом направленного поиска 1-го порядка и коэффициентом $\beta = 0.05$.

С использованием результатов вычислений, выполненных в ходе описанных экспериментов, получены поля корреляции и коробчатые диаграммы для исследуемых величин, анализ которых производится в следующем разделе.

Анализ результатов

Зависимость результатов планирования ремонтов без учета ограничений от базового метода инициализации и коэффициента β . Первый вычислительный эксперимент направлен на то, чтобы показать, влияет ли вообще подход к инициализации на результаты дальнейшего выбора плана ремонтов и имеет ли значение, какой метод использовать для поиска начальной точки, вокруг которой рассеивается популяция в дальнейшем, – метод направленного поиска 1-го или 2-го порядка.

Рис. 2, представляющий коробчатые диаграммы, построенные по результатам проведенного эксперимента, а также гистограмму расчетных коэффициентов вариации C_v , содержит ответ на поставленные вопросы. Здесь конечная оптимизированная целевая функция пересчитана в относительные единицы относительно величины, соответствующей плану с шага 1 процедуры инициализации.

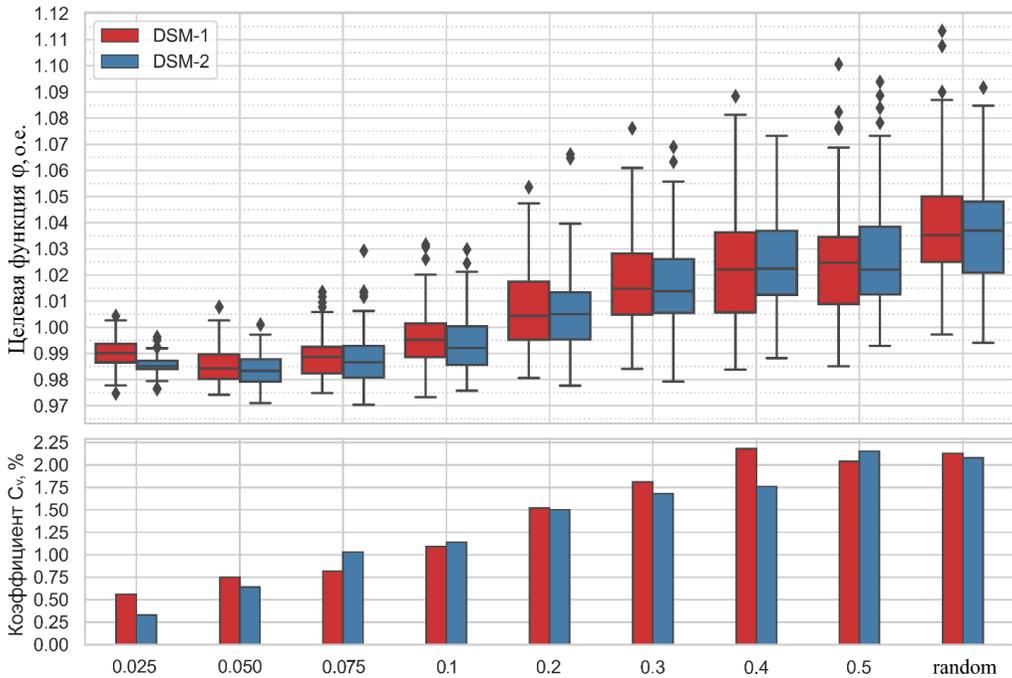


Рис. 2. Коробчатые диаграммы целевой функции ϕ и коэффициенты вариации C_v для двух подходов к инициализации расчета: традиционного (random) и предлагаемого $\beta = [0.025; 0.500]$, и для методов инициализации: направленного поиска 1-го (DSM-1) и 2-го (DSM-2) порядков

В первую очередь на основании диаграмм можно говорить о том, что предлагаемая методика задания начального множества решений эффективна по сравнению с традиционным рассеиванием точек в пространстве допустимых решений. В частности, при любом коэффициенте β медиана результирующей целевой функции ϕ оказывается лучше, чем в традиционном случае (крайние правые ящики на рис. 2). Кроме того, в последнем сценарии вероятность получения решения, превосходящего результаты применения инициализирующего метода направленного поиска, оказывается достаточно мала, в особенности по сравнению со случаем $\beta = 0.05$, когда уже медиане ϕ соответствует значение лучше по сравнению с начальным.

Если говорить о сопоставлении эффективности методов получения начальной точки инициализации – методов направленного поиска 1-го и 2-го порядков, то следует заметить, что принципиальной разницы в результатах не наблюдается. Практически всегда с учетом вероятности результаты планирования двумя методами оказываются сопоставимыми. Отсюда требуемые методом 2-го порядка

сравнительно большие вычислительные затраты не оправдываются и в качестве вспомогательной расчетной процедуры рекомендуется применение более простых методов 1-го порядка.

Зависимость результатов планирования ремонтов с учетом эксплуатационных ограничений от коэффициента β . Результаты первого вычислительного эксперимента, рассматривающего влияние коэффициента β на результаты планирования без учета эксплуатационных ограничений, не разрешают вопрос оценки эффективности однозначно в пользу предлагаемого подхода, поскольку исключение из анализа ограничений может привести к изменению наблюдаемого ранее порядка вещей. В этой связи второй эксперимент направлен на оценку применимости метода при условии необходимости учета ограничений на ремонтную мощность системы (количество ремонтных бригад) и минимально допустимую с точки зрения управления режимом располагаемую мощность генераторов сети 138 кВ тестовой модели. На рис. 3 продемонстрированы коробчатые диаграммы z -оценок целевой функции и ее составляющих для заявленного выше ряда значений коэффициента β , а также гистограмма расчетной вероятности получения по результатам расчетов плана ремонта, удовлетворяющего всем заявленным ограничениям (плана, для которого штрафная составляющая целевой функции $\rho = 0$).

Корреляционные зависимости штрафной и надежностной элементов целевой функции от степени начального рассеивания решений задачи различны по своему характеру. Так, в частности, для составляющей h сохраняется выявленная в первом эксперименте тенденция к росту коэффициента вариации и медианного значения по мере роста коэффициента β вплоть до равномерно случайного разброса начальных решений. При этом выбор наилучшего с этой точки зрения коэффициента β становится менее очевидным, чем в случае, представленном на рис. 2.

Для штрафной составляющей целевой функции, напротив, характерны резкое снижение неопределенности при увеличении степени рассеивания элементов матрицы-популяции $B^{(1)}$ и в равной мере быстрое снижение медианного значения штрафа. Это обстоятельство объяснимо. Поскольку инициализация методом направленного поиска подразумевает нахождение начального плана без учета ограничений, все полученные решения оказываются локализованы в некоторой окрестности этой исходной точки пространства состояний. Если в случаях отсутствия ограничений или их слабого влияния на результаты планирования описанное расположение обеспечивает нахождение наилучших решений вблизи глобального оптимума и фактически сводит задачу к локальному поиску, то при наличии жестких ограничений, когда оптимальный с учетом требований эксплуатации план сильно отличается от начального, локализация становится, наоборот, дополнительным препятствием на пути к наилучшему компромиссу. Действительно, в последнем случае близость к оптимальному с точки зрения надежности варианту приводит также к удалению от решения учитывающего ограничения на число ремонтных бригад, минимальную располагаемую мощность систем и пр.

Наглядным примером этому служит графическое представление результатов эксперимента на рис. 3 для штрафной составляющей ρ целевой функции при значениях коэффициента $\beta = 0.050$ и $\beta = 0.075$: в первом случае начальные вариации плана ремонтов оказываются чрезмерно близко друг к другу для того, чтобы в ходе дальнейшего итерационного процесса обеспечить выполнение заявленных эксплуатационных ограничений несмотря на то, что вероятностные

показатели для надежностной составляющей h в данном случае оказываются наилучшими. Во втором случае при относительно небольшом увеличении фактора рассеивания β дисперсии z -оценок целевой функции и штрафа ρ оказываются на порядок меньше, что справедливо и для медианных значений.

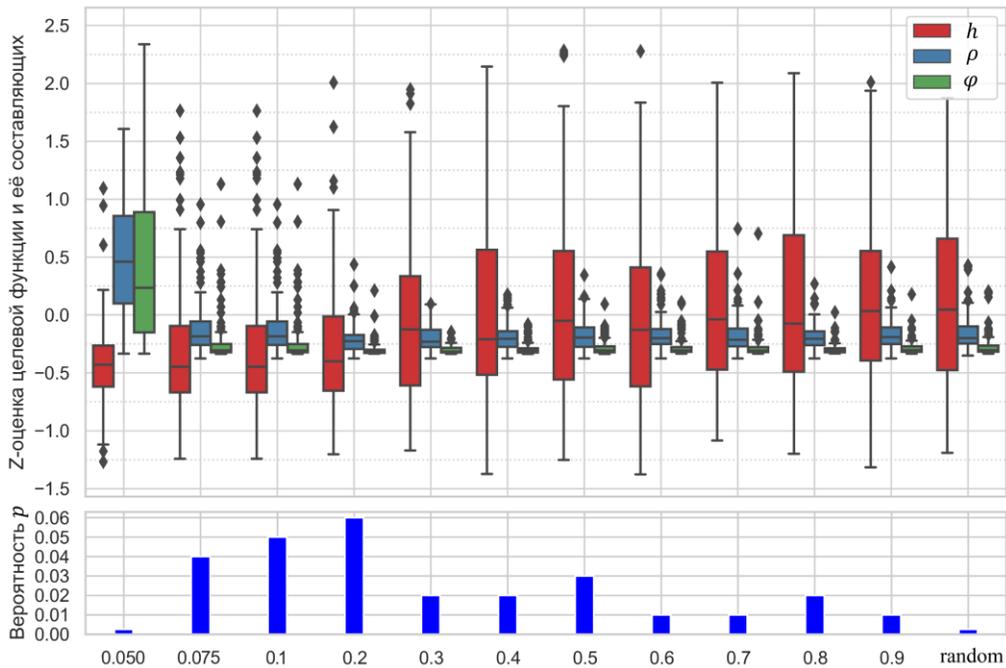


Рис. 3. Коробчатые диаграммы z -оценок целевой функции ϕ и ее составляющих h и ρ для предлагаемого $\beta = [0.050; 0.900]$ и традиционного (random) подходов с учетом ограничений; гистограмма вероятности p получения решения, удовлетворяющего всем ограничениям ($\rho = 0$)

Тем не менее следующие два наблюдения позволяют говорить об эффективности предлагаемого подхода к инициализации. Во-первых, медианное значение и дисперсия целевой функции ϕ оказываются минимальными для значения коэффициента $\beta = 0.200$. При дальнейшем увеличении этого параметра рассеивание штрафной составляющей практически не меняется, но ухудшаются надежностные показатели результирующего плана ремонтов. Во-вторых, при той же величине β оказывается максимальной вероятность достижения решения, для которого штраф $\rho = 0$, т. е. выполняются все накладываемые на задачу эксплуатационные ограничения. Таким образом, можно говорить о том, что и в случае учета ограничений существует оптимальное с точки зрения планирования значение коэффициента β

Взаимосвязь процедуры инициализации и настроек метода дифференциальной эволюции. Цель заключительного вычислительного эксперимента – выяснить, может ли быть достигнута аналогичная показанной в предыдущем разделе эффективность традиционной процедуры инициализации при отличных от

прошлого сценария настройках метода дифференциальной эволюции, в частности при ином функциональном представлении коэффициента скрещивания θ . Поля корреляции целевой функции оптимизации в относительных единицах и коэффициента скрещивания для двух сценариев представлены на рис. 4.

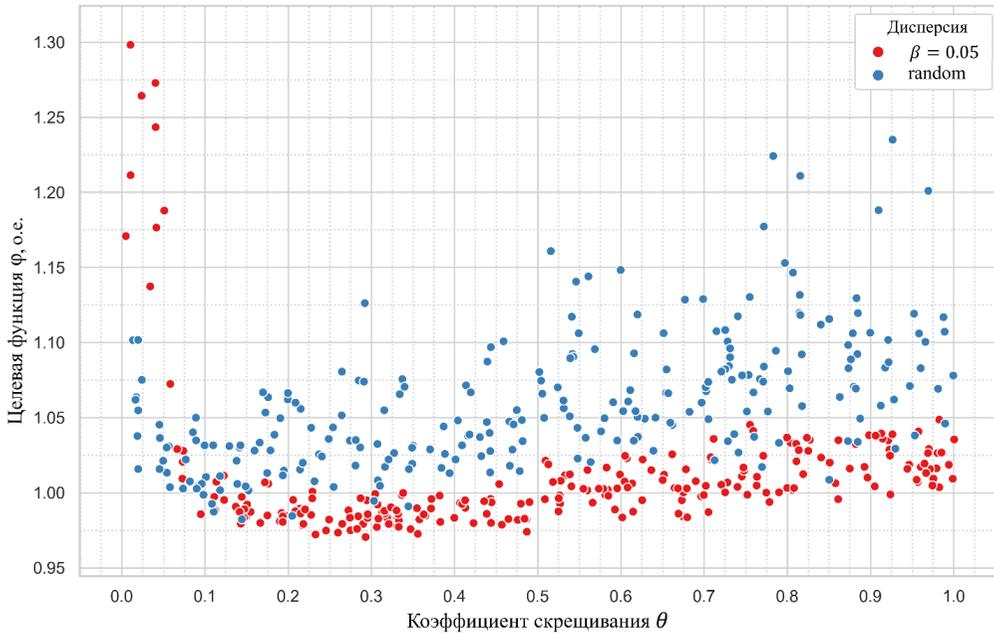


Рис. 4. Диаграммы рассеяния целевой функции φ относительно коэффициента скрещивания θ для двух подходов к инициализации расчета: традиционного (random) и предлагаемого ($\beta = 0.050$)

Рис. 4 является убедительным доказательством того, что показанная сравнительная непродуктивность традиционной методики не вызвана ошибочным выбором параметров метода дифференциальной эволюции. Действительно, во всем рассматриваемом диапазоне значений коэффициента скрещивания F решения, полученные после формирования множества начальных решений по исследуемому методу, превосходят результаты применения традиционного подхода. Более того, рассеяние последних в несколько раз превосходит аналогичную величину для нового метода.

Заключение

В исследовании предложен метод инициализации процедуры планирования ремонтов на базе методов направленного поиска и дифференциальной эволюции и доказана его эффективность по сравнению с существующим наиболее распространенным подходом. Результаты экспериментов показывают, что для инициализации наиболее целесообразно использование метода направленного поиска 1-го порядка как наиболее простого и достаточно эффективного для задания начального плана ремонтов. В частности, модификация позволяет получить более качественное решение с меньшим по сравнению с классическим методом коэффициентом вариации результирующей целевой функции, а в случае рассмотрения эксплуатационных ограничений – максимизировать вероятность получения

решения, обеспечивающего их выполнение. В заключение показано, что предлагаемый подход сохраняет свою эффективность при любых настройках метода дифференциальной эволюции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мартынюк М.В.* Адаптация генетического алгоритма для решения задач управления состоянием электрической сети // Информатика и управление в технических и социальных системах. – 2019. – № 3. – С. 47–56.
2. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // International Journal of Scientific Research and Education. 2015. Vol. 3, no. 6. Pp. 3861–3877.
3. *Влацкая Л.А., Семенова Н.Г.* Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 4. – С. 21–28.
4. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning-based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. Vol. 22, no. 1. Pp. 78–101.
5. *Кычкин А.В., Чудинов А.В.* Применение генетического алгоритма для оптимизации размещения альтернативных источников энергии в локальном сегменте активно-адаптивной сети // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 1. – С. 76–82.
6. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // Energy Procedia. 2011. Vol. 12, no. 1. Pp. 245–252.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // Electric Power Systems Research. 2001. Vol. 58, no. 1. Pp. 53–62.
8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization of Controller Parameters for Non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // International Journal of Engineering Research & Technology. 2013. Vol. 2, no. 6. Pp. 228–233.
9. *Губин П.Ю., Обоскалов В.П.* Применение метода дифференциальной эволюции в задаче планирования ремонтов генерирующего оборудования // Изв. РАН. Энергетика. – 2021. – № 2. – С. 1–14.
10. *Воропай Н.И., Федотова Г.А.* Планирование ремонтов электрогенерирующего оборудования в рыночной среде с учетом надежности // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 7. – С. 179–184.
11. *Saraiva J.T., Pereira M.L., Mendes V.T., Sousa J.C.* A Simulated Annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem // Electric Power Systems Research. 2011. Vol. 81. Pp. 1283–1291.
12. *Александров О.И.* Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе // Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – 2017. – № 4. – С. 320–333.
13. *Saber A.Y., Senjyu T., Yona A., Funabashi T.* Unit commitment computation by fuzzy adaptive particle swarm optimization // IET Generation, Transmission and Distribution. 2007. Vol. 1. Pp. 456–465.
14. *Sato T., Nara K.* Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method // IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol. 6. Pp. 850–857.
15. *Volkovskiy A., Mavko B., Bosevski T., Causevski A., Cepin M.* Genetic algorithm optimization of the maintenance scheduling of generating units in a power system // Reliability Engineering and System Safety. 2008. Vol. 93. Pp. 757–767.
16. *Balaji G., Balamurugan R., Lakshminarasimman L.* Mathematical approach assisted differential evolution for generator maintenance scheduling // Electrical Power and Energy Systems. 2016. Vol. 82. Pp. 508–518.
17. *Suresh K., Kumarappan N.* Hybrid improved binary swarm optimization approach for generation maintenance scheduling problem // Swarm and Evolutionary Computation. 2013. Vol. 9. Pp. 69–89.
18. *Lakshminarayanan S., Kaur D.* Optimal maintenance scheduling of generator units using discrete integer cuckoo search optimization algorithm // Swarm and Evolutionary Computation. 2018. Vol. 9. Pp. 89–98.
19. *Schlunz E.B., Vuuren van J.H.* An investigation into the effectiveness of simulated annealing as a solution approach for the generator maintenance scheduling problem // Electrical Power and Energy Systems. 2013. Vol. 53. Pp. 166–174.

20. *El-Amin I., Duffuaa S., Abbas M.* A Tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units // *Electric Power System Research*. 2000. Vol. 54. Pp. 91–99.
21. *Арзамасцев Д.А., Жукова А.П., Обоскалов В.П.* Применение методов направленного поиска для планирования капитальных ремонтов основного оборудования энергосистем // *Применение математических методов и вычислительной техники в энергетике*. – 1973. – С. 3–7.
22. *Storn R., Price K.* Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces // *Journal of Global Optimization*. 1997. Vol. 11. Pp. 341–359.
23. *Gubin P.Y., Oboskalov V., Mahnitko A., Varfolomejeva R.* An Investigation into the Effectiveness of the Directed Search Method for Optimal Generating Equipment Maintenance by EENS Criteria // *Proceeding of the IEEE RTUCON*. 2019. Riga, Latvia, October 2019.
24. *Обоскалов В.П., Кокин С.Е., Курникова И.Л.* Применение вероятностно-статистических методов и теории графов в электроэнергетике. – Екатеринбург, 2016. – 271 с.
25. Постановление Правительства РФ от 30.01.2021 № 86 «Об утверждении Правил вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросу совершенствования порядка вывода объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации» // *Собрание законодательства РФ*. 08.02.2021. № 1. Ст. 985.
26. *Grigg C., Wong P.* The IEEE reliability test system – 1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1999. Vol. 14. Pp. 1010–1020.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2021 г.

THE INITIALIZATION OF INITIAL GENERATING EQUIPMENT MAINTENANCE SCHEDULES WHILE A HEURISTIC METHOD IS USED

P.Yu. Gubin¹, V.P. Oboskalov^{1,2}

¹ Ural Federal University
19, Mira st., 620002, Yekaterinburg, Russian Federation

² SEC “Reliability and Safety of Large Systems and Machines” UB RAS
54A, Studencheskaya st., 620049, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. *Currently, heuristic methods based on iterative changing of feasible solutions set provide a perspective tool for generation equipment maintenance scheduling in power systems. Wherein effectiveness of a heuristic method depends significantly on the initial set of possible schedules or in other words quality of the method initialization. In this case, a widely used methodology of building the initial array of solutions on the basis of pseudorandom uniform generation of control variables seems to be only palliative way to access the problem.*

This paper proposes alternative initialization procedure drawing on the example of generating units maintenance planning with heuristic differential evolution method. The principle of this method is to get initial set of solutions utilizing normal probability distribution to generate pseudorandom deviations from the suboptimal maintenance schedule which is to be preliminarily formed using directed search method. Following this approach allows to improve probabilistic characteristics of resultant maintenance schedule – in particular to decrease median value of an objective function and its coefficient of variation, and to maximize probability to get the combination of units outage moments completely suiting operational constraints.

*Pavel Yu. Gubin, Postgraduate Student.
Vladislav P. Oboskalov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

Keywords: generation maintenance scheduling, differential evolution method, directed search method, simulation, heuristic method.

REFERENCES

1. *Martynyuk M.V.* Adaptation of the genetic algorithm for solving problems of managing the state of the electrical network // *Informatika i upravlenie v tekhnicheskikh i social'nyh sistemah*. 2019. No. 3. Pp. 47–56. (in russian)
2. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // *International Journal of Scientific Research and Education*, 2015. Vol. 3. No. 6. Pp. 3861–3877.
3. *Vlatskaya L.A., Semenova N.G.* Application of genetic algorithms in the problems of optimizing the placement of compensating devices // *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы*, 2019. No. 4. Pp. 21–28. (in russian)
4. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning-based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2019. Vol. 22. No. 1. Pp. 78–101.
5. *Kychkin A.V., Chudinov A.V.* Application of a genetic algorithm to optimize the placement of alternative energy sources in the local segment of an active-adaptive network // *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2016. No. 1. Pp. 76–82. (in russian)
6. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // *Energy Procedia*, 2011. Vol. 12. No. 1. Pp. 245–252.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // *Electric Power Systems Research*, 2001. Vol. 58. No. 1. Pp. 53–62.
8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization of Controller Parameters for Non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013. Vol. 2. No. 6. Pp. 228–233.
9. *Gubin P.Y., Oboskalov V.P.* Differential evolution for generation maintenance scheduling // *Izvestiya RAN. Energetika* 2021. No. 2. P. 1–14. (in russian)
10. *Voropaj N.I., Fedotova G.A.* Maintenance planning under competitive market environment by reliability criteria // *Avtomatika i telemekhanika*. 2010. Iss. 7. P. 179–184. (in russian)
11. *Saraiva J.T., Pereira M.L., Mendes V.T., Sousa J.C.* A Simulated Annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem // *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 81. Pp. 1283–1291.
12. *Aleksandrov O.I.* Discretization of the repair plan for the main equipment in the electric power system // *Energetika. Izvestiya VUZov i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*. 2017. No. 4. Pp. 320–333. (in russian)
13. *Saber A.Y., Senjyu T., Yona A., Funabashi T.* Unit commitment computation by fuzzy adaptive particle swarm optimization // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2007. Vol. 1. Pp. 456–465.
14. *Satoh T., Nara K.* Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1991. Vol. 6. Pp. 850–857.
15. *Volkanovski A., Mavko B., Bosevski T., Causevski A., Cepin M.* Genetic algorithm optimization of the maintenance scheduling of generating units in a power system // *Reliability Engineering and System Safety*. 2008. Vol. 93. Pp. 757–767.
16. *Balaji G., Balamurugan R., Lakshminarasimman L.* Mathematical approach assisted differential evolution for generator maintenance scheduling // *Electrical Power and Energy Systems*. 2016. Vol. 82. Pp. 508–518.
17. *Suresh K., Kumarappan N.* Hybrid improved binary swarm optimization approach for generation maintenance scheduling problem // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2013. Vol. 9. Pp. 69–89.
18. *Lakshminarayanan S., Kaur D.* Optimal maintenance scheduling of generator units using discrete integer cuckoo search optimization algorithm // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018. Vol. 9. Pp. 89–98.
19. *Schlunz E.B., Vuuren van J.H.* An investigation into the effectiveness of simulated annealing as a solution approach for the generator maintenance scheduling problem // *Electrical Power and Energy Systems*. 2013. Vol. 53. Pp. 166–174.
20. *El-Amin I., Duffuaa S., Abbas M.* A Tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units // *Electric Power System Research*. 2000. Vol. 54. Pp. 91–99.

21. *Arzamastsev D.A., Zhukova A.P., Oboskalov V.P.* Application of directed search methods for planning major overhauls of the main equipment of power systems // *Primenenie matematicheskikh metodov i vychislitel'noj tekhniki v energetike*. 1973. Pp. 3–7. (*in russian*)
22. *Storn R., Price K.* Differential Evolution – A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces // *Journal of Global Optimization*. 1997. Vol. 11. Pp. 341–359.
23. *Gubin P.Y., Oboskalov V., Mahnitko A., Varfolomejeva R.* An Investigation into the Effectiveness of the Directed Search Method for Optimal Generating Equipment Maintenance by EENS Criteria // *Proceeding of the IEEE RTUCON 2019, Riga, Latvia, October 2019*.
24. *Oboskalov V.P., Kokin S.E., Kirpikova I.L.* *Primeneniye veroyatnostno-statisticheskikh metodov i teorii grafov v elektroenergetike* [Application of probabilistic-statistical methods and graph theory in the electric power industry], Yekaterinburg, 2016. 271 p. (*in russian*)
25. Decree of the Government of the Russian Federation of January 30, 2021 No. 86 "On approval of the Rules for the decommissioning of electric power facilities for repair and out of operation, as well as on amendments to some acts of the Government of the Russian Federation on the issue of improving the procedure for the withdrawal of electric power facilities for repair and out of operation" (Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 30.01.2021 No. 86 «Ob utverzhdenii Pravil vyvoda ob"yektov elektroenergetiki v remont i iz ekspluatatsii, a takzhe o vnesenii izmeneniy v nekotoryye akty Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii po voprosu sovershenstvovaniya poryadka vyvoda ob"yektov elektroenergetiki v remont i iz ekspluatatsii») // *Collection of legislation of the Russian Federation (Sobraniye zakonodatel'stva RF)*. 02.08.2021. No. 1. Pp. 985. (*in russian*)
26. *Grigg C., Wong P.* The IEEE reliability test system – 1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1999. Vol. 14. Pp. 1010–1020.

УДК 004.056

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ ДВИЖЕНИЯ ОХРАННИКА ПРИ ПОИСКЕ ПРЕСТУПНИКА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В.Н. Ворожейкин, А.С. Баранов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Работа посвящена вопросу комплексного использования технических средств и физических сил охраны при обеспечении безопасности нескольких объектов, расположенных на контролируемой территории. Предлагается метод решения задачи выбора стратегии поиска преступника сотрудником охраны с минимизацией времени при наличии неопределенности знания направления движения первого к одному из двух объектов. В основе предлагаемого метода лежит стратегия поиска преступника, реализуемая системой управления движениями охранника, включающая два прямолинейных участка его пути, которые формируются на основе информации с датчиков охранной сигнализации. Разработана математическая модель расчета параметров управления движениями охранника и алгоритм работы системы управления, позволяющий реализовать оптимальную стратегию поиска в зависимости от местоположения объектов, охранника, преступника и информации с технических средств охраны.

Ключевые слова: объект, территория, преступник, охранник, стратегия, технические средства охраны, математическая модель, алгоритм.

Введение

Исследование вопросов обеспечения безопасности объектов не потеряло свою актуальность и в настоящее время. Необходимость решения этих задач связана с рядом часто встречающихся проблем объектовой охраны. Во-первых, в большинстве организаций выделяется недостаточно средств на охрану, однако защищать объекты, находящиеся на территории организаций, в условиях ограниченных средств необходимо. Во-вторых, технические средства охраны (ТСО), установленные по периметру крупных предприятий, информируют лишь о факте несанкционированного доступа (НСД) и не позволяют исключить проникновение злоумышленника на контролируемую территорию. В-третьих, в организациях, расположенных на больших территориях, ТСО не позволяют отслеживать перемещения постороннего по охраняемой территории.

Анализ известных авторам работ в области защиты объектов показывает, что значительная их часть [1–12] посвящена техническим средствам охраны (в частности, проектированию, установке, обработке сигналов с охранных извещателей с целью уменьшения ложных срабатываний и др.).

Работа [13] В.В. Меньших и Д.Ю. Калкова посвящена разработке модели поиска злоумышленника в границах контролируемой территории при рассмотрении

Ворожейкин Владимир Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

Баранов Александр Сергеевич, студент.

различных реакций системы защиты. Данная модель рассчитывает время пребывания злоумышленника на охраняемой территории, а также помогает имитировать действия злоумышленника.

В статье [14] В.Н. Ворожейкина проводится анализ метода поиска преступника «вдогонку». Автор доказывает, что при использовании рассматриваемого метода не удастся минимизировать время поиска преступника, тем самым перехват преступника до реализации его цели на объекте маловероятен.

С.С. Звездинский, И.В. Парфенцев и М.Н. Бережная [15] предложили два критерия эффективности поиска наземных целей с использованием мобильного комплекса на основе системы дистанционного обнаружения.

В вышеприведенных работах не решается задача минимизации времени поиска преступника в пределах контролируемой территории на основе комплексного подхода с учетом технических и физических средств охраны с целью разработки математической модели поиска преступника.

Рассмотрим задачу разработки метода выбора стратегии движения охранника при поиске преступника в условиях неопределенности.

Постановка задачи

Дана территория организации, в пределах которой находятся пост охраны и два защищаемых объекта (ЗО). Технические средства охраны регистрируют время и место нарушения преступником охраняемой территории и ЗО соответственно.

На посту охраны после срабатывания охранных извещателей проводится коррекция с помощью радиосвязи положения сотрудника охраны, осуществляющего патрулирование территории (рис. 1).

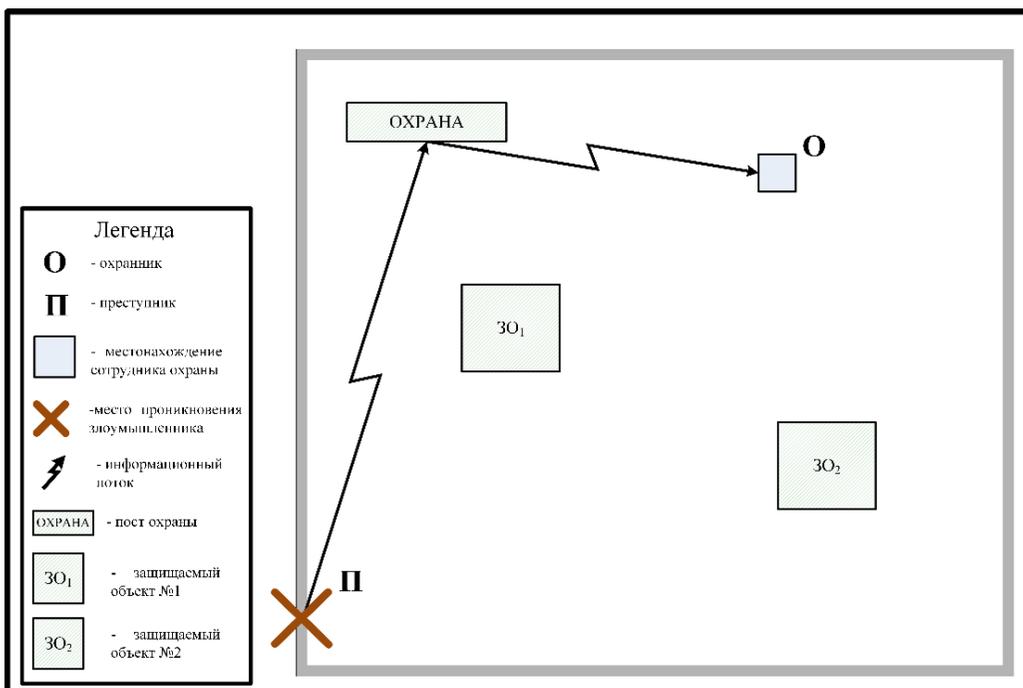


Рис. 1. Информационные потоки: периметральный извещатель – пункт охраны – охранник

Цель исследования – разработка стратегии поиска преступника в пределах контролируемой зоны в условиях неопределенности.

Под стратегией поиска преступника понимается алгоритм управления движением охранника по радиоканалу с поста охраны на основе сигналов охранных извещателей, расположенных вдоль периметров территории организации и защищаемых объектов.

Условием неопределенности является отсутствие информации у охраны о цели преступника в процессе его движения от периметра территории организации до одного из двух объектов.

В качестве критерия решения задачи рассматривается минимальное время поиска преступника независимо от его цели – любого из двух объектов, т. е. время поиска должно отвечать двум условиям:

- минимальное время и его значение для любого из двух объектов;
- минимальная разница времени поиска между двумя объектами.

В качестве параметров управления движением охранника в дальнейшем будем использовать время и направление движения охранника в начальный момент времени и в точках коррекции его движения.

Допущения:

1. Преступник движется по прямой.
2. Движение охранника может содержать несколько отрезков прямых линий.
3. Сотрудник охраны и преступник движутся с равной скоростью на всех участках.

Метод решения

С целью решения поставленной задачи проведем анализ возможных вариантов – алгоритмов управления движением охранника при поиске преступника в зависимости от информации о взаимном положении охранника, преступника и объектов в моменты нарушения преступником периметров территории организации и объекта. В качестве метода системного анализа выбрали метод типа «сценарии» [16].

Введем отрезки u_1, u_2 . Это расстояние от места совершения НСД до ЗО₁ и ЗО₂; x_1, x_2 – расстояния от местонахождения сотрудника охраны до ЗО₁ и ЗО₂; «с» – расстояние между ЗО, «п» – расстояние, являющееся составной частью пути сотрудника охраны до выделенных помещений. Обозначим угол φ_{\max} между сторонами x_1 и x_2 треугольника x_1x_2c . Данные обозначения продемонстрированы на рис. 2. Под «О» будем подразумевать сотрудника охраны, под «П» – преступника.

Для анализа будем рассматривать стратегии, при которых охранник и преступник движутся к разным ЗО, поскольку в противном случае задача получает простое решение.

$$\begin{aligned} 1. & P \rightarrow ZO_1, O \rightarrow ZO_2, \\ 2. & P \rightarrow ZO_2, O \rightarrow ZO_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Учитывая, что стратегии 1 и 2 в выражении (1) представляют собой взаимное зеркальное отображение, будем далее рассматривать только

$$1. P \rightarrow ZO_2, O \rightarrow ZO_1.$$

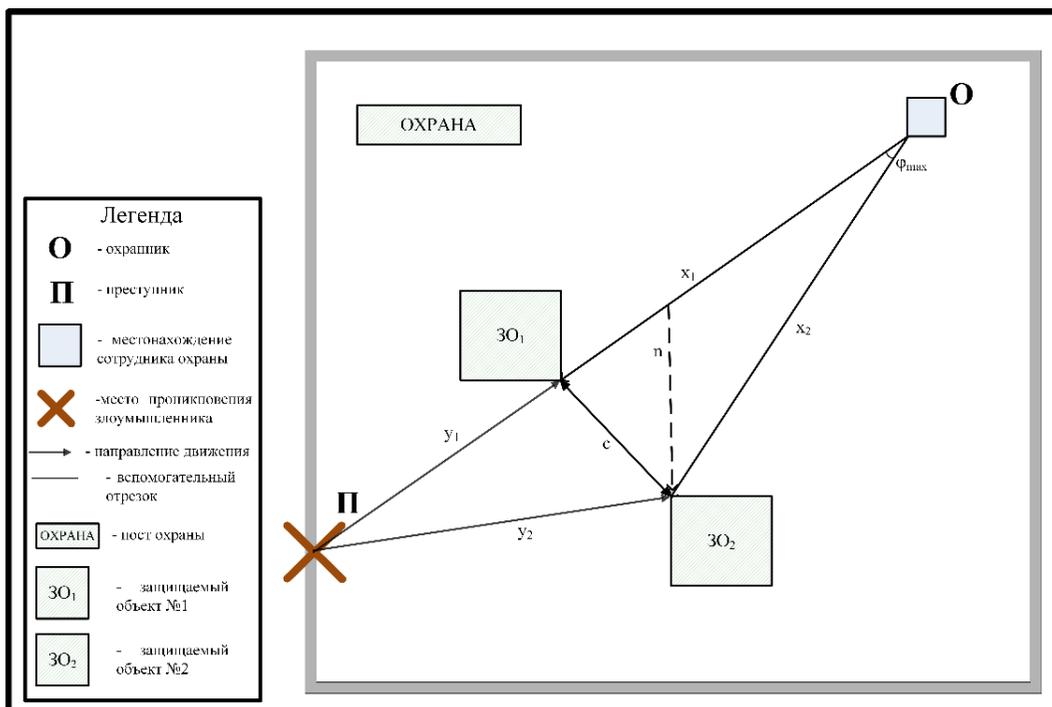


Рис. 2. Схема взаимного расположения преступника, охранника и объекта

Поскольку скорости движения сотрудника охраны и преступника одинаковы, следовательно,

$$v_{охран.} = v_{прест.} = v.$$

Математическая модель движения преступника:

$$t_{прест.} = \frac{y}{v}.$$

$t_{прест.}$ – время движения преступника от момента проникновения на охраняемую территорию.

Математическая модель движения охранника:

$$t_{охран.} = \frac{x}{v}.$$

$t_{охран.}$ – время движения охранника с момента проникновения преступника на охраняемую территорию

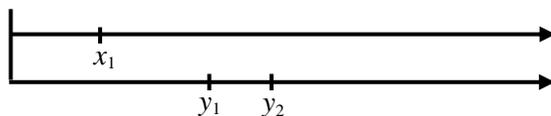
Начальные $t_{0прест.}, t_{0охран.}$ равны 0, т. е.

$$t_{0охран.} = t_{0прест.} = 0.$$

Основными элементами взаимного расположения охранника, преступника и объекта при анализе схем движения охранника являются величины x_1, y_1, y_2 , а именно:

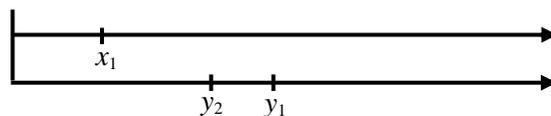
Вариант 1.

1. $y_1 < y_2, x_1 < y_1, x_1 < y_2.$



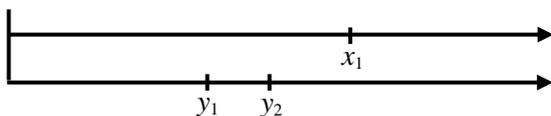
Вариант 2.

2. $y_1 > y_2, x_1 < y_1, x_1 < y_2.$



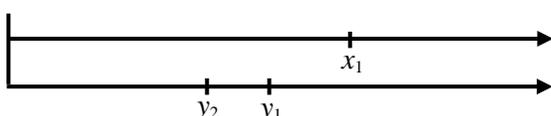
Вариант 3.

3. $y_1 < y_2, x_1 > y_1, x_1 > y_2.$



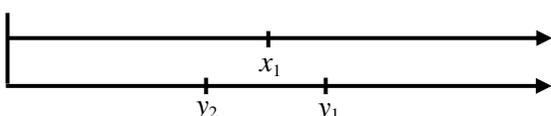
Вариант 4.

4. $y_1 > y_2, x_1 > y_1, x_1 > y_2.$



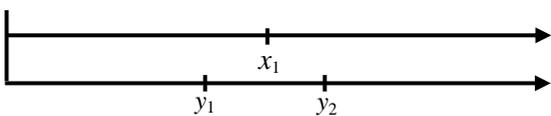
Вариант 5.

5. $y_1 > y_2, x_1 < y_1, x_1 > y_2.$



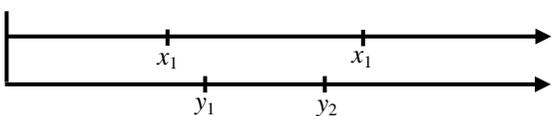
Вариант 6.

6. $y_1 < y_2, x_1 > y_1, x_1 < y_2.$



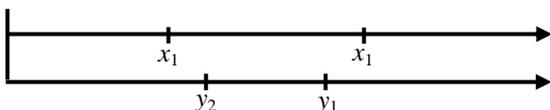
Вариант 7.

7. $y_1 < y_2, x_1 < y_1, x_1 > y_2.$



Вариант 8.

$$8. y_1 > y_2, x_1 > y_1, x_1 < y_2.$$



Варианты 7 и 8 не могут иметь место ввиду противоречия сочетаний x_1, y_1, y_2 , поэтому далее будут рассмотрены варианты 1–6.

Рассмотрим 1-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его раньше возможного прихода преступника в ЗО₁ или ЗО₂.

Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает альтернатива ожидания преступника в ЗО₁ либо движения к ЗО₂.

Поскольку $y_1 < y_2$, то пост охраны передает команду охраннику на его ожидание в ЗО₁ на интервал времени

$$t_{\text{ожид.1}}^{\text{опр.}} = \frac{y_1 - x_1}{v}.$$

При отсутствии прихода преступника в ЗО₁ через время его ожидания охранник получает команду двигаться из ЗО₁ в ЗО₂.

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{\text{ЗО}_2}^{\text{опр.1}} = \frac{y_1 + c}{v}.$$

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{\text{ЗО}_2}^1 = \frac{c}{v}.$$

Рассмотрим 2-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его раньше возможного прихода преступника в ЗО₁ или ЗО₂.

Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает альтернатива ожидания преступника в ЗО₁ либо движения к ЗО₂.

Поскольку $y_1 > y_2$, то пост охраны передает команду охраннику на его ожидание в ЗО₁ на интервал времени

$$t_{\text{ожид.2}}^{\text{опр.}} = \frac{y_2 - x_1}{v}.$$

При приходе преступника в ЗО₂ через время его ожидания охранник получает команду двигаться из ЗО₁ в ЗО₂.

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{\text{ЗО}_2}^{\text{опр.2}} = \frac{y_2 + c}{v}.$$

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{3O_2}^2 = \frac{c}{v}.$$

Рассмотрим 3-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его позже возможного прихода преступника в ЗО₁ или ЗО₂.

Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает необходимость выдвигания охранника к ЗО, а после получения информации о срабатывании сигнализации – направления его из текущего положения к ЗО₁ или ЗО₂.

При приходе преступника в ЗО₂ охранник получает команду двигаться из текущего местоположения к ЗО₂.

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{3O_2}^{exp.3} = \frac{y_2 + n_1}{v}.$$

$$n_1 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 - 2x_2y_2 \cos \varphi_{max}},$$

φ_{max} – угол между сторонами x_1x_2 треугольника x_1x_2c .

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{3O_2}^3 = \frac{n_1}{v}.$$

Рассмотрим 4-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его позже возможного прихода преступника в ЗО₁ или ЗО₂.

Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает необходимость выдвигания охранника к ЗО, а после получения информации о срабатывании сигнализации – направления его из текущего положения к ЗО₁ или ЗО₂.

При приходе преступника в ЗО₂ охранник получает команду двигаться из текущего местоположения к ЗО₂.

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{3O_2}^{exp.4} = \frac{y_2 + n_2}{v}.$$

$$n_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 - 2x_2y_2 \cos \varphi_{max}},$$

φ_{max} – угол между сторонами x_1x_2 треугольника x_1x_2c .

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{3O_2}^4 = \frac{n_2}{v}.$$

Рассмотрим 5-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его позже возможного прихода преступника в ЗО₂.

Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает необходимость выдвигения охранника к ЗО, а после получения информации о срабатывании сигнализации – направления его из текущего положения к ЗО₁ или ЗО₂.

При приходе преступника в ЗО₂ охранник получает команду двигаться из текущего местоположения к ЗО₂.

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{3O_2}^{exp.5} = \frac{y_2 + n_3}{v}.$$

$$n_3 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 - 2x_2y_2 \cos \varphi_{max}},$$

φ_{max} – угол между сторонами x_1x_2 треугольника x_1x_2c .

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{3O_2}^5 = \frac{n_3}{v}.$$

Рассмотрим 6-й вариант. В этом случае охранник по команде с поста охраны движется в направлении ЗО₁ и достигает его раньше возможного прихода преступника в ЗО₂. Ввиду неопределенности в приходе преступника в ЗО₁ или ЗО₂ возникает альтернатива ожидания преступника в ЗО₁ либо движения к ЗО₂.

Охранник получает команду двигаться из текущего местоположения к ЗО₂ при отсутствии прихода преступника в ЗО₁ через время

$$t_{3O_1}^{прест.} = \frac{y_1}{v}.$$

В этом случае суммарное время достижения охранником ЗО₂ равно

$$t_{3O_2}^{exp.6} = \frac{x_1 - y_1 + n_4}{v}.$$

$$n_4 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 - 2x_2y_2 \cos \varphi_{max}},$$

φ_{max} – угол между сторонами x_1x_2 треугольника x_1x_2c .

Учитывая это, разницу времени прихода в ЗО₂ преступника и охранника можно записать в следующем виде:

$$\Delta t_{3O_2}^6 = \left| \frac{y_2}{v} - \left(\frac{x_1 - y_1 + n_4}{v} \right) \right|.$$

Рассмотренные выше варианты объединим в две базовые схемы движения охранника, которые могут быть положены в основу выбора траектории его движения, отвечающей критерию оптимальности.

В дальнейшем будем рассматривать базовые схемы при начальном направлении охранника $O \rightarrow ZO_1$, а преступника $P \rightarrow ZO_2$ в условиях неопределенности $P \rightarrow ZO_1$ или $P \rightarrow ZO_2$.

Случай начального движения охранника $O \rightarrow ZO_2$, а преступника $P \rightarrow ZO_1$ аналогичен предыдущему.

Базовая схема 1 соответствует ранее рассмотренным вариантам 1 и 2 и включает операции (шаги):

- охранник по команде с поста охраны движется в направлении ZO_1 и достигает его раньше возможного прихода преступника в ZO_1 или ZO_2 ;
- охранник ожидает в ZO_1 команды на дальнейшие действия;
- охранник по получении команды движется в направлении ZO_2 на задержание преступника.

Базовая схема 2 соответствует ранее рассмотренным вариантам 3–6 и включает операции (шаги):

- охранник по команде с поста охраны движется в направлении ZO_1 ;
- охранник в процессе движения получает команду на изменение направления с ZO_1 на ZO_2 .

Базовые схемы содержат два прямолинейных участка, длительность которых зависит от информации, получаемой с датчиков охранной сигнализации, контролирующей периметры территории организации и объектов.

Анализ базовых схем движения охранника при использовании начальной стратегии $O \rightarrow ZO_1$ ($O \rightarrow ZO_2$) в условиях неопределенности стратегии преступника $P \rightarrow ZO_1$ или $P \rightarrow ZO_2$ позволяет заключить, что в этом случае обеспечивается критерий оптимальности (а), но не выполняется условие (б).

Учитывая, что разница начальных направлений движения охранника в стратегии $O \rightarrow ZO_1$ отлична от стратегии $O \rightarrow ZO_2$ углом φ_{\max} между ними, независимо от стратегии преступника примем угол φ ($0, \varphi_{\max}$) в качестве переменного параметра при выборе начального направления движения охранника при поиске оптимальной траектории (критерий оптимальности (б)).

В этом случае критерий оптимальности (а) будет обеспечиваться за счет использования базовых схем движения охранника.

С учетом вышеперечисленного рассмотрим математическую модель оптимизации траектории поиска преступника в условиях неопределенности.

Введем отрезки: z_0, z_1 и z_2 – расстояния, являющиеся составной частью пути сотрудника охраны до защищаемых объектов, углы φ, α, γ ; c_1 и c_2 являются частью «с». Данные обозначения продемонстрированы на рис. 3.

Условие оптимальности траектории движения охранника можно записать в виде:

- минимальное время поиска для любого из двух объектов

$$t_{ZO_1}^{exp.}(\varphi, c_x^1, \bar{T}), t_{ZO_2}^{exp.}(\varphi, c_x^2, \bar{T}) \rightarrow \min; \quad (2)$$

- минимальная разница времени поиска между двумя объектами

$$\Delta t_{ZO_1, ZO_2}^{exp.}(\varphi, c_x, \bar{T}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\Delta t_{ZO_1, ZO_2}^{exp.} = \left| t_{ZO_1}^{exp.}(\varphi, c_x^1, \bar{T}) - t_{ZO_1}^{exp.}(\varphi, c_x^2, \bar{T}) \right|, \quad (4)$$

где φ – угол между начальным направлением движения охранника и направлением $O \rightarrow ZO_1$;

c_x – базовая схема управления движением охранника для обоих объектов;

c_x^1 – базовая схема управления движением охранника для ZO_1 ;

c_x^2 – базовая схема управления движением охранника для ZO_2 ;

\vec{T} – вектор, содержащий информацию о взаимном положении преступника, охранника и объектов x_1, x_2, y_1, y_2 и c на момент начала движения.

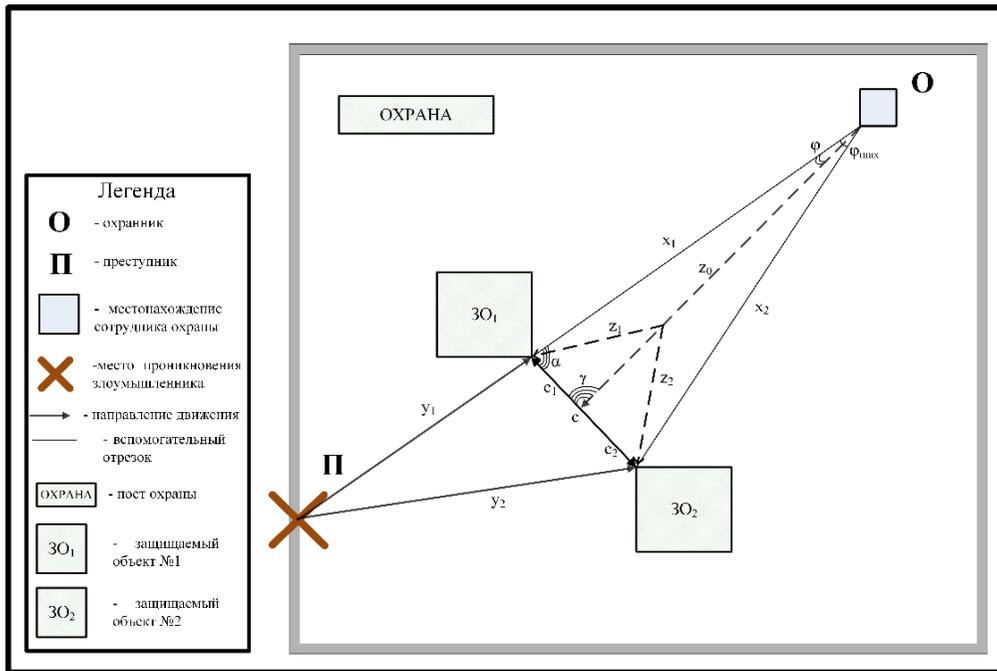


Рис. 3. Схема движения охранника при поиске преступника по информации, поступающей с извещателей охранной сигнализации

Как видно из предыдущих выражений (2–4), мы имеем три оптимизирующих функционала и три управляемых параметра φ , c_x^1 и c_x^2 , причем базовые схемы управления движением охранника для ZO_1 и ZO_2 являются функциями времени движения охранника и времени прихода преступника на объект

$$c_x^1(t^{opr}, t_{ZO_1}^{прест.}), c_x^2(t^{opr}, t_{ZO_2}^{прест.}).$$

Из анализа вариантов движения охранника можем заключить, что выбранные базовые схемы в условиях неопределенности движения преступника к одной из двух целей для фиксированного значения угла φ позволяют обеспечить условие «а» (2).

Рассмотрим условие выполнения «b» (3, 4).

Учитывая, что выражение (3) определяется абсолютной величиной, а также может иметь один минимум по значению φ (рис. 3) при использовании базовых схем движения, примем

$$\Delta L_{3O_1,3O_2}^{exp.}(\varphi, c_x, \bar{T}) = 0.$$

Исходя из принятого допущения, что движение охранника и преступника является равномерным и равным друг другу по скорости, заменим в выражении (4) время движения на расстояния:

$$\Delta L_{3O_1,3O_2}^{exp.}, \Delta L_{3O_1}^{exp.}, \Delta L_{3O_2}^{exp.}.$$

Таким образом, выражение (4) запишем в виде

$$\Delta L_{3O_1,3O_2}^{exp.} = \left| \Delta L_{3O_1}^{exp.}(\varphi, c_x^1, \bar{T}) - \Delta L_{3O_2}^{exp.}(\varphi, c_x^2, \bar{T}) \right|.$$

Из рис. 3 можно заметить

$$\Delta L_{3O_1}^{exp.}(\varphi, c_x^1, \bar{T}) = z_0 + z_1,$$

$$\Delta L_{3O_2}^{exp.}(\varphi, c_x^2, \bar{T}) = z_0 + z_2.$$

Отсюда

$$\Delta L_{3O_1,3O_2}^{exp.} = |z_1 - z_2|, \quad (5)$$

где

$$z_1 = \sqrt{x_1^2 + z_0^2 - 2x_1z_0\cos\varphi}, \quad (6)$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + z_0^2 - 2x_2z_0\cos\varphi_{\max} - \varphi}, \quad (7)$$

$$\varphi_{\max} = \arccos\left(\frac{x_1^2 + x_2^2 - c^2}{2x_1x_2}\right), \quad (8)$$

φ_{\max} – угол между начальными направлениями движения охранника $O \rightarrow 3O_1$ и $O \rightarrow 3O_2$.

Рассмотрим выражение (5) для базовых схем 1 и 2.

Для фиксированного значения φ определяется величина расстояния z_H вдоль начального направления движения из точки O до точки пересечения с отрезком расстояния между объектами «с».

Для треугольников $x_1z_Hc_1$ и $x_1x_2c_2$ по теореме синусов можно заменить

$$z_H = \frac{x_1}{\sin\gamma} \sin\alpha, \quad (9)$$

$$\sin\alpha = \frac{x_2}{c} \sin\varphi_{\max}, \quad (10)$$

$$\gamma = 180 - \varphi - \arcsin\left(\frac{x_2}{c} \sin\varphi_{\max}\right). \quad (11)$$

Заменяя в условиях ранее рассмотренных вариантов x_1 на z_n , определяем для этого условия базовые схемы движения охранника. Условием выбора базовой схемы движения охранника является наличие $z_n > y_1$ или $y_1 > z_n$.

Для базовой схемы 2 можно принять $z_0 = y_1$ или $z_0 = y_2$. В дальнейшем при построении модели будем использовать $z_0 = y_1$.

При использовании $z_0 = y_2$ зависимости будут аналогичными.

Таким образом, заменяя $z_0 = y_1$ в выражениях (6) и (7), получим следующие выражения:

$$z_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 - 2x_1y_1\cos\varphi},$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + y_1^2 - 2x_2y_1\cos(\varphi_{\max} - \varphi)}.$$

С учетом этого условие (5) можно представить уравнением

$$\Delta L_{3O_1,3O_2}^{exp.} = \frac{x_1^2 - x_2^2}{2y_1} + x_2 \cos(\varphi_{\max} - \varphi) - x_1 \cos\varphi = 0. \quad (12)$$

Таким образом, для базовой схемы 2 φ определяется с помощью уравнения (12), z_n – выражения (12), в качестве z_0 принимаем y_1 при $y_1 < y_2$, или y_2 при $y_2 < y_1$; z_1 и z_2 на основе выражений (6) и (7).

Уравнение решается численным путем.

На основании решения уравнения мы получаем время движения охранника для 2 базовой схемы до ЗО:

$$t_{exp.3O}^2 = \frac{z_0 + z_1}{v}. \quad (13)$$

Для базовой схемы 1 с учетом (5)

$$z_1 = z_2 = \frac{c}{2}. \quad (14)$$

z_n с учетом (14) будет определяться как

$$z_n = \frac{c}{2 \sin \varphi} \sin \alpha. \quad (15)$$

$$\sin \alpha = \frac{x_2}{c} \sin \varphi_{\max}.$$

Таким образом, для базовой схемы 1 φ определяется с помощью уравнения (12), z_n – выражения (15), в качестве z_0 принимаем z_n , z_1 и z_2 на основе выражения (14).

Общее время движения охранника для базовой схемы 1 до ЗО:

$$t_{exp.3O}^1 = \frac{2z_n + c}{2v}. \quad (16)$$

Для координации действий охранника, а также интерпретации координат места срабатывания охранной сигнализации периметра, местонахождения охранника и ЗО введем систему координат (рис. 4).

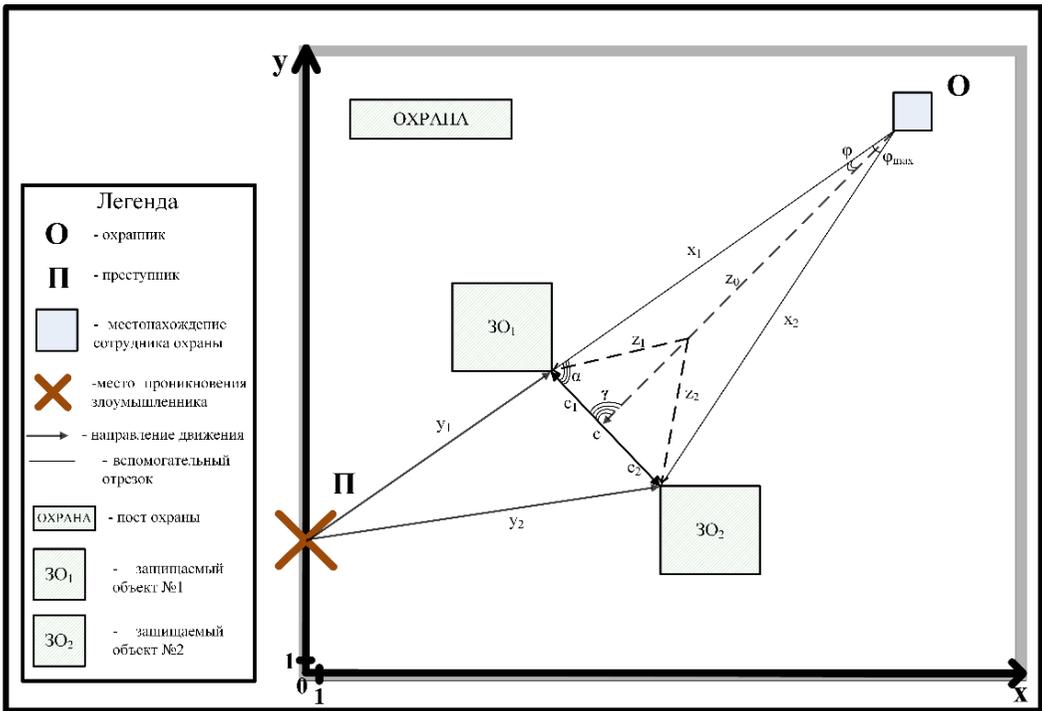


Рис. 4. Взаимное расположение преступника, охранника и ЗО в системе координат Oxy

На рис. 5 представлена функциональная схема системы управления движениями охранника, включающая пункт охраны (пункт управления), датчики обнаружения преступника, расположенные на периметре территории и объектах предприятия, охранника. На схеме отражены информационные потоки между элементами системы и алгоритм расчета параметров управления движениями охранника. Функциональная схема показывает временную связь между работами подсистем.

Описание алгоритма.

1.1–1.2 – обработка полученного сигнала на посту охраны о срабатывании периметрального извещателя и определение координат места проникновения на охраняемую территорию ($x_{\text{прест.}}$, $y_{\text{прест.}}$) и времени срабатывания охранной сигнализации $t_{\text{срабат.}}$.

2.1–2.2 – прием сигнала с передающего устройства сотрудника охраны о его местоположении и его обработка для определения координат охранника ($x_{\text{опр.}}$, $y_{\text{опр.}}$).

3 – обработка информации, полученной на посту охраны, с целью определения ϕ_{max} (8), $\sin \alpha$ (10), y_1 (17), y_2 (18), x_1 (19), x_2 (20), а также минимального времени, через которое преступник должен прийти до ЗО1 или ЗО2 (22), в зависимости от значений y_1 и y_2 :

$$y_1 = \sqrt{(x_{\text{ЗО1}} - x_{\text{прест.}})^2 + (y_{\text{ЗО1}} - y_{\text{прест.}})^2}, \quad (17)$$

$$y_2 = \sqrt{(x_{\text{ЗО2}} - x_{\text{прест.}})^2 + (y_{\text{ЗО2}} - y_{\text{прест.}})^2}, \quad (18)$$

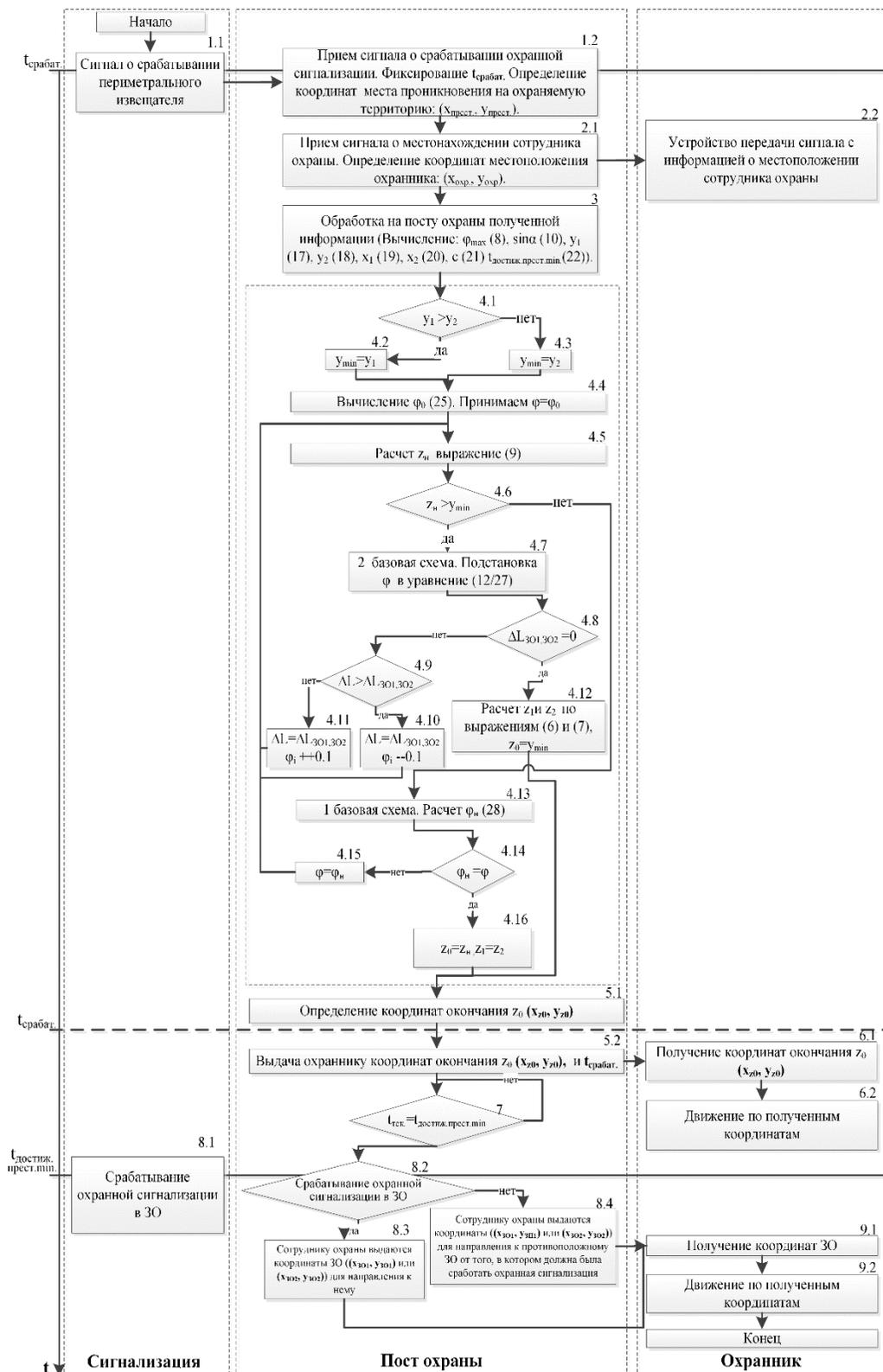


Рис. 5. Функциональная схема работы системы с алгоритмом расчета параметров движения охранника на посту охраны

$$x_1 = \sqrt{(x_{3O_1} - x_{оxp.})^2 + (y_{3O_1} - y_{оxp.})^2}, \quad (19)$$

$$x_2 = \sqrt{(x_{3O_2} - x_{оxp.})^2 + (y_{3O_2} - y_{оxp.})^2}, \quad (20)$$

$$c = \sqrt{(x_{3O_2} - x_{3O_1})^2 + (y_{3O_2} - y_{3O_1})^2}, \quad (21)$$

$$t_{\text{достиж. прест. } 3O_1} = t_{\text{срабат.}} + t_{\text{прест. } 3O_1},$$

где

$$t_{\text{прест. } 3O_1} = \frac{y_1}{v}.$$

$$t_{\text{достиж. прест. } 3O_2} = t_{\text{срабат.}} + t_{\text{прест. } 3O_1},$$

где

$$t_{\text{прест. } 3O_2} = \frac{y_2}{v}.$$

$$t_{\text{достиж. прест. min}} = \begin{cases} t_{\text{достиж. прест. } 3O_1}, & \text{если } t_{\text{достиж. прест. } 3O_1} < t_{\text{достиж. прест. } 3O_2}, \\ t_{\text{достиж. прест. } 3O_2}, & \text{если } t_{\text{достиж. прест. } 3O_2} < t_{\text{достиж. прест. } 3O_1}. \end{cases} \quad (22)$$

4.1–4.12 – определение оптимального угла движения сотрудника охраны на первом прямолинейном участке, а также вычисление z_n и выбор базовой схемы движения охранника.

4.1–4.3 – определение y_{\min} для последующего сравнения с z_n для выбора базовой схемы.

4.4 – расчет начального угла выдвигания ($\varphi = \varphi_0$).

В связи с тем, что одним из основных параметров при движении преступника к защищаемым объектам является удаленность от места проникновения до 3O, возможно использование пропорциональности длин c_1 , c_2 и y_1 , y_2 для определения значения начального угла выдвигания сотрудника охраны. Рассмотрим более подробно применение пропорциональности.

Допустим, что

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{y_1}{y_2}. \quad (23)$$

Поскольку $c_1 + c_2 = c$, выразим c_1 из выражения

$$c_1 = \frac{y_1 c}{y_2 + y_1}. \quad (24)$$

Выразим z_n из треугольника $x_1 c_1 z_0$:

$$z_n = \sqrt{x_1^2 + c_1^2 - 2x_1 c_1 \cos \alpha}, \quad (25)$$

$$\cos \alpha = \frac{x_1^2 + c^2 - x_2^2}{2x_1c}.$$

Модель движения охранника следующая:

1. В случаях, когда $z_n < y_1$ и $z_n < y_2$: $z_1 = c_1, z_2 = c_2, z_0 = z_n$.

Время движения охранника до ЗО

$$t_{\text{exp. } ZO_1} = \frac{z_n + c_1 + (z_n - y_1)}{v},$$

$$t_{\text{exp. } ZO_2} = \frac{z_n + c_2 + (z_n - y_2)}{v}.$$

2. В случаях, когда $z_n > y_1$ или $z_n > y_2$, z_n находится по выражению (25), время достижения охранником ЗО и, соответственно, длина второго прямолинейного участка определяются следующим образом:

$$t_{\text{exp. } ZO_1} = \frac{z_0 + z_1}{v},$$

$$z_1 = \sqrt{x_1^2 + (z_n - y_1)^2 - 2x_1(z_n - y_1)\cos\varphi},$$

$$t_{\text{exp. } ZO_2} = \frac{z_0 + z_2}{v},$$

$$z_2 = \sqrt{x_2^2 + (z_n - y_2)^2 - 2x_2(z_n - y_2)\cos(\varphi_{\max} - \varphi)}.$$

При этом информация о срабатывании сигнализации в ЗО будет получена, когда сотрудник охраны будет двигаться по z_0 , т. е. $z_0 = y_1 - z_n$ либо $z_0 = y_2 - z_n$, в зависимости от $y_1 > y_2$ или $y_2 > y_1$.

Условие (23) в рассмотренных выше случаях позволяет сократить время движения охранника до обоих ЗО, вторые прямолинейные отрезки его движения пропорциональны расстояниям, которые необходимо будет пройти преступнику от места проникновения на охраняемую территорию до ЗО.

Таким образом, в качестве начального значения угла φ_0 (26) принимается угол между z_0 и x_1 , так что окончание z_n лежит на «с» между c_1, c_2 , длины которых определяются согласно (23):

$$\varphi_0 = \arcsin\left(\frac{c_1 \sin \alpha}{z_n}\right), \quad (26)$$

где c_1 определяется по выражению (24), $\sin \alpha$ по (8), а z_n по (25).

4.5 – расчет z_n по выражению (9).

4.6 – сравнение z_n с y_{\min} для выбора либо первой базовой схемы (п. 4.8), если $z_n > y_{\min}$, либо второй (п. 4.7), когда $z_n < y_{\min}$.

4.7–4.11 – перебор значений φ с шагом 0.1 и проверка выполнения уравнения (12) в случае, когда $y_1 < y_2$, и (27), когда $y_1 > y_2$, с расчетом для каждого φ_i z_n , для проверки п. 4.6, и при необходимости уход на другую базовую схему.

$$\Delta L_{ZO_1, ZO_2}^{\text{exp.}} = \frac{x_1^2 - x_2^2}{2y_2} + x_2 \cos(\varphi_{\max} - \varphi) - x_1 \cos \varphi = 0. \quad (27)$$

4.12 – в том случае, когда выполняются уравнения (12/27), п. 4.8. алгоритма, цикл завершается и по второй базовой схеме определяется z_0, z_1, z_2 : в качестве z_0 принимаем y_1 ($y_1 < y_2$) или y_2 ($y_1 > y_2$), z_1 и z_2 рассчитаем на основе выражений (6) и (7), заменяя $z_0 = y_1$ ($y_1 < y_2$) или $z_0 = y_2$ ($y_1 > y_2$).

4.13–4.15 – проверка вычисленного φ путем расчета φ_n (28) и его сравнение с φ . В случае неравенства происходит повторный расчет z_n с $\varphi = \varphi_n$. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет выполняться условие 4.14 алгоритма.

$$\varphi_n = \arcsin\left(\frac{c \sin \alpha}{2z_n}\right). \quad (28)$$

4.16 – при выполнении условия 4.14 алгоритма цикл завершается и по первой базовой схеме определяется z_0, z_1, z_2 : в качестве z_0 принимаем z_n , z_1 и z_2 определяем на основе выражения (14).

5.1 – определение координат окончания z_0 (x_{z_0}, y_{z_0}) происходит на основе φ и z_0 при помощи системы координат, представленной на рис. 4.

5.2 – передача координат окончания z_0 (x_{z_0}, y_{z_0}) и $t_{\text{срабат. охранника}}$.

6.1–6.2 – движение сотрудника охраны на основе полученных координат.

7 – проверка наступления $t_{\text{достиг. прест. min}}$.

После наступления $t_{\text{достиг. прест. min}}$ возможны два варианта действия поста охраны:

1. 8.1–8.3 – получение сигнала о срабатывании охранной сигнализации на посту охраны в ЗО и дальнейшая передача охраннику команды на движение к защищаемому объекту ($(x_{z_{01}}, y_{z_{01}})$ или $(x_{z_{02}}, y_{z_{02}})$), в котором произошло срабатывание охранной сигнализации.

2. 8.1–8.2, 8.4 – отсутствие сигнала о срабатывании охранной сигнализации на посту охраны в ЗО и дальнейшая передача охраннику команды на движение к противоположному защищаемому объекту ($(x_{z_{01}}, y_{z_{01}})$ или $(x_{z_{02}}, y_{z_{02}})$) от того, в котором должно было произойти срабатывание охранной сигнализации.

9.1–9.2 – движение сотрудника охраны на основе полученных координат.

Проведем оценку работоспособности и эффективности алгоритма, обеспечивающего работу системы управления движениями сотрудника охраны.

Оценку проведем для следующих исходных данных:

– территория организации, изображенная на рис. 6, представляет собой квадрат площадью 1 км^2 ;

– положение объектов на территории примем в координатах x и y , соответственно $ЗО_1$ (280, 520), $ЗО_2$ (720, 240);

– положение сотрудника охраны «О» (640, 800);

– скорость охранника и преступника составляет $1,7 \text{ м/с}$.

Вариантами в оценке являются координаты точек нарушения периметра преступником: I «П₁» (0, 300), II «П₂» (440, 0), III «П₃» (80, 1000). Каждый вариант имеет подварианты: а – П → ЗО₁, б – П → ЗО₂.

В таблице представлены результаты работы системы управления для вышеперечисленных вариантов.

В первом столбце таблицы рассчитываются φ_{max} , $\sin \alpha$, y_1 , y_2 , x_1 , x_2 (3-й блок алгоритма). В скобках указаны формулы расчета величин, приведенные выше в работе.

Во втором столбце таблицы определяется базовая схема, рассчитываются параметры: φ , z_0 , z_1 и z_2 (4.1–4.16 блоки алгоритма).

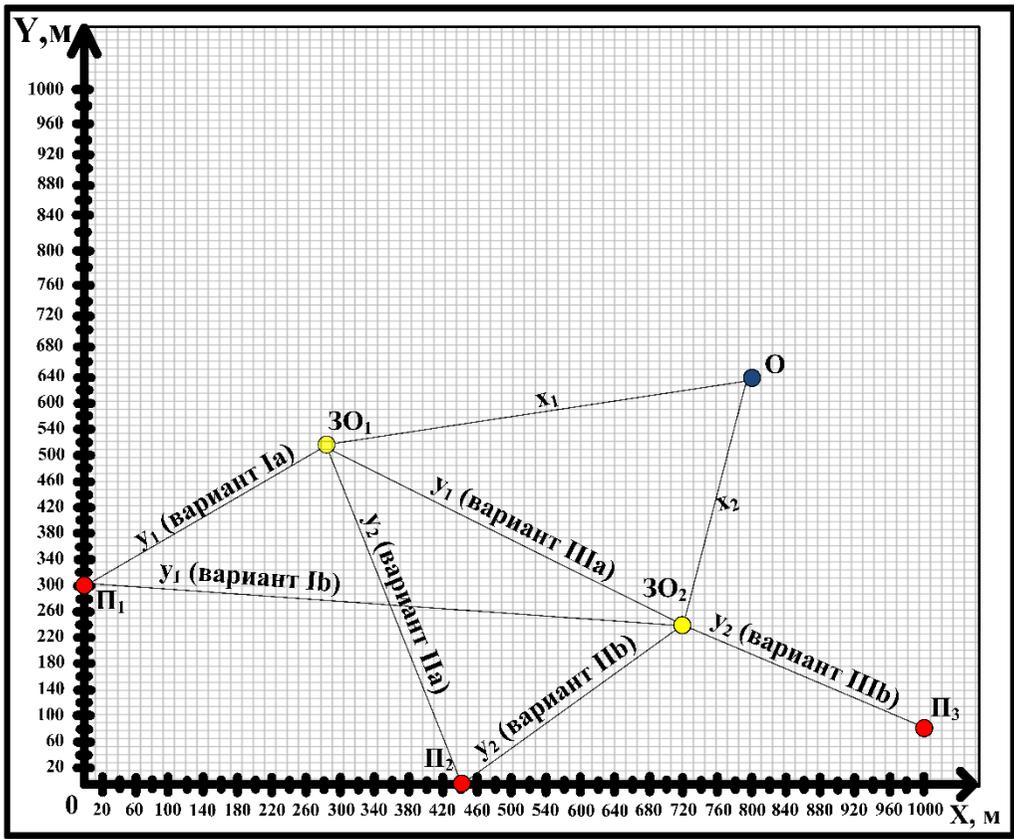


Рис. 6. Возможные варианты движения преступника к цели

В третьем столбце таблицы представлена информация расчета координат окончания z_0 , которые выдаются охраннику (5.1–5.2, 6.1–6.2 блоки алгоритма).

В четвертом столбце таблицы представлена информация по расчету координат завершения движения сотрудника охраны после принятия решения на посту охраны, которые далее выдаются охраннику (7, 8.1–8.4, 9.1–9.2 блоки алгоритма).

Результаты работы системы управления

Вариант	Расчетные параметры алгоритма по блокам			
	1	2	3	4
I (a)	$\varphi_{\max} = 60.24^\circ$ (8), $\sin \alpha = 0.94$ (10), $y_1 = 488$ м (17), $y_2 = 729$ м (18), $x_1 = 456$ м (19), $x_2 = 565$ м (20), $c = 521$ м (21)	1-я базовая схема, $\varphi = \varphi_n = 33.69^\circ$ (27) $z_0 = z_n = 442.12$ м (9), $z_1 = z_2 = 260.5$ м (14)	(500,380)	Коорд. 3O ₁ (280,520)
I (b)				Коорд. 3O ₂ (720,240)
II (a)	$\varphi_{\max} = 60.24^\circ$ (8), $\sin \alpha = 0.94$ (10),	2-я базовая схема, $\varphi = 36.53^\circ$, $\Delta L = 0.07$ (27)	(537,446)	Коорд. 3O ₁ (280,520)

Вариант	Расчетные параметры алгоритма по блокам			
	1	2	3	4
II (b)	$y_1=544$ м (17), $y_2=369$ м (18) $x_1=456$ м (19), $x_2=565$ м (20), $c=521$ м (21)	$z_0=y_{\min}=369$ м, $z_1=z_2=271.4$ м (6,7)		Коорд. ЗО ₂ (720,240)
III (a)	$\varphi_{\max}=60.24^\circ$ (8), $\sin\alpha=0.94$ (10), $y_1=773$ м (17), $y_2=322$ м (18)	2-я базовая схема, $\varphi=39,07^\circ$, $\Delta L=0.01$ (27), $z_0=y_{\min}=322$ м, $z_1=z_2=289.1$ м (6,7)	(563,488)	Коорд. ЗО ₁ (280,520)
III (b)	$x_1=456$ м (19), $x_2=565$ м (20), $c=521$ м (21)			Коорд. ЗО ₂ (720,240)

Ниже приведем оценку эффективности, включающую в себя:

- расчет разницы времени между приходами сотрудника охраны и преступника к ЗО по предложенному алгоритму системы управления;
- расчет разницы времени между приходами сотрудника охраны и преступника, когда первоначально сотрудник охраны и преступник направляются к разным ЗО (О→ЗО₂ и П→ЗО₁ или О→ЗО₁ и П→ЗО₂), а далее охранник меняет траекторию движения на основе дополнительной информации (о срабатывании (отсутствии срабатывания) охранного извещателя в ЗО) (варианты алгоритмов управления движением охранника рассмотрены выше);
- сравнение результатов.

Для 1-го варианта:

а) на основе результатов работы системы управления:

$$\Delta t_{3O_1}^1 = \left| \frac{488 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{442.12 \text{ м} + 260.5 \text{ м} + (488 \text{ м} - 442.12 \text{ м})}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 153.2 \text{ с},$$

$$\Delta t_{3O_2}^1 = \left| \frac{729 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{442.12 \text{ м} + 260.5 \text{ м} + (488 \text{ м} - 442.12 \text{ м})}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 11.9 \text{ с};$$

б) в случае, если первоначально О→ЗО₂ и П→ЗО₁:

$$\Delta t_{3O_1}^{1'} = \left| \frac{488 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{488 \text{ м} + 474 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 278.8 \text{ с};$$

в случае, если первоначально О→ЗО₁ и П→ЗО₂:

$$\Delta t_{3O_2}^{1'} = \left| \frac{729 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{456 \text{ м} + 521 \text{ м} + (488 \text{ м} - 456 \text{ м})}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 164.7 \text{ с};$$

в) эффективность использования (разница во времени между приходами сотрудника охраны и преступника к ЗО) разработанной системы для первого варианта:

$$\Delta t_{3O_1}^{1'-1} = 125.6 \text{ с},$$

$$\Delta t_{3O_2}^{1'-1} = 152.8.$$

Для 2-го варианта:

а) на основе результатов работы системы управления:

$$\Delta t_{3O_1}^2 = \left| \frac{544 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{369 \text{ м} + 271,4 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 56.7 \text{ с},$$

$$\Delta t_{3O_2}^2 = \left| \frac{369 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{369 \text{ м} + 271,4 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 159.6 \text{ с};$$

б) в случае, если первоначально $O \rightarrow 3O_2$ и $\Pi \rightarrow 3O_1$:

$$\Delta t_{3O_1}^{2'} = \left| \frac{544 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{544 \text{ м} + 507 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 298.2 \text{ с};$$

в случае $O \rightarrow 3O_1$ и $\Pi \rightarrow 3O_2$:

$$\Delta t_{3O_2}^{2'} = \left| \frac{369 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{369 \text{ м} + 498 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 292.9 \text{ с};$$

в) эффективность использования (разница во времени между приходами сотрудника охраны и преступника к 3O) разработанной системы для второго варианта:

$$\Delta t_{3O_1}^{2'-2} = 241.5 \text{ с},$$

$$\Delta t_{3O_2}^{2'-2} = 133.3 \text{ с}.$$

Для 3-го варианта:

а) на основе результатов работы системы управления:

$$\Delta t_{3O_1}^3 = \frac{773 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{322 \text{ м} + 289,1 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) = 95.3 \text{ с},$$

где сотрудник охраны придет раньше преступника к 3O₁;

$$\Delta t_{3O_2}^3 = \left| \frac{322 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{322 \text{ м} + 289,1 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 170.1 \text{ с};$$

б) в случае, если первоначально $O \rightarrow 3O_2$ и $\Pi \rightarrow 3O_1$:

$$\Delta t_{3O_1}^{3'} = \left| \frac{773 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{332 \text{ м} + 407 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 20 \text{ с},$$

где сотрудник охраны придет раньше преступника к 3O₁;

в случае, если первоначально $O \rightarrow 3O_1$ и $\Pi \rightarrow 3O_2$:

$$\Delta t_{3O_2}^{2'} = \left| \frac{322 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} - \left(\frac{322 \text{ м} + 492 \text{ м}}{1.7 \text{ м/с}} \right) \right| = 289.4 \text{ с};$$

в) эффективность использования (разница во времени между приходами сотрудника охраны и преступника к ЗО) разработанной системы для третьего варианта:

$$\Delta t_{3O_1}^{3-3'} = 75.3 \text{ с},$$

$$\Delta t_{3O_2}^{3'-3} = 119.3 \text{ с}.$$

Таким образом, можно сделать вывод: разработанный алгоритм значительно уменьшает разницу времени между приходами сотрудника охраны и преступника к ЗО по сравнению с другими схемами движения охранника в условиях неопределенности знания цели нарушителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравченко А.С., Сумин В.И.* Алгоритм информационного процесса расчета кратчайшего пути проникновения через систему охраны объекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – № 7(8). – С. 177–179.
2. *Тельный А.В., Черников Р.С.* Алгоритм обработки тревожных извещений объектовых средств охранной сигнализации для снижения уровня ложных срабатываний // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 140–162.
3. *Жуков А.В.* Разработка алгоритма разбиения территории охраняемого объекта и площади зданий в зависимости от расположения элементов системы физической защиты // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 9(10). – С. 13–25.
4. *Боровский А.С., Тарасов А.Д.* Приближенная оценка защищенности потенциально опасных объектов. Структурные параметры защищенности объектов // Программный продукт и системы. – 2013. – № 3. – С. 235–243.
5. *Вергейчик А.В., Кушир В.П.* Моделирование систем физической защиты // Доклады ТУ-СУР. – 2008. – Т. 1, № 2(18). – С. 7–8.
6. *Меньших В.В., Калков Д.Ю.* Оценка своевременности прибытия группы задержания на охраняемый объект по сигналу тревоги // Вестник Воронежского института МВД России. – 2014. – №3. – С. 66–72.
7. *Зенов А.Ю., Мясникова Н.В.* Применение нейросетевых алгоритмов в системах охраны периметра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 3 (23). – С. 15–24.
8. *Цимбал В.А., Андреев А.С., Ефремов А.С.* Модель многоканальной системы охранной сигнализации на основе несетевых технологий // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018 (2). – С. 73–79.
9. *Царькова Е.Г.* Применение методов искусственного интеллекта для повышения эффективности охранных систем УИС // Актуальные вопросы информатизации Федеральной службы исполнения наказаний на современном этапе развития уголовно-исполнительной системы: сборник круглого стола. – Тверь: ФКУ НИИИТ ФСИН России, 2020. – С. 120–130.
10. *Воеводин С.В., Духан А.Е., Духан Е.И., Звежинский С.С.* Применение нейронных сетей при обработке информации в сигнализационных средствах обнаружения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 9. – С. 11–15.
11. *Цырко С.О.* Технология распознавания маршрутов злоумышленников при помощи искусственного интеллекта на базе нейросетей // Перспективы, организационные формы и эффективность развития сотрудничества российских и зарубежных вузов: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 527–534.
12. *Звежинский С.С., Духан А.Е., Духан Е.И., Парфенцев И.В.* Интеллектуализация принятия решений в системах физической защиты объектов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12, № 1. – С. 40–43.
13. *Меньших В.В., Калков Д.Ю.* Автоматная модель действий злоумышленника на охраняемом объекте // Вестник Воронежского института МВД России. – 2014. – № 2. – С. 196–200.

14. *Ворожейкин В.Н.* Задача обеспечения безопасности объектов на основе комплексного применения технических средств и подразделений физической охраны // Актуальные проблемы информационной безопасности. Теория и практика использования программно-аппаратных средств. Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – С. 89–94.
15. *Звездинский С.С., Парфенцев И.В., Бережная М.Н.* Эффективность автоматизированного поиска наземных целей с помощью мобильного комплекса обнаружения // Радиотехника. – 2018. – № 2. – С. 46–48.
16. *Ракитов А.И., Бондяев Д.А., Романов И.Б., Егерев С.В., Щербачков А.Ю.* Системный анализ и аналитические исследования: руководство для профессиональных аналитиков. – М., 2009. – 448 с.

Статья поступила в редакцию 6 марта 2021 г.

A STRATEGY CHOOSING METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF A GUARD MOVEMENT WHILE SEARCHING FOR A CRIMINAL UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

V. Vorozheykin, A. Baranov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The work is devoted to the issue of the complex use of technical means and physical security forces while ensuring the safety of several objects located in the controlled area. The method proposed is for solving the problem of choosing a strategy for searching for a criminal by a security officer while minimizing the time of knowing the direction of movement of the first one to one of the two objects. The proposed method is based on a criminal search strategy implemented by the security guard's movement control system, which includes two straight sections of their path, which are formed based on information from the security alarm sensors. A mathematical model has been developed for calculating the parameters of controlling the movements of a guard and an algorithm for the control system operation, which makes it possible to implement an optimal search strategy depending on the location of objects, a guard, a criminal, and information from technical means of protection.*

Keywords: *object, territory, criminal, security guard, strategy, technical means of protection, mathematical model, algorithm.*

REFERENCES

1. *Kravchenko A.S., Sumin V.I.* Algorithm of informational process of calculation of the shortest way of penetration through projected system of protection // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 7 (8). Pp. 177–179 (In Russian).
2. *Telny A.V., Chernikov R.S.* Processing alarm notifications algorithm of security system object equipment for reducing the false alarms level // *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*. 2019. No. 4. Pp. 140–162 (In Russian).
3. *Zhukov A.V.* Development of an algorithm for dividing the territory of the protected object and the area of buildings depending on the location of the elements of the physical protection system // *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2016. No. 9 (10). Pp. 13–25 (In Russian).

*Vladimir Vorozheykin, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander Baranov, Student.*

4. Borovskiy A.S., Tarasov A.D. Approximate valuation of potentially dangerous objects security. Object security structural parameters // *Programmnyj produkt i sistemy*. 2013. No. 3. Pp. 235–243 (In Russian).
5. Vergeichik A.V., Kushnir V.P. Modeling of system protection // *Doklady TUSUR*. 2008. Vol. 1. No. 2 (18). Pp. 7–8 (In Russian).
6. Menshikh V.V., Kalkov D.Yu. Evaluation timely arrival of the group of detention to a protected object alarm // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2014. No. 3. Pp. 66–72 (In Russian).
7. Zenov A.Yu., Myasnikova N.V. Application of neural network algorithms in the perimeter security system // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2012. No. 3(23). Pp. 15–24 (In Russian).
8. Tsimbal V.A., Andreev A.S., Efremov A.S. Model of a multichannel security alarm system based on information technologies // *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*. 2018. No. 2. Pp. 73–79 (In Russian).
9. Tsarkova E.G. Application of artificial intelligence methods to improve the efficiency of security systems in the penal system // *Aktual'nye voprosy informatizacii Federal'noj sluzhby ispolneniya nakazanij na sovremennom etape razvitiya ugolovno-ispolnitel'noj sistemy: sbornik kruglogo stola*. Tver, 2020. Pp. 120–130 (In Russian).
10. Voevodin S.V., Dukhan A.E., Dukhan E.I., Zvezhinsky S.S. Application of neural networks in information processing in signaling detection tools // *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. 2015. Vol. 9. No. 9. Pp. 11–15 (In Russian).
11. Tsvyrko S.O. Technology for recognizing the routes of attackers using artificial intelligence based on neural networks // *Perspektivy, organizacionnye formy i effektivnost' razvitiya sotrudnichestva rossijskih i zarubezhnyh vuzov. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. 2018. Pp. 527–534 (In Russian).
12. Zvezhinsky S.S., Dukhan A.E., Dukhan E.I., Parfentsev I.V. Decision intellectualization in object physical protection systems // *T-Comm: Telekommunikacii i transport*. 2018. Vol. 12. No. 1. Pp. 40–43 (In Russian).
13. Menshikh V.V., Kalkov D.Yu. Automaton model of the actions of intruders in the protected objects // *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii*. 2014. No. 2. Pp. 196–200 (In Russian).
14. Voroszhaykin V.N. The task of ensuring the security of facilities based on the integrated use of technical means and physical security units // Actual problems of information security // *Teoriya i praktika ispol'zovaniya programmno-apparatnyh sredstv. Materialy XII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Samara, Samara State Technical University, 2019. Pp. 89–94 (In Russian).
15. Zvezhinsky S.S., Parfentsev I.V., Berezhnaya M.N. Efficiency of ground targets automated search by mobile detection complex // *Radiotekhnika*. 2018. No. 2. Pp. 46–48 (In Russian).
16. Rakitov A.I., Bondyaev D.A., Romanov I.B., Egerev S.V., Shcherbakov A.Yu. Sistemnyj analiz i analiticheskie issledovaniya: rukovodstvo dlya professional'nyh analitikov [Systems Analysis and Analytical Research: A Guide for Professional Analysts]. – M., 2009. – 448 pp. (In Russian).

УДК 681.5

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ ДВУХКАНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НЕОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАСТИНЫ*

Н.А. Ильина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача построения замкнутой оптимальной по быстродействию системы управления линейным объектом с распределенными параметрами параболического типа с двумя сосредоточенными внутренними управлениями по мощности источников тепла, возбуждаемых в электромагнитном поле индуктора. Предлагаемый способ синтеза оптимальных регуляторов использует альтернансный метод расчета оптимальных программных управлений для каждого из управляющих воздействий. Приводится пример построения квазиоптимальной по быстродействию системы управления процессом периодического индукционного нагрева металлической заготовки с постоянными значениями коэффициентов обратной связи, рассчитанными для наиболее характерного начального пространственного температурного распределения.

Ключевые слова: оптимальное управление, синтез оптимального регулятора, двухканальное управление, альтернансный метод, задача полубесконечной оптимизации, индукционный нагрев.

Введение

Проблема синтеза замкнутых систем оптимального управления с обратными связями является значительно более сложной, нежели решение задач оптимального программного управления. Классические методы [1–3] построения алгоритмов и систем управления динамическими объектами разработаны применительно к моделям управляемых процессов с одним управляющим воздействием. В связи с этим возникает актуальная задача синтеза управляющих алгоритмов в условиях многоканального управления. Большинство известных результатов относится к синтезу объектов с сосредоточенными параметрами, в то время как задача синтеза применительно к объектам с распределенными параметрами оказывается качественно более сложной главным образом из-за бесконечного порядка объекта управления.

Постановка задачи оптимального управления

В данной работе в качестве объекта управления рассматривается процесс индукционного нагрева металлической заготовки с двумя сосредоточенными управляющими воздействиями $u_1(t)$ и $u_2(t)$ по мощности внутреннего тепловыделения на обеих поверхностях нагреваемой неограниченной пластины.

Ильина Наталья Андреевна, аспирантка.

Подобная постановка задачи была предложена и рассмотрена в работе [4], где объект описывается в зависимости от пространственной координаты $x \in [0, R]$ и времени $t \in [0, t_{\text{кон}}]$ решением линейного одномерного неоднородного уравнения теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} + W_1(x)u_1(t) + W_2(x)u_2(t), \quad (1)$$

$$Q(x, 0) = Q_0 = \text{const}, \quad Q_0 \geq 0 \quad (2)$$

с типовыми граничными условиями для модели объекта (1)–(2) вида

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial Q(0, t)}{\partial x} &= Q_{cp}(t) - \alpha_1 Q(0, t), \quad t > 0; \\ \lambda \frac{\partial Q(R, t)}{\partial x} &= Q_{cp}(t) - \alpha_2 Q(R, t), \quad t > 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности нагреваемого материала;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 α_1, α_2 – заданные теплофизические постоянные;
 $Q_{cp}(t)$ – температура окружающей среды, принимается равной Q_0 .

Функции пространственного распределения внутренних электромагнитных источников тепла $W_1(x), W_2(x)$ определяются соотношениями:

$$W_1(\xi, x) = \frac{\text{ch}\left(\sqrt{2\xi} \frac{x}{R}\right) - \cos\left(\sqrt{2\xi} \frac{x}{R}\right)}{\text{sh}(\sqrt{2\xi}) - \sin(\sqrt{2\xi})} \sqrt{2\xi}; \quad W_2(\xi, x) = W_1(\xi, R - x), \quad (4)$$

где ξ – характерный параметр, вычисляемый по формулам:

$$\xi = \frac{R\sqrt{2}}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}.$$

Здесь δ – глубина проникновения тока в металл;
 ω – частота питающего тока;
 σ – электропроводность нагреваемого материала;
 μ – абсолютная магнитная проницаемость [5].

Начальное температурное распределение Q_0 согласно (2) принимается равномерным по всему объему пластины.

На предельные значения сосредоточенных управляющих воздействий $u_1(t), u_2(t)$ накладываются следующие ограничения:

$$\begin{aligned} 0 \leq u_1(t) &\leq u_{1\text{max}}; \\ 0 \leq u_2(t) &\leq u_{2\text{max}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для дальнейшей постановки задачи управления необходимо определить критерий оптимальности и указать требования к конечному температурному состоянию объекта.

В качестве критерия оптимальности выступает общее время процесса нагрева в виде следующего интегрального функционала качества:

$$I = \int_0^{t_{\text{кон}}} dt = t_{\text{кон}} \rightarrow \min_{u_1(t), u_2(t)}, \quad (6)$$

где $t_{\text{кон}}$ – длительность процесса нагрева.

Требование к конечному температурному состоянию в момент $t_{\text{кон}}$ окончания процесса управления, как правило, связано с соблюдением допуска на отклонение ε_0 конечной температуры $Q(x, t_{\text{кон}})$ от требуемого температурного распределения $Q^*(x)$ по толщине пластины $Q^*(x) = Q^* = \text{const} > Q_0$ и может быть записано в виде следующего неравенства [10, 11]:

$$\max_{x \in [0, R]} |Q(x, t_{\text{кон}}) - Q^*| \leq \varepsilon_0 \quad (7)$$

для всех $x \in [0, R]$.

В рассматриваемой задаче оптимального по быстродействию управления требуется определить такие управляющие воздействия $u_1^*(t), u_2^*(t)$, которые подчиняются заданным ограничениям (5) и переводят объект управления (1)–(4) в требуемое конечное состояние (7) за минимально возможное время согласно критерию оптимальности (6).

Алгоритмы оптимального по быстродействию программного управления с двумя сосредоточенными управляющими воздействиями

Применительно к базовому критерию быстродействия оптимальные программные управления $u_1^*(t)$ и $u_2^*(t)$ объектом (1)–(4) следует искать в классе релейных функций, попеременно принимающих на промежутке $t \in [0, t_{\text{кон}}]$ только свои предельно допустимые значения в (5) [6–10]. Тем самым $u_1^*(t), u_2^*(t)$ определяются априори с точностью до числа N_{01}, N_{02} и длительностей $\Delta_{1i}^{(N_{01})}, i = \overline{1, N_{01}}, \Delta_{2i}^{(N_{02})}, i = \overline{1, N_{02}}$ интервалов постоянства $u_1^*(t), u_2^*(t)$ соответственно.

В работе [4] было найдено пространственное распределение температурного состояния $Q(x, \bar{\Delta})$ в конце процесса управления, задаваемое в виде явной зависимости от $\Delta_{1i}^{(N_{01})}, \Delta_{2i}^{(N_{02})}, i = 1, 2$ соответствующими решениями уравнений объекта с фиксированным начальным состоянием Q_0 для воздействий $u_1^*(t), u_2^*(t)$ в типичном двухинтервальном режиме нагрева при $N_{01} = N_{02} = N_0 = 2$ (рис. 1):

$$Q(x, \bar{\Delta}) = Q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \left(\cos \left(\eta_n \frac{x}{R} \right) + \frac{B i_1}{\eta_n} \sin \left(\eta_n \frac{x}{R} \right) \right) \times \left[\bar{W}_{1n} u_{1\text{max}} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{12}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)})} \right) + \bar{W}_{2n} u_{2\text{max}} \left(e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{22}^{(2)}} - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} (\Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)})} \right) \right], \quad (8)$$

где $\bar{\Delta} = (\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)})$; $\mu_n^2 = \frac{a}{R^2} \eta_n^2$ – собственные числа;

$\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения:

$$\operatorname{tg} \eta_n = \frac{Bi_1 + Bi_2}{\eta_n - \frac{Bi_1 \cdot Bi_2}{\eta_n}}, \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 R}{\lambda}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 R}{\lambda};$$

Bi_1, Bi_2 – безразмерный критерий Био, характеризующий уровень тепловых потерь с поверхностью пластины в окружающую среду с температурой $Q_{cp} = Q_0$ согласно (2);

R – толщина пластины; нормирующие множители E_n вычисляются по формуле:

$$E_n^2 = \frac{\lambda^2}{a} R \left[\left(1 - \left(\frac{Bi_1}{\eta_n} \right)^2 \right) \frac{\eta_n + \sin \eta_n \cos \eta_n}{2\eta_n} + \left(\frac{Bi_1}{\eta_n} \right)^2 + \frac{Bi_1}{2\eta_n^2} (1 - \cos 2\eta_n) \right].$$

Моды функций (4) $\bar{W}_{1n}, \bar{W}_{2n}$ определяются следующим образом :

$$\bar{W}_{1n} = \int_0^R W_1(\xi, x) \cos\left(\mu_n \frac{x}{R}\right) dx; \quad \bar{W}_{2n} = \int_0^R W_2(\xi, x) \cos\left(\mu_n \frac{x}{R}\right) dx.$$

В условиях $N_0 = 2$ требуемая величина ε_0 в (7) должна удовлетворять требованию [11] $\varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(2)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(1)}$, где $\varepsilon_{\min}^{(i)}, i = 1, 2$ – предельно достижимая точность нагрева в классе i -интервальных управляющих воздействий релейной формы.

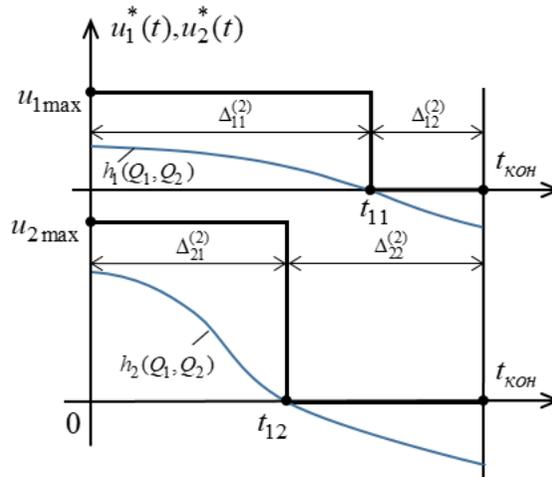


Рис. 1. Оптимальное по быстродействию двухканальное двухинтервальное управление по мощности внутренних источников тепла

В таком случае рассматриваемая задача быстродействия сводится при требованиях (7) к задаче полубесконечной оптимизации следующего вида [10, 11]:

$$I(\bar{\Delta}) = \Delta_{11}^{(2)} + \Delta_{12}^{(2)} = \Delta_{21}^{(2)} + \Delta_{22}^{(2)} \rightarrow \min_{\Delta_{si}^{(N_0)} \in \Omega}; \quad (9)$$

$$\Omega = \left\{ \Delta_{si}^{(2)} : 0 < \Delta_{si}^{(2)} < \infty; s = 1, 2; i = 1, 2 \right\},$$

$$\Phi(\bar{\Delta}) = \max_{x \in [0, R]} |Q(x, \bar{\Delta}) - Q^*| \leq \varepsilon_0, \quad \varepsilon_0 > 0. \quad (10)$$

Далее будет рассматриваться типовая задача с предельно достижимой в классе двухинтервальных ($N_0 = 2$) управляющих воздействий релейной формы (рис. 1) абсолютной точностью $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ [10, 11].

Решение задачи полубесконечной оптимизации (9)–(10) сводится по схеме альтернансного метода [10, 11] к решению системы уравнений, определенной в [4] в соответствии с формой кривой конечного температурного распределения (рис. 3):

$$\begin{aligned} Q(0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ Q(x_2^0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ Q(x_3^0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}) - Q^* &= -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ Q(x_4^0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}) - Q^* &= \varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial Q(x_j^0, \Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)})}{\partial x} &= 0, \quad j = 2, 3, 4, \end{aligned} \quad (11)$$

относительно неизвестных значений $\bar{\Delta}$ длительностей интервалов постоянства программного управления $u_1^*(t), u_2^*(t)$, величины $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и координат $x_j^0, j = 2, 3, 4$ точек достижения предельно допустимых отклонений $Q(x, \bar{\Delta})$ от Q^* .

Синтез системы двухканального управления

Синтез оптимального регулятора по общему методу фазового пространства [10, 12] приводит к вполне реализуемой структуре замкнутой системы с неполным измерением температурного состояния объекта $Q(\tilde{x}_j, t) = Q_j(t), j = \overline{1, k}$ в некоторых k отдельных точках $\tilde{x}_j \in [0, R]$ пространственной области его распределения и может быть выполнен путем выбора функции переключения $h_s(\bar{Q}), s = 1, 2$ каждого из управляющих воздействий $u_1^*(t), u_2^*(t)$ в форме линейной комбинации k сигналов обратных связей по измеряемым величинам $Q_j, j = \overline{1, k}$ с коэффициентами передачи ρ_{sj} , зависящими от начального состояния объекта [10]:

$$h_s(\bar{Q}) = \sum_{j=1}^k \rho_{sj} [Q_j(\tilde{x}_j, t_{\text{кон}}) - Q_j(t)], \quad s = 1, 2; \quad j = \overline{1, k}. \quad (12)$$

Если теперь принять число k точек контроля управляемой величины в (12) равным числу $N_{01} = N_{02} = N_0 \geq 2$ интервалов оптимального управления для заданного ε_0 в (10), т. е. положить

$$h_s(\bar{Q}) = \sum_{j=1}^{N_0} \rho_{sj} [Q_j(\tilde{x}_j, t_{\text{кон}}) - Q_j(t)], \quad s = 1, 2; \quad j = \overline{1, N_0}, \quad (13)$$

то условия равенства нулю $h_s(\bar{Q})$ в расчетные моменты времени t_{ms} , $m=1,2,\dots,N_0-1$, $s=1,2$, переключения оптимальной программы соответственно $u_1^*(t), u_2^*(t)$ при $s=1$ и $s=2$ выполняются для каждого Q_0 в (2) в том случае (см. рис. 1), когда коэффициенты передачи $\rho_{sj}, s=1,2; j=\overline{1, N_0}$, опосредованно зависящие от Q_0 через значения $Q_j(t_{ms})$, являются нетривиальными решениями однородной системы N_0-1 линейных уравнений с N_0 неизвестными:

$$\sum_{j=1}^{N_0} \rho_{sj} [Q_j(\tilde{x}_j, t_{\text{кон}}) - Q_j(t_{ms})] = 0, \quad s=1,2; \quad m=1,2,\dots,N_0-1. \quad (14)$$

Полагая здесь для определенности $\rho_{s1}=1$ при $s=1,2$ [10], получим из (14) систему из N_0-1 линейных уравнений относительно N_0-1 неизвестных коэффициентов обратных связей $\rho_{sj}, j=\overline{2, N_0}$ для $s=1$ и $s=2$.

Значения $\Delta_{11}^{(2)}, \Delta_{12}^{(2)}, \Delta_{21}^{(2)}, \Delta_{22}^{(2)}$ длительностей интервалов постоянства $u_1^*(t), u_2^*(t)$, а значит, и моменты переключения t_{ms} вместе с оптимальной длительностью процесса управления, и величины $Q_j(\tilde{x}_j, t_{\text{кон}})$ могут быть найдены при расчете программного оптимального управления по ходу решения задачи альтернансным методом, описанным в [11]. При известных t_{ms} значения $Q_j(t_{ms})$ находятся по решениям уравнений объекта, отвечающим программному управлению $u_1^*(t), u_2^*(t)$. По полученным данным искомые коэффициенты ρ_{sj} находятся указанным выше способом из уравнений (14) с заданными элементами ее матрицы $Q_j(\tilde{x}_j, t_{\text{кон}}) - Q_j(t_{ms}), j=\overline{1, N_0}$.

В случае двухинтервального характера нагрева при $N_0=2$ функции переключения (13) должны быть сформированы по сигналам обратной связи по температурам $Q(\tilde{x}_1, t) = Q_1, Q(\tilde{x}_2, t) = Q_2$ в двух точках \tilde{x}_1 и $\tilde{x}_2 \in [0, R]$ по толщине пластины:

$$\begin{aligned} h_1(Q_1, Q_2) &= \rho_{11} (Q^* - Q(\tilde{x}_1, t)) + \rho_{12} (Q^* - Q(\tilde{x}_2, t)), \\ h_2(Q_1, Q_2) &= \rho_{21} (Q^* - Q(\tilde{x}_1, t)) + \rho_{22} (Q^* - Q(\tilde{x}_2, t)), \end{aligned} \quad (15)$$

в качестве которых удобно принять точки \tilde{x}_1, \tilde{x}_2 на множестве точек $\{x_j^0\}$ в системе уравнений (11), например $\tilde{x}_1=0, \tilde{x}_2=x_3^0$ (рис. 3), где результирующие значения температур $Q(0, t_{\text{кон}}) = Q(0, \Delta_{s1}^{(2)}, \Delta_{s2}^{(2)})$ и $Q(x_3^0, t_{\text{кон}}) = Q(x_3^0, \Delta_{s1}^{(2)}, \Delta_{s2}^{(2)})$, $s=1,2$ в конце оптимального процесса должны быть равны минимально допустимым величинам $Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)}$ согласно [4], что вытекает из альтернансных соотношений [11], независимо от начальной температуры Q_0 применительно к рассматриваемому случаю $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$.

Тогда при $\rho_{s1}=1$ для $s=1$ и $s=2$ системы уравнений (14) сводятся к одному уравнению относительно ρ_{s2} , и функции переключения примут следующий вид:

$$\begin{aligned} h_1(Q_1, Q_2) &= Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(0, t) + \rho_{12} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(x_3^0, t) \right), \\ h_2(Q_1, Q_2) &= Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(0, t) + \rho_{22} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(x_3^0, t) \right). \end{aligned} \quad (16)$$

В соответствии с полученными результатами алгоритм оптимального двухканального управления для каждого из управляющих воздействий определяется соотношениями

$$\begin{aligned} u_1^*(Q) &= \frac{u_{1\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(0, t) + \rho_{12} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(x_3^0, t) \right) \right) \right], \\ u_2^*(Q) &= \frac{u_{2\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(0, t) + \rho_{22} \left(Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)} - Q(x_3^0, t) \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

и реализуется в замкнутой системе управления, построенной по схеме (рис. 2), где коэффициенты передачи ρ_{12} и ρ_{22} вычисляются указанным выше способом.

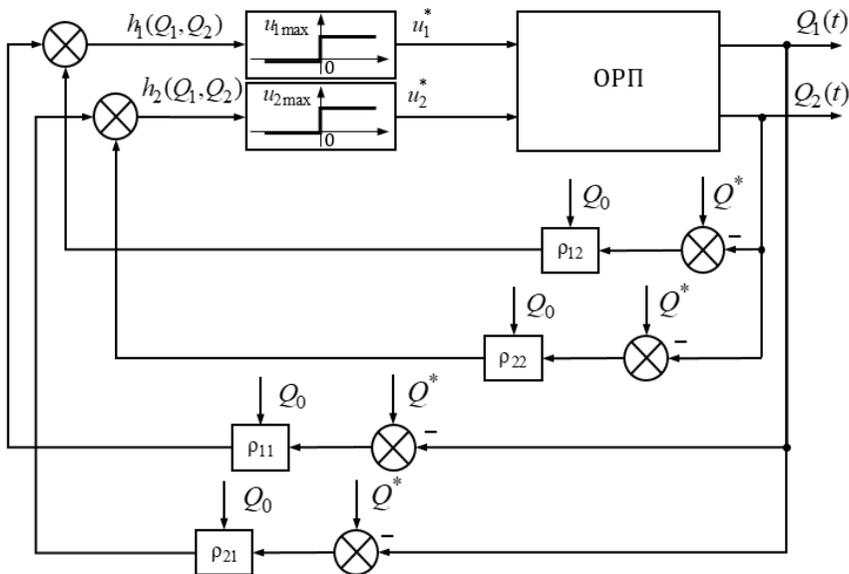


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева при $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Для исходных номинальных данных, отвечающих процессу индукционного нагрева пластины из титанового сплава толщиной 0.2 м перед последующей операцией горячего прессования ($\xi = 4$, $\lambda = 14$ Вт/(м · °С), $Q_0 = 20$ °С, $Q^* = 960$ °С, $a = 4,34 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $u_{1\max} = 300$ кВт/м³, $u_{2\max} = 393$ кВт/м³, $Bi_1 = 0,57$, $Bi_2 = 0,43$), найдены путем решения системы уравнений (11) значения параметров оптимального процесса и коэффициентов обратной связи в (16):

$$\Delta_{11}^{(2)} = 1607 \text{ с}, \Delta_{12}^{(2)} = 130 \text{ с}, \Delta_{21}^{(2)} = 1475 \text{ с}, \Delta_{22}^{(2)} = 262 \text{ с}, x_2^0 = 0,04 \text{ м}, x_3^0 = 0,01 \text{ м}, x_4^0 = 0,17 \text{ м},$$

$$\varepsilon_{\min}^{(2)} = 19 \text{ }^\circ\text{C}, \rho_{12} = 1,26, \rho_{22} = -0,07$$

и отвечающие этим результатам пространственные температурные распределения $Q(x, \bar{\Delta}) - Q^*$ (рис. 3).

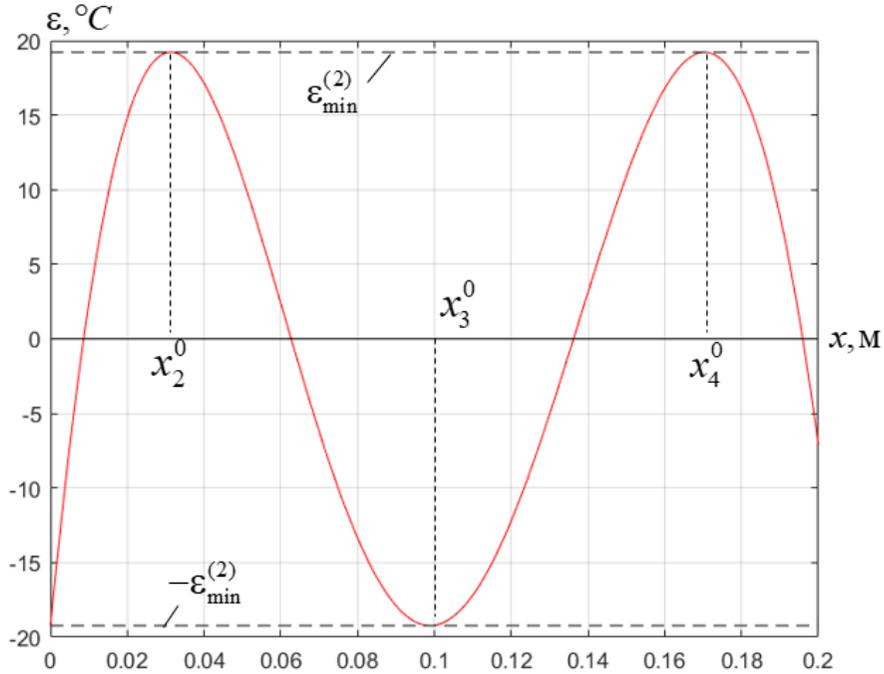


Рис. 3. Кривая конечного температурного распределения при $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$

Моделирование замкнутой системы проводилось в среде программирования MATLAB/Simulink [14, 15]. При моделировании теплового объекта (1)–(3), (5) с граничными условиями третьего рода использовались методы конечномерного приближения [13], позволяющие представить объект в виде параллельного соединения достаточно большого числа типовых апериодических звеньев (рис. 4) с коэффициентами усиления $F_n^*(x)$ и постоянными времени T_n^* , которые предварительно вычисляются по следующим выражениям:

$$k = \frac{\lambda R^2}{a}; T_n^* = \frac{R^2}{a \eta_n^2};$$

$$F_{1n}^*(x) = \frac{1}{E_n \eta_n^2} \bar{W}_{1n} \left[\cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) + \frac{Bi_1}{\eta_n} \sin\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \right];$$

$$F_{2n}^*(x) = \frac{1}{E_n \eta_n^2} \bar{W}_{2n} \left[\cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) + \frac{Bi_1}{\eta_n} \sin\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \right].$$

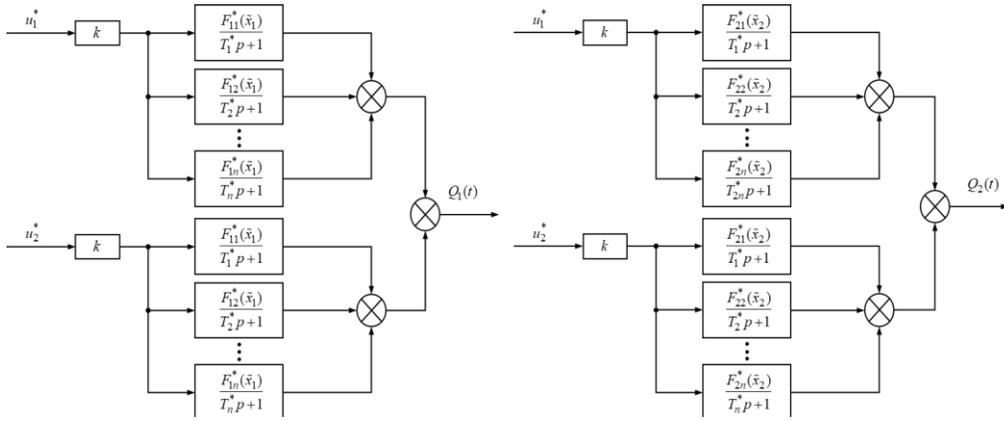


Рис. 4. Структура объекта управления в виде параллельного соединения n -числа аperiodических звеньев

На рис. 5 приведены некоторые результаты компьютерного моделирования процесса управления индукционным нагревом в замкнутой системе оптимального быстродействия, построенной по схеме рис. 2, с алгоритмами управления вида (17) для вышеуказанных значений параметров объекта.

Уравнения линий переключения для обоих управляющих воздействий на плоскости температур $Q_1 = Q(0, t)$, $Q_2 = Q(x_3^0, t)$ вычисляются по значениям $Q(0, \Delta_{s1}^{(2)})$, $Q(x_3^0, \Delta_{s1}^{(2)})$ в момент $\Delta_{s1}^{(2)}$ переключения $u_1^*(Q)$, $u_2^*(Q)$ и записываются в зависимости от начальной температуры Q_0 в параметрической форме:

$$\begin{aligned}
 Q_1(Q_0, \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)) &= Q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \times \\
 &\times \left[\overline{W}_{1n} u_{1\max} \left(1 - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)} \right) + \overline{W}_{2n} u_{2\max} \left(1 - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)} \right) \right]; \\
 Q_2(Q_0, \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)) &= Q_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda R^2}{a E_n \eta_n^2} \left(\cos \left(\eta_n \frac{x_3^0}{R} \right) + \frac{B i_1}{\eta_n} \sin \left(\eta_n \frac{x_3^0}{R} \right) \right) \times \\
 &\times \left[\overline{W}_{1n} u_{1\max} \left(1 - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)} \right) + \overline{W}_{2n} u_{2\max} \left(1 - e^{-\eta_n^2 \frac{a}{R^2} \Delta_{s1}^{(2)}(Q_0)} \right) \right],
 \end{aligned} \tag{18}$$

где $s = \overline{1, 2}$.

Выбор функции переключения в форме (16) с постоянными коэффициентами обратной связи $\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{21}, \rho_{22}$, соответствующими только одному принятому на начальном этапе постановки задачи значению Q_0 , позволяет провести синтез квазиоптимальной системы управления [10] с заменой линий переключения (18) прямыми на плоскости температур Q_1, Q_2 :

$$\begin{aligned} (Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)})(1 + \rho_{12}) - Q_1 - \rho_{12}Q_2 &= 0, \\ (Q^* - \varepsilon_{\min}^{(2)})(1 + \rho_{22}) - Q_1 - \rho_{22}Q_2 &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

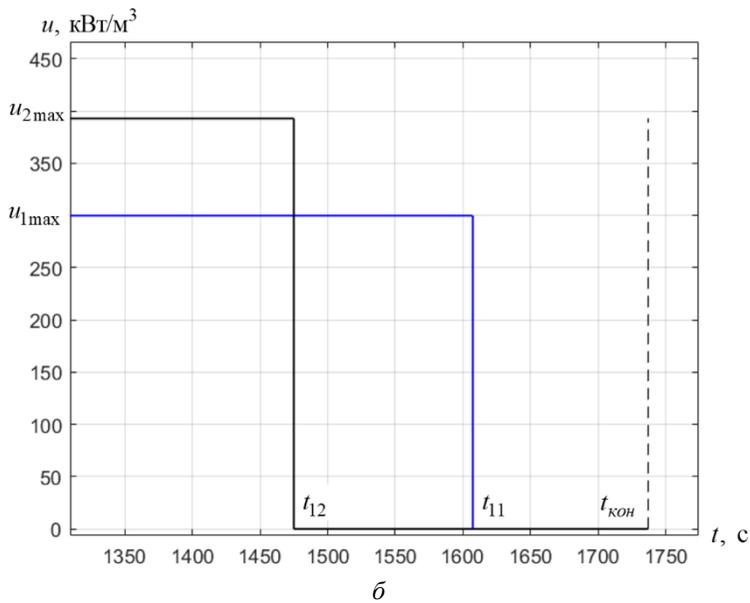
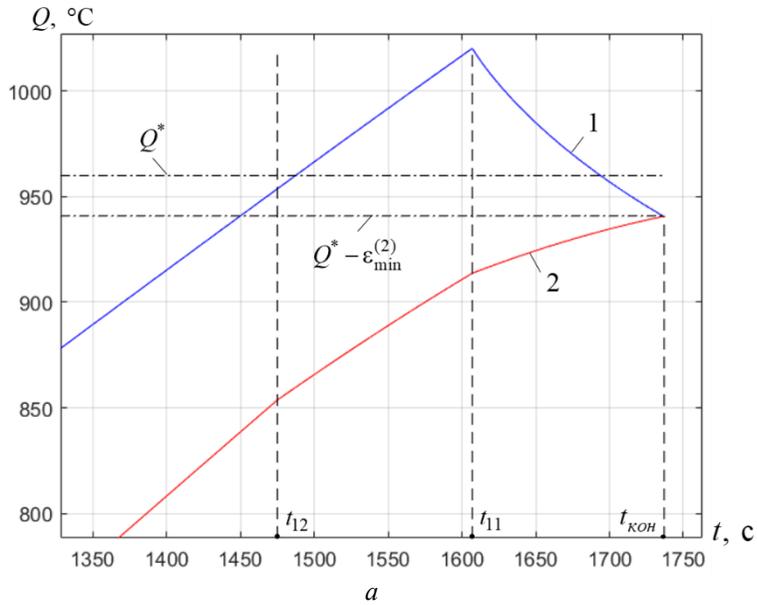


Рис. 5. Оптимальный по быстродействию процесс управления нагревом пластины в замкнутой системе:
a – температурное поле (1 – $Q_1(t)$,
 2 – $Q_2(t)$); *б* – оптимальное управление

На рис. 6 изображены линии переключения (18), а также прямые (19) и фазовые траектории системы для принятого значения Q_0 . Переключения управляющего воздействия в системе управления происходят при этом в точках А, Б пересечения линий (18) с прямыми (19) (фазовая траектория 1, 2, 3 в плоскости Q_1, Q_2 на рис. 6), а окончание процесса управления фиксируется по моменту достижения равенства $Q_1 = Q_2$ на втором интервале управления.

Следует отметить, что процесс в замкнутой системе с алгоритмом управления (17), построенной по схеме рис. 2, остается строго оптимальным по быстродействию с переключением управляющего воздействия на второй интервал в точках пересечения линий (18) с прямыми (19) только при равенстве начальной температуры Q_0 ее расчетному значению, для которого находятся коэффициенты ρ_{11}, ρ_{22} в (19). При отклонениях Q_0 от этого значения, принятого в исходных данных для рассматриваемой задачи, конечное температурное распределение будет отличаться от температурного состояния при оптимальном режиме нагрева. В частности, на рис. 6 представлены фазовые траектории процесса нагрева при начальной температуре $Q_0 = 80$, при которой траектории 1', 2' не попадают в точки пересечения линий (18) с прямыми (19) и переключение происходит на прямых 5.

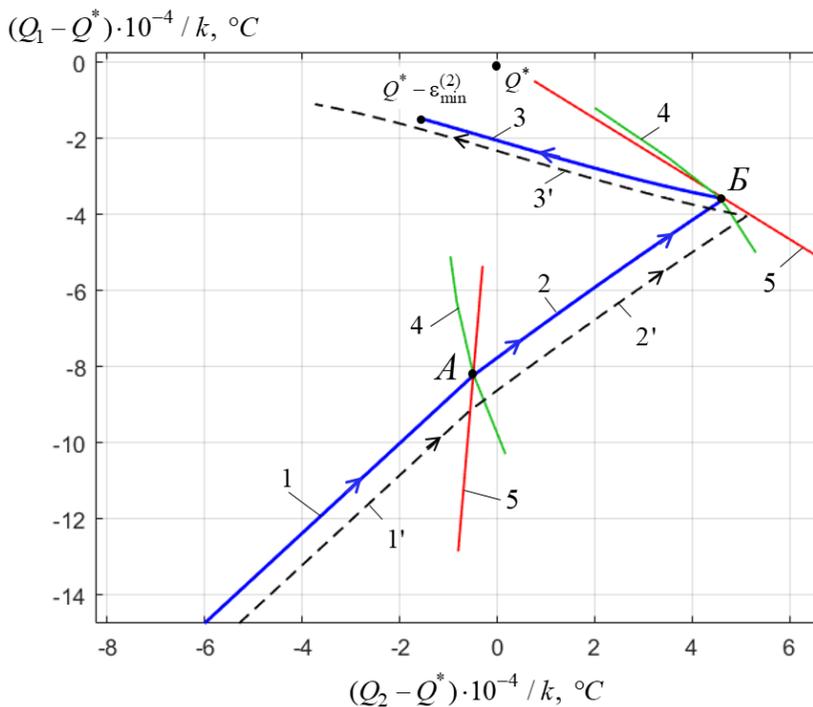


Рис. 6. Линии переключения и фазовые траектории в системе оптимального по быстродействию управления:

- 1, 2, 3 – фазовые траектории на первом и втором интервалах для $Q_0 = 20$;
- 1', 2', 3' – фазовые траектории на первом и втором интервалах для $Q_0 = 80$;
- 4 – линии переключения (18); 5 – прямые переключения (19)

Таким образом, задача синтеза двухканального оптимального по быстродействию управления объектом (1)–(3) с сосредоточенными управляющими воздействиями вида (17) сводится к построению релейной системы автоматического регулирования (схема 2) для каждого из каналов управления с линейными обратными связями по значениям управляемой величины в некоторых точках пространственной области ее распределения, число которых должно быть равно числу интервалов постоянства оптимальных программных управляющих воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: Физматлит, 2007.
2. *Яковлев В.Б.* Теория автоматического управления: Учебник для вузов / *В.Б. Яковлев, С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев, Н.Н. Кузьмин.* – М.: Высшая школа, 2003.
3. *Пупков К.А., Фалдин Н.В., Егунов Н.Д.* Методы синтеза оптимальных систем автоматического управления. – М.: МГТУ, 2000.
4. *Ильина Н.А.* Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом индукционного нагрева с учетом фазового ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2020. – № 65(2). – С. 41–58.
5. *Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012.
6. *Рапопорт Э.Я.* Методы параметрической оптимизация в задачах многоканального управления системами с распределенными параметрами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 4. – С. 36–50.
7. *Рапопорт Э.Я., Ильина Н.А.* Двухканальное оптимальное по быстродействию управление процессом нестационарной теплопроводности // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 7–18.
8. *Понтрягин Л.С.* Математическая теория оптимальных процессов: 2-е изд. / *Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко.* – М.: Наука, 1969.
9. *Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я.* Метод последовательной параметризации управляющих воздействий в краевых задачах оптимального управления системами с распределенными параметрами // Изв. РАН. ТИСУ. – 2009. – № 3. – С. 22–33.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009.
11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000.
12. *Фельдбаум А.А.* Основы теории оптимальных автоматических систем. – М.: Наука, 1966.
13. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высш. шк., 2003.
14. *Дьяконов В.П.* МАТЛАВ. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012.
15. *Рогачев Г.Н.* Программные средства анализа и синтеза систем управления: Конспект лекций. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

TWO-CHANNEL TIME-OPTIMAL CONTROL OF NONSTATIONARY HEAT CONDUCTIVE PROCESS WITH ACCOUNT FOR RESPONSE TIME OF BOUNDARY CONTROL ACTIONS *

N.A. Il'ina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

E-mail: ilina.natalyaa@yandex.ru., edgar.rapoport@mail.ru

Abstract. *The task of organization a closed time-optimal control system of linear object with distributed parameters of parabolic type is considered. The object has two lumped internal controls for the power of heat sources excited in the electromagnetic field of an inductor. The proposed method for the synthesis of optimal controllers uses an alternance method for calculating the optimal program controls for each of the control actions. An example of the construction of a quasi-optimal time control system for the process of periodic induction heating of a metal workpiece with constant values of the feedback coefficients calculated for the most characteristic initial spatial distribution is given.*

Keywords: *optimal control, design an optimum control system, two-channel control, alternance method, semi-infinite optimization, induction heating.*

REFERENCES

1. *Butkovskiy A.G., Malyy S.A., Andreev Yu.N.* Upravlenie nagrevom metalla [Control of Metal Heating]. Moscow, Metallurgy Publ., 1981. 272 p. (In Russian).
2. *Yakovlev V.B.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik dlya vuzov / V.B. Yakovlev, S.E. Dushin, N.S. Zotov, D.H. Imaev, N.N. Kuzmin. – Moscow: Vyssh. Shkola, 2003. (In Russian).
3. *Pupkov K.A., Faldin N.V., Yegupov N.D.* Metody sinteza optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moscow: MGТУ, 2000.
4. *Il'ina N.A.* Dvukhkanal'noe optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom induktsionnogo nagreva s uchetom fazovogo ogranicheniya na maksimal'nyu temperaturu [Two-channel time-optimal control of induction heating process with maximum temperature constraint] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskije nauki. 2020. No. 65(2). Pp. 41–58.
5. *Lykov A.B.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of heat conduction]. Moscow: Vyssh. Shkola, 1967. 600 p. (In Russian).
6. *Rapoport E.Ya.* Metody parametriceskoy optimizatsii v zadachakh mnogokanal'nogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Parametric optimization methods for multichannel control of systems with distributed parameters] // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemami upravleniya, 2019. No. 4. Pp. 36–50. (In Russian).
7. *Rapoport E.Ya., Il'ina N.A.* Dvukhkanal'noe optimal'noe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom nestatsionarnoy teploprovodnosti [Two-channel time-optimal control of the process of nonstationary heat conductivity] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2018. No. 1(57). Pp. 7–18. (In Russian).
8. *Pontryagin L.S.* Matematicheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes] / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskiy, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mischenko. Moscow: Nauka, 1969. 384 p. (In Russian).
9. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal'noe upravlenie temperaturnumi regimami induktsionnogo nagreva [Optimal Control of Induction Heating Processes]. Moscow: Nauka, 2012. 309 p. ISBN 978-5-02-037501-7 (In Russian).
10. *Rapoport E.Ya.* Optimal'noe upravlenie sistem s raspredelennymi parametrami [Optimal Control for Systems with Distributed Parameters]. Moscow: Vyssh. Shkola, 2009. 677 p. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya.* Al'ternansnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance Method for Solving Applied Optimization Problems]. Moscow: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).

12. *Feldbaum A.A.* Osnovi teorii optimalnikh avtomaticheskikh sistem. Moscow: Nauka, 1966. 623 p.
13. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie obektov i sistem upravleniya s raspredelennimi parametrami. Moscow: Vyssh. Shkola, 2003. 299 p.
14. *Dyakonov V.P.* MATLAB. Polnuy samouchitel' [MATLAB.Full tutorial]. Moscow: DMK Press, 2012. 768 p. (In Russian).
15. *Rogachev G.N.* Programmnye sredstva analiza i sinteza sistem upravleniya: Konspekt lektsii. Samara: Samar. Gos. Tekhn. Un-t, 2016. 111 p. (In Russian).

УДК 658.5.012

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧЕ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА¹

Э.Я. Рапопорт, Н.Г. Рогачёв

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: erapoport@mail.ru rogachev8@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача многокритериального нечетко-оптимального позиционного управления объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере установки индукционного нагрева. Приведена общая постановка задачи нечеткой оптимизации. Формулировка задачи многокритериального нечетко-оптимального позиционного управления установкой индукционного нагрева как частный случай общей задачи включает требования к конечному и промежуточным состояниям и учитывает нечеткий характер конкурирующих друг с другом критериев качества. При решении задачи использованы взаимосвязанные электромагнитная и тепловая модели процесса индукционного нагрева. Для моделирования электромагнитных процессов использовался метод вторичных источников, для моделирования теплопроводности – дифференциально-разностный метод. Численный метод решения задачи базируется на представлении алгоритма управления в виде априори не фиксируемой и переменной во времени системы правил, определяемых в ходе технологического процесса. Представленные результаты численного моделирования подтверждают эффективность предлагаемого нечетко-оптимального метода определения позиционного управления объектами с распределенными параметрами.

Ключевые слова: установка индукционного нагрева, нечеткая оптимизация, гибридная непрерывно-дискретная система, численный метод, система правил.

Введение

Первоочередной задачей, решаемой разработчиками систем управления техническими объектами, является повышение эффективности процедуры управления. Особенно это касается обладающих признаками сложных систем нелинейных многомерных технических объектов, управление которыми должно осуществляться в реальном времени. Поведение таких объектов может быть описано векторной системой уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{\Phi}(\mathbf{X}) \end{aligned} \quad (1)$$

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90061 А, № 19-08-00232.

Рапопорт Эдгар Яковлевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Рогачев Николай Геннадьевич, аспирант.

Здесь \mathbf{X} – вектор состояний ОУ,
 \mathbf{U} – вектор управляющих воздействий,
 \mathbf{Y} – вектор выходных величин.

Выражение (1) является стандартной формой математической модели, представлением ОУ в пространстве состояний, вид оператора \mathbf{F} определяет динамику ОУ, оператор Φ определяет измеряемые координаты ОУ. Оператор Φ определяется составом используемых датчиков, его задание не представляет сложности, за исключением тех случаев, когда набор датчиков необходимо определить в ходе решения задачи проектирования.

В большинстве инженерных приложений для решения задач управления сложными объектами используются имитационные модели ОУ. Разработка адекватной имитационной модели является сложной самостоятельной задачей, первым этапом работ по автоматизации технологического процесса.

Следующей задачей является определение закона управления. Современные системы управления являются гибридными непрерывно-дискретными. Компоненты с непрерывными сигналами отражают физические законы функционирования объектов управления, а дискретные элементы моделируют работу цифровых управляющих устройств. Два класса гибридных систем – это системы программного управления и системы позиционного управления. В силу цифрового характера регулятора управляющие воздействия \mathbf{U} являются элементами множества Π кусочно-постоянных функций с конечным на интервале регулирования числом переключений. В силу непрерывного характера ОУ переменные состояния \mathbf{X} и измеряемые (выходные) переменные \mathbf{Y} есть элементы множества \mathcal{C} непрерывных функций.

Алгоритм работы цифрового регулятора системы программного управления $\mathbf{U}(\tau), \tau = [t_0, t_Q]$ состоит в выработке в тактовые моменты времени t_0, t_1, \dots, t_{Q-1} управляющих сигналов $\mathbf{U}(t_0), \mathbf{U}(t_1), \dots, \mathbf{U}(t_{Q-1})$. Сигнал $\mathbf{U}(t_i)$ действует на объект управления вплоть до наступления следующего тактового момента t_{i+1} . Поиск всей совокупности управляющих сигналов происходит до начала процесса управления (до момента t_0) или во время процесса управления (в моменты $t_i, i = 0, 1, 2, \dots, Q-1$) исходя из требований к поведению объекта управления с использованием модели объекта и окружающей среды.

Алгоритм работы цифрового регулятора системы позиционного управления $\mathbf{U}(\tau, \mathbf{Y}(\tau)), \tau = [t_0, t_Q]$ отличается от алгоритма программного управления лишь тем, что применяемая информация в виде модели объекта и среды дополняется сигналами обратных связей.

В стандартных промышленных регуляторах (ПИД, lead-lag, линейно-квадратичных) поиск управляющих сигналов, осуществляемый в ходе технологического процесса, происходит по заранее установленной несложной формуле, время вычисления управляющих сигналов мало. Это создает иллюзию непрерывности процесса управления, хотя фактически имеет место многократно повторяющаяся ступенчатая процедура вида «наступление очередного тактового момента времени – вычисление очередного сигнала управления – применение этого управления к объекту вплоть до наступления следующего тактового момента». При использовании нестандартных подходов к синтезу систем управления (адаптивные регуляторы, регуляторы с прогнозирующей моделью в контуре и т. п.) время вычисления очередного сигнала управления может быть существ-

венно больше, однако этим эффектом «запаздывания» при вычислении сигналов управления в темпе с управляемым процессом, как правило, пренебрегают, за исключением случаев, когда принципиальную роль играет ограничение на время принятия управленческих решений.

Общим свойством большинства задач выработки управленческих решений является множественность альтернативных решений, среди которых необходимо выбрать наилучшее, и множественность критериев, определяющих качество того или иного решения. Различные методы многокритериального принятия решений, включая оценку и объединение характеристик альтернатив по двум или более критериям, рассматривались во многих работах, в том числе в [1–6]. Кроме того, большинство решений, принимаемых в реальном мире, осуществляется в среде, в которой цели и ограничения не известны точно, и, таким образом, проблема не может быть определена и представлена в четкой форме. Чтобы иметь дело с качественной, неточной информацией или даже с плохо структурированными проблемами принятия решений, было предложено в качестве инструмента использовать теорию нечетких множеств [7, 8]. Эта теория предоставляет удобный аппарат формализации неопределенностей, возникающих при моделировании и оптимизации реальных процессов. Вопросам применения нечеткой логики в различных отраслях, прямо или опосредованно связанных с производственной деятельностью, посвящена монография [9]. В этой работе отмечено, что важность процесса принятия управленческих решений возрастает с ростом сложности объектов управления.

Постановка задачи

Цель настоящей статьи – демонстрация эффективности процедуры нечеткой оптимизации применительно к проблеме синтеза цифрового регулятора для позиционного управления установкой индукционного нагрева как объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами. Рассматриваемый метод построения систем управления с нечеткими целями их работы и ограничениями, налагаемыми как на ресурсы управления, так и на поведение объектов управления в меняющемся окружении, базируется на представлении алгоритмов управления в виде априори не фиксируемых и переменных во времени систем правил. Метод обеспечивает построение в темпе с управляемым процессом непосредственно на цифровом регуляторе реализующих эти алгоритмы вычислительных процедур, формируемых по информации о свойствах среды с учетом особенностей, обусловленных цифровым характером устройств управления [10, 11].

Два больших класса задач оптимизации – это задачи математического программирования и задачи оптимального управления. В задаче математического программирования определению подлежит оптимальное значение вектора, в задаче оптимального управления – оптимальная функция. Если временная характеристика работы регулятора дискретна, задачи оптимального управления могут быть сведены к задачам математического программирования. В гибридных непрерывно-дискретных системах управления имеет место именно такая ситуация. В силу цифрового характера регулятора управляющие воздействия являются элементами множества кусочно-постоянных функций с конечным на интервале регулирования числом переключений. Таким образом, процедуру синтеза системы правил работы программного регулятора при наличии единственного критерия качества $f(z)$ можно сформулировать как задачу математического программирования вида

$$\begin{aligned} \max_{z \in Z} f(z), \\ g_k(z) \geq 0, k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (2)$$

где $z \in Z$ – искомое решение, алгоритм работы цифрового регулятора;
 $f(z)$ – критерий качества;
 $g_k(z)$ – уравнения связи или ограничения.

Теория решения однокритериальных задач оптимизации достаточно глубоко проработана [12]. Как правило, в реальных задачах выбора наиболее предпочтительного решения, возникающих на практике, присутствует несколько критериев оптимальности. Задачи выбора решения из множества допустимых с учетом нескольких критериев оптимальности, задачи многокритериальной оптимизации широко распространены в технических приложениях. Формально многокритериальная задача задается в виде

$$\begin{aligned} \max_{z \in Z} \mathbf{F}(z), \\ g_k(z) \geq 0, k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{F}(z) = [f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)]$, а $f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)$ – скалярные функции аргумента z , каждая из которых является математическим выражением одного критерия оптимальности.

Критерий оптимальности представляет собой вектор, компонентами которого являются несводимые друг к другу скалярные критерии оптимальности. Задача (3) в общем случае не имеет строгого решения. Существование решения, минимизирующего одновременно все скалярные критерии оптимальности, является редким исключением. При наличии нескольких критериев в задачах многокритериальной оптимизации появляется неопределенность, которая не может быть исключена с помощью расчетов. Неизбежно присутствуют субъективные факторы, связанные, например, с ранжированием частных критериев. Принципиальным моментом при решении такого рода задач является предварительная договоренность об используемом принципе оптимальности, о том, что считать самым предпочтительным решением.

В случае неравной значимости критериев используют метод лексикографической оптимизации, метод последовательных уступок или подобные эвристические человеко-машинные процедуры [13]. В тех случаях, когда все локальные критерии $f_1(z), f_2(z), \dots, f_n(z)$ имеют одинаковую степень важности, решение задачи векторной оптимизации осуществляется с использованием принципа равномерности, метода идеальной точки, принципа справедливого компромисса, оптимальности по Парето [14].

В данной работе используется нечеткая логика. С использованием такого подхода проблема (3) может быть расширена так, что границы, которые отделяют приемлемые решения от неприемлемых, являются размытыми, а степень приемлемости отдельных решений представлена нечеткими числами. Для этого целевая функция должна пониматься в нечетком смысле [15]. При использовании обозначений из области нечеткой оптимизации нечеткая версия проблемы (3) может быть записана так:

$$\begin{aligned} & \max_{z \in Z} \mathbf{F}(z), \\ & g_k(z) \geq 0, k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (4)$$

где $z \in Z$ – искомое решение, алгоритм работы цифрового регулятора;
 $\mathbf{F}(z)$ – векторная целевая функция, минимизируемый критерий качества;
 $g_k(z)$ – «четкие» уравнения связи и ограничения, волнистая черта «~» – символ нечеткой операции.

Пусть функции принадлежности $\mu_j(\cdot) \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, n$ каждого частного критерия соответствующему нечеткому множеству представляют степени выполнения целей и нечетких ограничений. Решение оптимизационной задачи (4) должно удовлетворять, насколько возможно, всем целям, т. е. максимизировать минимальное из значений $\mu_j(\cdot)$, $j = 1, 2, \dots, n$. В качестве обобщенного критерия выбрана свертка частных критериев вида $\min(\mu_1(z), \mu_2(z), \dots, \mu_n(z))$. Такое представление показателя качества, как показано в [9], обеспечивает максимум степени удовлетворения решения одновременно всем частным критериям в случае, когда все локальные критерии имеют одинаковую степень важности. В этом случае нечеткая проблема математического программирования (4) может быть преобразована [16] в задачу определения решения $z^* \in Z$, т. е. такого алгоритма работы цифрового регулятора как набора управляющих сигналов (в общем случае векторных) $\mathbf{U}(t_i)$ или $\mathbf{U}(t_i, \mathbf{Y}(t_i))$, $i = 0, 1, \dots, Q-1$, действующих на объект управления на временных интервалах $[t_i, t_{i+1})$, который обеспечивает

$$\begin{aligned} & \min_j (\mu_j(f_j(z^*))) = \max_{z \in Z}, j = 1, 2, \dots, n; \\ & g_k(z^*) \geq 0, k = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (5)$$

где функции принадлежности $\mu_j(\cdot)$, $j = 1, 2, \dots, n$ – это степени выполнения нечетких целей и ограничений, $g_k(\cdot)$, $k = 1, 2, \dots, m$ – «четкие» уравнения связи и ограничения.

Далее задача (5) решается известными численными методами и стандартными средствами системы MATLAB [17].

Описание процесса индукционного нагрева как объекта управления

В работе рассмотрена задача многокритериального нечетко-оптимального позиционного управления объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере установки индукционного нагрева. Установка индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек до заданных кондиций с последующей стабилизацией температуры на этом уровне представлена на рис. 1. Изделие помещается в индукционный нагреватель, состоящий из индуктора, питающегося от источника переменного тока, и теплоизоляции. Температура нагрева контролируется термопарами в трех точках, разнесенных по длине нагреваемого тела (выходные сигналы $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, y_3]$). Температурное поле на завершающей стадии процесса должно достаточно продолжительное время быть равномерным на уровне $y_i \in [y_{зад} - \varepsilon, y_{зад} + \varepsilon]$, $i = 1, 2, 3$, т. е. отклоняться от заданной температуры $y_{зад}$ не более чем на ε . Это требование обеспечивают три управляющих воздействия:

$U = [u_1, u_2, u_3]$. Основной канал управления – мощность питающего индуктор источника $u_1 \in [0, u_{MAX}]$. Этот канал позволяет воздействовать на среднюю температуру изделия, но не в состоянии существенно изменить закон распределения температуры по длине изделия. Для обеспечения требуемой равномерности нагрева индуктор снабжен дополнительными витками как устройствами выравнивания температуры по длине изделия. В разомкнутом состоянии ($u_i = 0, i = 2, 3$) витки не оказывают влияния на процесс нагрева. При замыкании витка ($u_i = 1, i = 2, 3$) в нем наводится противо-ЭДС. Это вызывает локальное снижение мощности нагрева в зоне размещения витка, что способствует выравниванию температуры в нагреваемом изделии.

Рассматриваемый процесс нагрева тонкой конической оболочки является многооперационным, состоит из этапа нагрева и этапа стабилизации температуры, устройства выравнивания температуры по длине изделия включаются в работу по мере необходимости вместе или поочередно, функционируя одновременно с индукционным нагревателем. В математической модели процесса индукционного нагрева как объекта управления можно выделить взаимосвязанные электромагнитную и тепловую составляющие.

Тепловые процессы описываются неоднородным одномерным уравнением теплопроводности

$$c\gamma \partial T / \partial t = \lambda (\partial^2 T / \partial r^2 + 1/r \cdot \partial T / \partial r) + u_1(t) \cdot P_{об}(r) \quad (6)$$

с краевыми условиями

$$T(r, 0) = T_0(r), \quad \partial T(R_1, t) / \partial r = -q_{R_1}(T), \quad \partial T(R_2, t) / \partial r = -q_{R_2}(T). \quad (7)$$

В (6), (7) $T(r, t)$ – температурное поле нагреваемого изделия, зависящее от времени t и пространственной координаты $r \in [R_1, R_2]$, $P_{об}(r)$ – удельная мощность внутреннего тепловыделения, $q_{R_1}(T), q_{R_2}(T)$ – тепловые потери с торцов изделия.

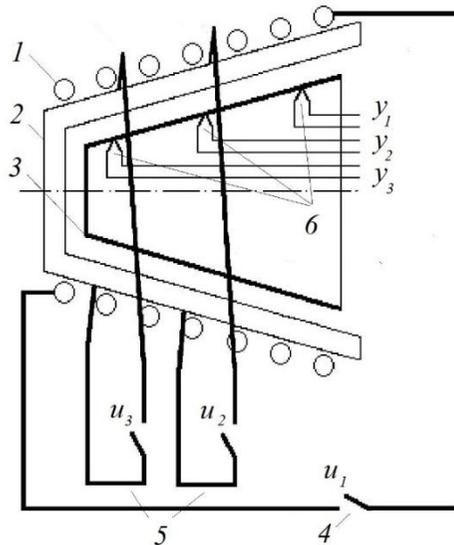


Рис. 1. Установка индукционного нагрева:

- 1 – индуктор; 2 – теплоизоляция; 3 – нагреваемое изделие; 4 – источник питания; 5 – устройства выравнивания температуры по длине изделия; 6 – датчики температуры

Достаточно эффективным для решения уравнения теплопроводности (6) – (7) с произвольным характером изменения мощности внутренних теплоисточников $P_{ob}(r)$ является используемый авторами в расчетах дифференциально-разностный метод [18]. Этот метод позволяет свести конечно-разностной аппроксимацией по пространственной переменной модель в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$dT/dt = \mathbf{AT} + \mathbf{P}_{ob}\mathbf{U} + \mathbf{F}_1 q_{X_2} + \mathbf{F}_2 q_{X_2}; \mathbf{y} = \mathbf{CT}; \mathbf{T}|_{t=0} = \mathbf{T}_0 \quad (8)$$

для температуры $\mathbf{T} = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_N]^T$ в N узлах сетки.

Объемная плотность мощности внутренних теплоисточников $\mathbf{P}_{ob} = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N]^T$ характеризует распределение интенсивности внутреннего тепловыделения по длине нагреваемого изделия при индукционном нагреве. Расчет распределения внутренних теплоисточников является сложной самостоятельной задачей и осуществляется в ходе моделирования электромагнитных процессов. В настоящей работе в качестве базового для моделирования электромагнитных процессов в индукционных нагревателях использовался изложенный в [19] метод вторичных источников. Применение метода вторичных источников позволяет, в отличие от метода конечных разностей или конечных элементов, рассматривать лишь области, занятые источниками поля, что повышает точность и сокращает время расчетов. Расчет полей в немагнитных телах согласно [19] сведен к определению токов $\dot{I}_i, i=1,2,\dots,N$ в N элементарных соленоидах, на которые разбивается исследуемое тело, токов $\dot{I}_{N+1}, \dot{I}_{N+2}$ в устройствах выравнивания температуры по длине изделия и тока \dot{I}_{N+3} в индукторе.

Для нахождения токов применением 2-го закона Кирхгофа к каждому из $N+3$ соленоидов составляется система линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами

$$\dot{\mathbf{Z}} \cdot \dot{\mathbf{I}} = \mathbf{U}. \quad (9)$$

В выражении (9) $\mathbf{U} = [0 \ 0 \ \dots \ u_1]^T$, полное сопротивление каждого элемента $\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{X}$, где ω – угловая частота питающего напряжения, $j = \sqrt{-1}$.

Элементы диагональной матрицы \mathbf{R} равны $R_{ik} = \begin{cases} R_i, i=k \\ 0, i \neq k \end{cases}$, где R_i – активное сопротивление i -го соленоида. Соленоиды с номерами $N+1$ и $N+2$ (устройства выравнивания температуры) могут в процессе нагрева быть замкнутыми, если $u_i = 1, i=2,3$ или размыкаться при $u_i = 0, i=2,3$, и тогда $R_i = \infty, i=N+1, N+2$.

Элементы матрицы \mathbf{X} равны $X_{ik} = \begin{cases} L_i, i=k \\ M_{ik}, i \neq k \end{cases}$, где L_i – индуктивность i -го соленоида, M_{ik} – взаимная индуктивность i -го и k -го соленоидов. Решение системы (9) определяет значение токов в индукторе, в устройствах выравнивания температуры по длине изделия и в соленоидах, которыми представлены составляющие электромагнитную систему тела. Токи соленоидов используются далее для определения мощности внутренних теплоисточников в (8), $p_i = I_i^2 \cdot \text{Re}(\dot{z}_i)$, $i=1,2,\dots,N$. Системные связи процесса индукционного нагрева как объекта управления показаны на рис. 2.

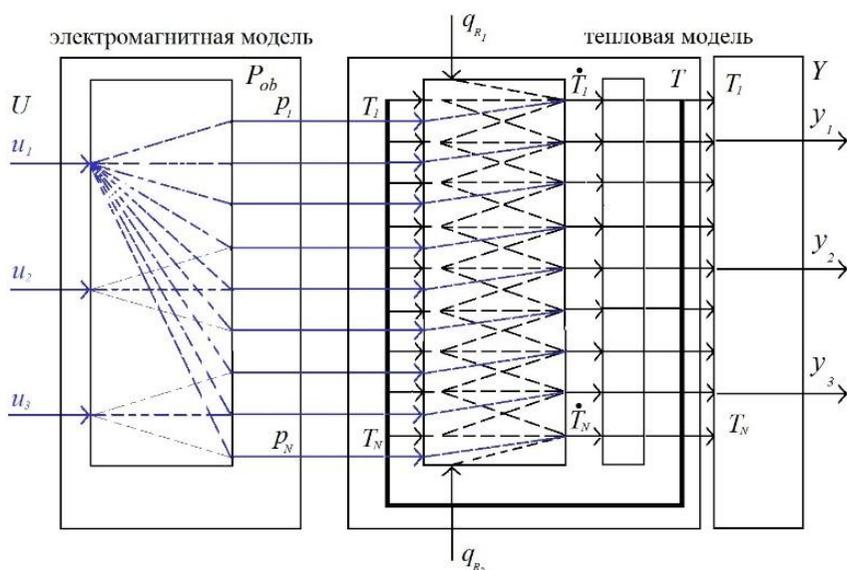


Рис. 2. Системные связи процесса индукционного нагрева как объекта управления

Для численного моделирования электромагнитных процессов индукционного нагрева автором были разработаны специальные подпрограммы [20], составляющие в совокупности с подпрограммами расчета тепловых процессов цифровую модель индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек (рис. 3). Модель реализована в пакете MATLAB и использовалась для нечеткой оптимизации процесса нагрева. Малое время счета на доступных вычислительных ресурсах является следствием использования упрощений, сведения задачи с распределенными параметрами к задаче с сосредоточенными.

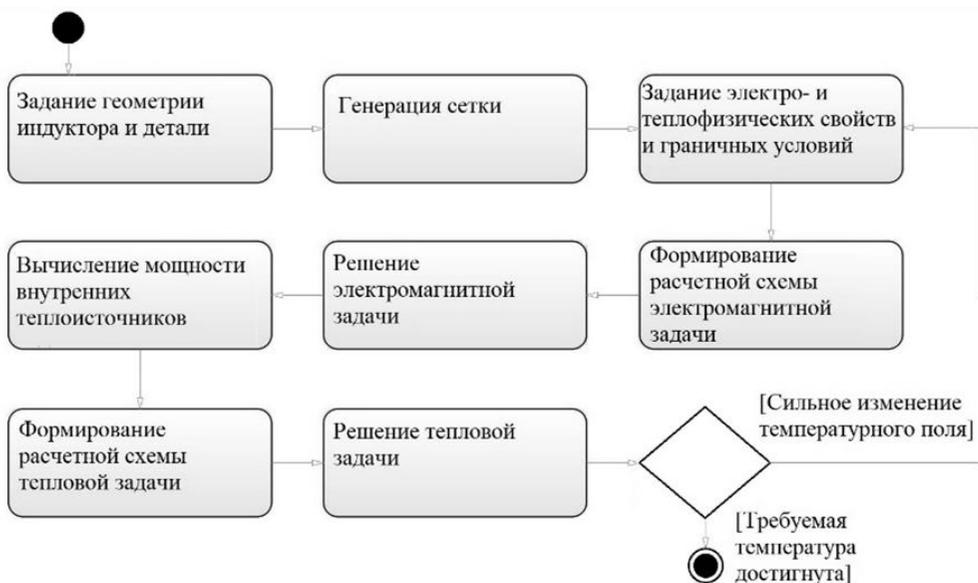


Рис. 3. Граф-схема цифровой модели процесса индукционного нагрева

Решение задачи управления процессом индукционного нагрева

В работе была сформулирована и с использованием численной модели [20] решена задача управления процессом индукционного нагрева парамагнитных тонкостенных оболочек в установке, представленной на рис. 1. Параметры процесса индукционного нагрева представлены в таблице и на рис. 4.

Проблема синтеза системы продукции регулятора, оптимизирующего процесс индукционного нагрева при нечетко сформулированных требованиях к поведению объекта, сформулирована как частный случай задачи (5). Это задача определения алгоритма работы цифрового позиционного регулятора как набора управляющих сигналов (в общем случае векторных) $\mathbf{U}(t_i, \mathbf{Y}(t_i))$, $i = 0, 1, \dots, Q-1$, действующих на объект управления на временных интервалах $[t_i, t_{i+1})$. Алгоритм должен обеспечивать требование $\min_j (\mu_j(f_j(z^*))) = \max_{z \in Z}$, $j = 1, 2, \dots, n$, где функции принадлежности $\mu_j(\cdot)$ – это степени выполнения нечетких целей и ограничений при выполнении условий $g_k(z^*) \geq 0$, $k = 1, 2, \dots, m$, $g_k(\cdot)$ – «четкие» уравнения связи и ограничения. «Четкие» уравнения связи – это модель процесса индукционного нагрева (8)–(9), «четкие» ограничения – это ограничения на вектор $\mathbf{U} = [u_1, u_2, u_3]$ управляющих воздействий.

Параметры индукционного нагревателя

Нагреваемое изделие – сталь марки 17Х18Н9Т		Индукционный нагреватель	
Теплоемкость c , Дж/град	500	Количество витков w	10
Теплопроводность λ , Вт/(м·град)	22	Ширина витка b , м	0,02
Плотность γ , кг/м ³	7900	Электропроводность ρ , Ом· м	$2 \cdot 10^{-8}$
Электропроводность ρ , Ом· м	$12 \cdot 10^{-7}$	Частота источника F , Гц	2400
Большой радиус R_2 , м	0,15	Напряжение источника U , В	250
Меньший радиус R_1 , м	0,06	Радиус, м	0,08–0,19
Длина L , м	0,185	Длина, м	0,19

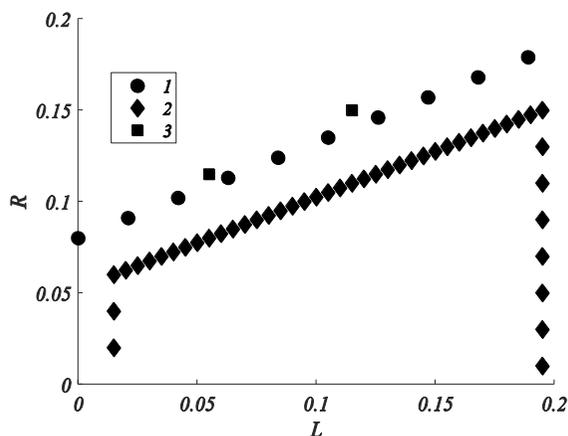


Рис. 4. Геометрические параметры установки индукционного нагрева:

1 – индуктор; 2 – нагреваемое изделие;

3 – устройства выравнивания температуры по длине изделия

Использование позиционного способа позволяет скорректировать управление в случаях отклонения траектории процесса от желаемой вследствие неточности модели или воздействия возмущающих факторов. Однако вычисление сигнала управления происходит в тактовые моменты времени не мгновенно, возникает определенное временное запаздывание. При значительной сложности вычислений этот факт должен быть принят во внимание. Существенно сократить время вычислений можно, если использовать сигнал управления мощностью питающего индуктор источника в виде релейной функции, как это имеет место в строго оптимальной по быстродействию постановке [18], тогда $u_i \in \{0,1\}$.

Система правил работы цифрового программного регулятора задается следующим образом: «если $t \in [t_i, t_{i+1})$, то

$$u_1(t) = u_1(t_i, \mathbf{Y}_i), u_2(t) = u_2(t_i, \mathbf{Y}_i), u_3(t) = u_3(t_i, \mathbf{Y}_i) \rangle, i = 0, 1, \dots, Q-1,$$

где $t_Q = t_F$ – время окончания процесса.

Поскольку $u_i \in \{0,1\}$, $i = 1, 2, 3$, на каждом из интервалов изменения управляющего воздействия возможен один из пяти режимов. Первый режим – нагрев полной мощностью с разомкнутыми витками, $\mathbf{U} = [1 \ 0 \ 0]$, второй режим – нагрев полной мощностью с замкнутым первым витком, $\mathbf{U} = [1 \ 1 \ 0]$, третий режим – нагрев полной мощностью с замкнутым вторым витком, $\mathbf{U} = [1 \ 0 \ 1]$, четвертый режим – нагрев полной мощностью с замкнутыми первым и вторым витками, $\mathbf{U} = [1 \ 1 \ 1]$, пятый режим – нулевая мощность, $\mathbf{U} = [0 \ 0 \ 0]$. Зависимость формы кривой распределения мощности нагрева \mathbf{P}_{ob} от величины вектора управляющих воздействий как результат моделирования электромагнитных процессов приведена на рис. 5, количество узлов сетки в электромагнитном и тепловом расчетах $N = 37$.

В качестве типовой проблемы рассмотрена задача синтеза нечетко-оптимальной системы правил работы регулятора при позиционном управлении нагревом изделия до заданного значения с последующей стабилизацией температуры. Задача управления с нечеткой целью и ограничениями сформулирована следующим образом. Необходимо довести среднюю температуру $T_{CP} = \sum_{i=1}^3 Y_i / 3$ объекта управления (8)–(9) (определяемую по показаниям имеющихся трех датчиков, $Y_1 = T_{30}$, $Y_2 = T_{19}$, $Y_3 = T_8$) до уровня $T_F = 900^0 C$ при выполнении дополнительного условия $\max_{t \in [0, t_{F1}]} T_D(t) \leq 2\varepsilon$, $\varepsilon = 40^0 C$, где $T_D(t) = \max_{i \in \{1, 2, 3\}} Y_i(t) - \min_{i \in \{1, 2, 3\}} Y_i(t)$. Это дополнительное условие означает, что максимальный перепад температур по длине не должен превышать определенного уровня в течение всего времени нагрева. Такие же условия должны выполняться на стадии стабилизации температуры при $t \in (t_{F1}, t_{F2}]$.

Функции принадлежности $\mu_i(\cdot)$, $i = 1, 2$ представляют степени выполнения сформулированных целей и заданы аналитически: $\mu_1(T_{CP}) = e^{-(T_{CP} - T_F)^2 / 3200}$; $\mu_2(\rho_1) = 1 / (1 + e^{0.1(\rho_1 - 150)})$; $\rho_1 = \max_{t \in [0, t_{F2}]} (T_D)$. Требование обеспечить нагрев объекта управления до уровня $T_{CP} = T_F$ представлено функцией принадлежности $\mu_1(T_{CP})$ (1 на рис. 6). Поскольку величина максимального перепада по длине в течение этапа нагрева и этапа стабилизации температуры не должна превышать $30^0 C$,

степень выполнения этого дополнительного условия представлена функцией принадлежности $\mu_2(\max_{t \in [0, t_F]}(T_D))$ (2 на рис. 6).

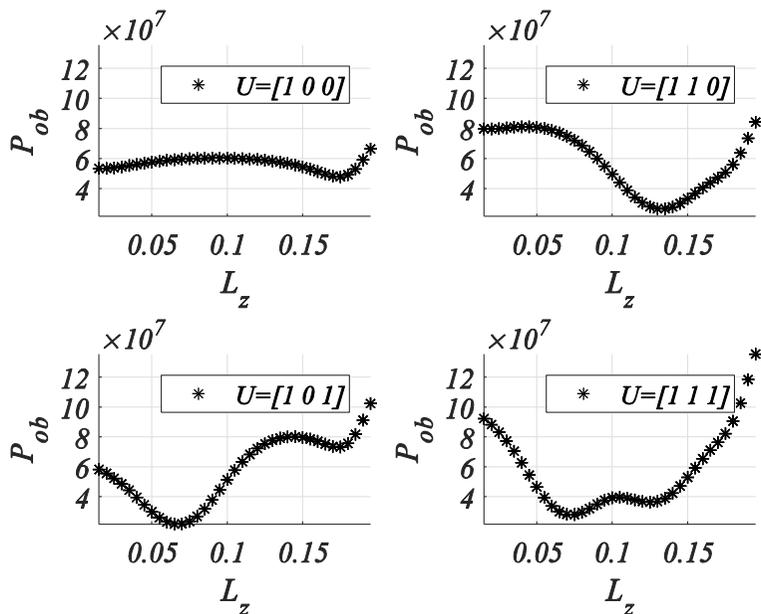


Рис. 5. Зависимость формы распределения мощности нагрева P_{ob} от вектора управляющих воздействий U

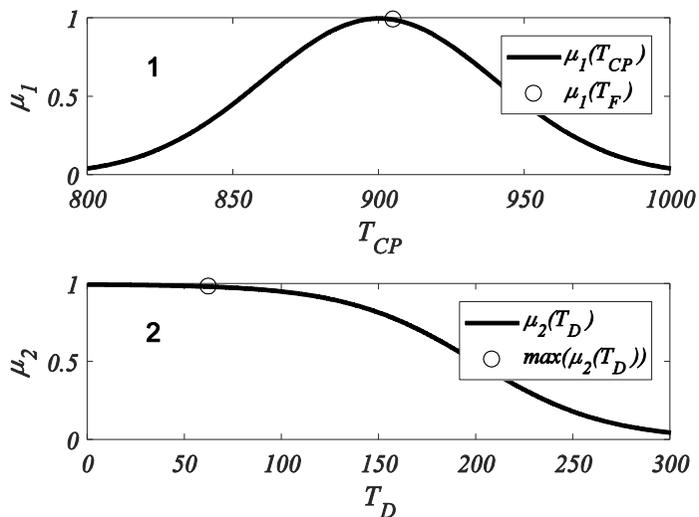


Рис. 6. Функции принадлежности:
 1 – функция принадлежности $\mu_1(T_{CP})$;
 2 – функция принадлежности $\mu_2(T_D)$

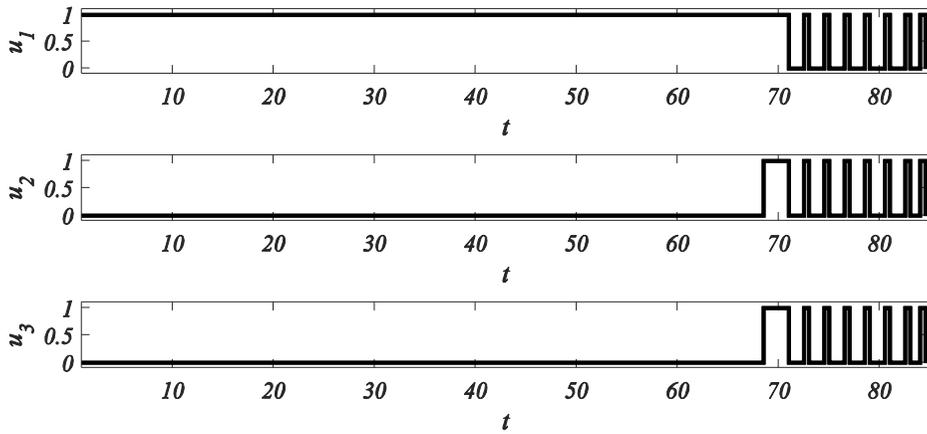


Рис. 7. Нечетко-оптимальное управляющее воздействие

Решение сформулированной ранее нечетко-оптимальной задачи найдено численно из соотношения (5). Результаты расчетов представлены на рис. 6–9. Степень удовлетворения полученного решения заданным условиям составляет 0,9842.

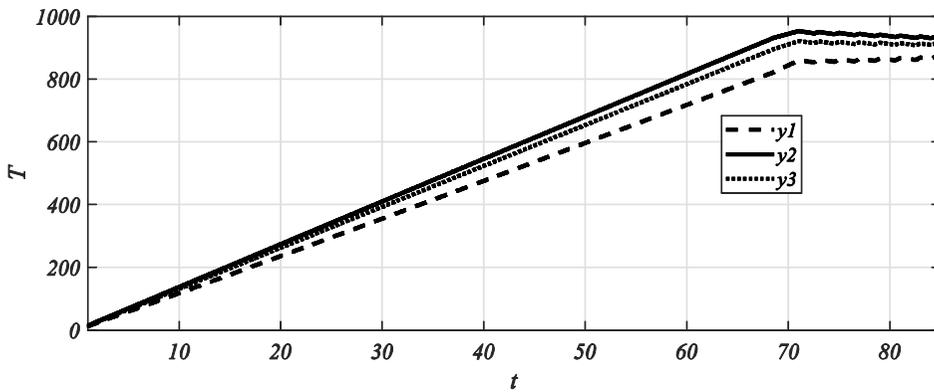


Рис. 8. Нечетко-оптимальная траектория

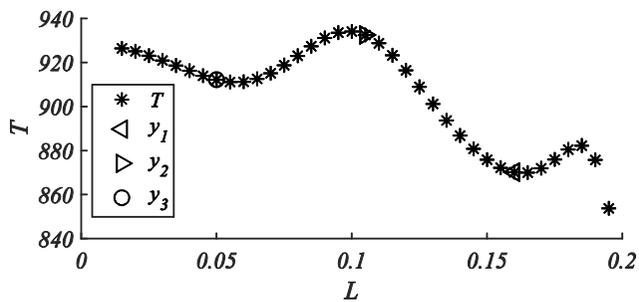


Рис. 9. Нечетко-оптимальное распределение температуры в конце процесса

Заключение

Рассмотрена задача многокритериального нечетко-оптимального позиционного управления объектом технологической теплофизики с распределенными параметрами на примере установки индукционного нагрева. Формулировка задачи как требование к конечному (необходимо довести среднюю температуру изделия до заданного значения) и промежуточным (имеется ограничение на перепад температур в ходе нагрева и последующей стабилизации) состояниям учитывает нечеткий характер критериев качества. Численный метод решения задачи базируется на представлении алгоритма управления в виде априори не фиксируемой и переменной во времени системы правил, определяемых в ходе технологического процесса. В качестве ресурсов управления используются три канала управления с двумя вариантами воздействия, $u_i \in \{0,1\}$, $i = 1, 2, 3$ по каждому из каналов. Для получения информации о ходе технологического процесса, применяемой в расчетах управляющих воздействий, используются показания трех датчиков температуры, размещенных в характерных точках нагреваемого изделия. На каждом временном шаге срабатывания регулятора управляющий сигнал зависит от координат y_i , $i = 1, 2, 3$ объекта управления и корректируется по мере нагрева. Представлены результаты численного моделирования, подтверждающие эффективность предлагаемого подхода. Дальнейшее исследование будет посвящено анализу качества работы системы управления в условиях неопределенностей, связанных с неточностью модели объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
2. Belton V., Stewart T.J. Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston: Kluwer, 2002. 362 p.
3. Wallenius J., Dyer J.S., Fishburn P.C. [et al]. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead // Management Science. 2008. Vol. 54. Pp. 1336–1349.
4. Пиявский С.А. Новые методы принятия решений: теория и приложения. – Самара: СГАСУ, 2014. – 118 с.
5. Полтавский А.В., Семенов С.С., Воронов Е.М. и др. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 520 с.
6. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-making in Fuzzy Environment // Management Science. 1970. Vol. 17. No. 4. Pp. 141–160.
8. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
9. Дилженский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 397 с.
10. Рогачев Г.Н., Рогачев Н.Г. Нечеткая оптимизация в задачах планирования перемещений роботизированных складских погрузчиков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 18–30.
11. Митрошин В.Н., Рогачев Г.Н., Чотковский Б.К., Рогачев Н.Г. Применение нечеткой логики в задачах оптимизации непрерывно-дискретных систем управления многооперационными технологическими процессами // Автометрия. – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 71–78.
12. Васильев Ф.И. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
13. Подиновский В.В., Гаврилов В.М., Оптимизация по последовательно применяемым критериям. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 194 с.
14. Ногин В.Д. Множество и принцип Парето. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. – 100 с.

15. *Yager R.R., Zadeh L.A.* An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992. 356 p.
16. *Carlsson C., Fullèr R., Giove S.* Optimization under fuzzy rule constraints // Belgian Journal of Operational Research, Statistics and Computer Sciences. 1998. Vol. 38 (2–3). Pp. 17–24.
17. *Optimization Toolbox™ User's Guide.* https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/optim/optim.pdf (дата доступа 16.12.2020).
18. *Ранопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 291 с.
19. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 271 с.
20. *Рогачев Н.Г., Рогачев Г.Н.* Моделирование электротепловых процессов индукционного нагрева // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: Материалы VI Международной научно-практической конференции. – Тольятти: ТГУ, 2020. – С. 395–399.

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2021 г.

FUZZY OPTIMIZATION OF FEEDBACK CONTROL AT INDUCTION HEATING*

E.Ya. Rapoport, N.G. Rogachev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: erapoport@mail.ru

Abstract. *The problem of multi-criteria fuzzy-optimal feedback control of an induction heater as an object of technological thermophysics with distributed parameters is considered. A general formulation of the fuzzy optimization problem is given, including requirements for the final and intermediate states and taking into account the fuzziness of competing quality criteria. When solving the problem, interconnected electromagnetic and thermal models of the induction heating process were used. The secondary source method was used to simulate electromagnetic processes, and the differential-difference method was used to simulate thermal conductivity. The numerical method for solving the problem is based on the presentation of the control algorithm in the form of an a priori non-fixed and variable system of rules determined during the heating process. The obtained results of numerical modeling confirm the effectiveness of the proposed fuzzy-optimal method for determining the positional control of objects with distributed parameters.*

Keywords: *installation of induction heating, fuzzy optimization, hybrid continuous-discrete system, numerical method, system of rules.*

*The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90061 A, number 19-08-00232.

*Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Nikoly G. Rogachev, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. *Larichev O.I.* Theory and methods of decision making. Moscow: Logos, 2002. 392 p. (In Russian).
2. *Belton V., Stewart T.J.* Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Boston: Kluwer, 2002. 362 p.
3. *Wallenius J., Dyer J.S., Fishburn P.C. [et al].* Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead // *Management Science*. 2008. V. 54. Pp. 1336–1349.
4. *Piyavsky S.A.* New methods of decision making: theory and applications. Samara: SGASU, 2014. 118 p. (In Russian).
5. *Poltavsky A.V., Semenov S.S., Voronov E.M. [et al].* Methods of decision-making in the problems of assessing the quality and technical level of complex technical systems. Moscow: LENAND, 2016. 520 p. (In Russian).
6. *Saati T.* Decision-making. Hierarchy analysis method. Moscow: Radio i svyaz', 1993. 278 p. (In Russian).
7. *Bellman R.E., Zadeh L.A.* Decision – making in Fuzzy Environment // *Management Science*, 1970. Vol. 17. No. 4. Pp. 141–160.
8. *Bellman R., Zade L.* Decision-making in Fuzzy Environment // *Issues of analysis and decision-making procedures*. Moscow: Mir, 1976. Pp. 172–215. (In Russian).
9. *Diligenskiy N.V., Dymova L.G., Sevastianov P.V.* Fuzzy modeling and multicriteria optimization of production systems under conditions of uncertainty: technology, economics, ecology. Moscow: Mashinostroenie-1, 2004. 397 p. (In Russian).
10. *Rogachev G.N., Rogachev N.G.* Fuzzy optimization in the problems of planning the movements of robotic warehouse loaders // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki*. 2018. No. 1 (57). Pp. 18–30. (In Russian).
11. *Mitroshin V.N., Rogachev G.N., Chostkovsky B.K., Rogachev N.G.* Application of fuzzy logic in optimization problems of continuous-discrete control systems for multioperational technological processes // *Avtometriya*. 2019. Vol. 55. No. 4. Pp. 71–78. (In Russian).
12. *Vasiliev F.I.* Optimization methods. Moscow: Factorial Press, 2002. 824p. (In Russian).
13. *Podinovskiy V.V., Gavrilov V.M.* Optimization according to consistently applied criteria. Moscow: LENAND, 2016. 194 p. (In Russian).
14. *Nogin V.D.* The set and the Pareto principle. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2020. 100 p. (In Russian).
15. *Yager R.R., Zadeh L.A.* An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992. 356 p.
16. *Carlsson C., Fullèr R., Giove S.* Optimization under fuzzy rule constraints // *Belgian Journal of Operational Research, Statistics and Computer Sciences*. 1998. Vol. 38 (2–3). Pp. 17–24.
17. *Optimization Toolbox™ User's Guide*. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/optim/optim.pdf (accessed December 16, 2020).
18. *Rapoport E.Ya.* Analysis and synthesis of automatic control systems with distributed parameters. Moscow: Vysshaya shkola, 2005. 291 p. (In Russian).
19. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Theory and calculation of induction heating devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 271 p. (In Russian).
20. *Rogachev N.G., Rogachev G.N.* Modeling of electrothermal induction heating processes // *Proceedings of the VI International scientific and practical conference "Applied mathematics and informatics: modern research in the field of natural and technical sciences"*, Togliatti: TSU, 2020, Pp. 395–399. (In Russian).

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 004.772

СЕНСОРНЫЕ СЕТИ – РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Б.Я. Лихтциндер

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: lixt@psuti.ru

***Аннотация.** Рассматриваются задачи контроля и управления территориально распределенными объектами. Рассмотрены сенсорные сети, работающие по технологии ZigBee. Приведены характеристики стандарта 802.15.4 ZigBee. Показаны преимущества этой технологии при построении сетей, мало критичных к задержкам трафика. Рассмотрены элементы такой сети. Рассмотрены первичные преобразователи, применяемые в таких сетях, и их энергетические характеристики. Рассмотрены вопросы уменьшения и компенсации задержек в цепях управления. Показана целесообразность применения при управлении распределенными системами методов прогнозирования, которые основаны на предметно ориентированных моделях.*

***Ключевые слова:** сенсорные сети, первичные преобразователи, измерение, управление, задержки.*

Введение

Существует множество областей, в которых необходимо контролировать ряд изменяющихся параметров объектов, расположенных на значительных расстояниях друг от друга [1]. Это охрана окружающей среды и природоведение, контроль экологических параметров в сельском хозяйстве, контроль состояния зданий и инженерных сооружений, контроль и мониторинг транспортных средств, системы контроля и управления инженерным хозяйством, системы обнаружения и слежения, промышленное управление, мониторинг и сбор данных о технологических процессах, индивидуальное медицинское диагностирование с помощью

Лихтциндер Борис Яковлевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Сети и системы связи».

датчиков, размещенных на перемещающемся пациенте, и многое другое. Для решения таких задач используются беспроводные и проводные сенсорные сети (БСС), которые собирают информацию от распределенных в пространстве первичных преобразователей – датчиков и доставляют ее к средствам обработки, выполняя функции информационно-измерительных систем. Если получаемые данные не используются для изменения состояния контролируемого объекта, то такой процесс называют пассивным мониторингом. Если результаты обработки используются для управления контролируемым объектом, то такая сеть может рассматриваться как распределенная информационно-управляющая система, а процесс управления называют активным мониторингом.

Распределенные информационно-измерительные системы

Информационно-измерительные системы существуют уже много лет. Различные сенсорные устройства, датчики подключались к центральному обрабатываемому устройству аналогично тому, как терминальные устройства подключались к центральной ЭВМ. Информация обрабатывалась централизованно и выдавалась потребителю. Датчики не могли размещаться на удаленном расстоянии от центральной ЭВМ и подключались с помощью специальных соединительных кабелей. Информация передавалась в аналоговом виде и преобразовывалась в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который поочередно подключался к сенсорным устройствам. АЦП были громоздкими и весьма дорогими. Потеря точности за счет передачи аналоговых сигналов послужила причиной разработки малогабаритных АЦП, которые устанавливались вблизи датчиков и передавали информацию в цифровой форме. Развитие цифровой элементной базы позволило осуществить такой переход. Одновременно уменьшались размеры цифровых обрабатывающих устройств и увеличивалась их вычислительная мощность. Появились малогабаритные контроллеры, которые собирали информацию от близлежащих датчиков. При этом уменьшилось количество соединительных линий. Вычислительные мощности приближались к измерительным преобразователям. Создание больших интегральных схем (БИС) с высоким уровнем интеграции позволило совмещать контроллерную обработку информации от датчиков с самим измерительным процессом, встраивая вычислительные мощности в измерительные преобразователи. Появились «умные» сенсорные устройства, адаптирующиеся к изменению условий измерений. Уменьшались не только физические размеры устройств цифровой обработки, но уменьшалось также их энергопотребление, увеличивался срок непрерывной работы с автономным малогабаритным источником энергии. Низкая стоимость интеллектуальных сенсорных устройств привела к широкому их распространению. Информация уже собирается от сотен и даже тысяч таких устройств, и возникли проблемы с их подключением к устройствам, собирающим информацию. Все шире начинаются создаваться сети, передающие информацию по радиоканалам. Измерительная информация начинает передаваться по радиосетям с использованием стандартных протоколов. В указанных целях широко используются Wi-Fi сети, характеристики которых позволяют передавать информацию на расстояние более одного километра. Однако стандартные протоколы оказались слишком громоздкими для передачи медленно изменяющихся измерительных данных, а сами точки доступа и другие сетевые устройства – слишком дорогими ввиду своей высокой универсальности. Для большин-

ства приложений не требовалось столь высоких скоростей передачи, однако требовалось большое количество таких узлов. Размещение датчиков на больших площадях потребовало бы увеличение мощности их передатчиков, что невозможно из-за ограниченности их источников энергии. Решить проблему позволило применение MESH сетей, когда информация транслируется промежуточными приемопередатчиками. При этом приемопередатчики конструктивно объединяются с датчиками в один узел. Топология сети изменяется, сеть становится самоорганизующейся, и для ее функционирования потребовались новые специальные протоколы. Так появилось понятие «беспроводные сенсорные сети» (БСС) – сети, объединяющие сенсорные преобразователи и средства передачи измерительной информации и информации управления.

Технология ZigBee

Для построения таких сетей наиболее часто применяется технология ZigBee. На сегодняшний день ZigBee является наиболее перспективной технологией для построения беспроводных сетей с небольшими объемами передаваемой информации [3–7]. Протокол ZigBee изначально разрабатывался для объединения в сеть большого количества автономных устройств, например датчиков и выключателей с батарейным питанием. Трансиверы, отвечающие стандарту 802.15.4, могут использоваться как самостоятельные устройства, если разработчику нужно организовать связь «точка – точка» или «звезда». Для организации полноценной сети ZigBee необходимо добавить микроконтроллер, в который должен быть загружен набор управляющих программ, так называемый стек протоколов ZigBee, который обеспечивает возможность самоорганизации и самовосстановления сети. Сеть сама определяет оптимальный маршрут передачи данных, а 16-разрядная адресация позволяет находиться в одной сети 65 тысячам устройств. Это бывает необходимым при построении единых сетей на больших промышленных предприятиях. Дальность связи в условиях прямой видимости между двумя устройствами может достигать нескольких километров. Важным также является и тот факт, что данные в ZigBee-сетях могут передаваться по цепочке устройств, своего рода эстафетой, что в сочетании с развитыми средствами самонастройки сильно упрощает развертывание сети на больших площадях. Стандарт также предполагает 128-битное AES-шифрование данных, что позволяет использовать его в различных системах безопасности.

Для работы устройств по стандарту ZigBee выделены три диапазона частот: 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц. Первый диапазон используется только в Европе, второй – только в Америке и Австралии, а третий является международным и используется в том числе в России. Государственная комиссия по радиочастотам РФ приняла в мае 2007 года решение о выделении физическим и юридическим лицам на территории РФ полосы радиочастот 2400–2483,5 МГц для применения устройств малого радиуса действия (ZigBee) с мощностью до 100 мВт. Использование указанных полос может осуществляться без оформления отдельных решений ГКРЧ и разрешений на их использование. Спецификация стандарта приведена в таблице.

Рассмотрим характеристики микроконтроллера JN5148 [7]. Это базовый МК, на основе которого изготавливаются готовые модули, различающиеся в основном типом и способом подключения антенны. МК JN5148 является устройством с весьма малым током потребления. Этот высокопроизводительный беспроводной МК ориентирован на работу с сетевыми приложениями ZigBee PRO.

Спецификация стандарта ZigBee

Стандарт	802.15.4 ZigBee		
Частота	868 МГц	915 МГц	2,4 ГГц
Число каналов/полоса	1/-	10/2 МГц	16/5 МГц
География распространения	Европа	Америка	Весь мир
Макс. скорость и тип модуляции	20 кбит/с, BPSK	40 кбит/с, BPSK	250 кбит/с, O-QPSK
Выходная мощность, ном.	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)	0 dBm (1 мВт)
Дальность	10–100 м		
Чувствительность (спецификация)	-92dBm	-92dBm	-85dBm
Размер стека	4–32 кбайт		
Срок службы батареи	От 100 до 1000 и более дней		
Размер сети (число узлов)	65536 (16-разрядные адреса), 264 (64-разрядные адреса)		

В состав МК входит (рис. 1) 32-разрядный RISC-процессор с высоким быстродействием, приоритетной обработкой прерываний и программно регулируемой тактовой частотой. Также МК включает в себя 2.4 ГГц приемопередатчик по стандарту IEEE802.15.4, 128КБ ПЗУ, 128КБ ОЗУ, широкий выбор интерфейсов для подключения аналоговых и цифровых периферийных устройств. Большой объем памяти позволяет обрабатывать приложение пользователя совместно со стеком ZigBee Pro. Низкий ток потребления (18 мА в активном режиме) позволяет использовать обычные литиевые батарейки-таблетки. МК работает, как правило, в импульсном режиме с большой скважностью, проводя большую часть времени в спящем режиме с током потребления менее 1мкА, поэтому средний ток потребления от батареи оказывается небольшим и тем самым обеспечивается большой срок службы без замены батареи.

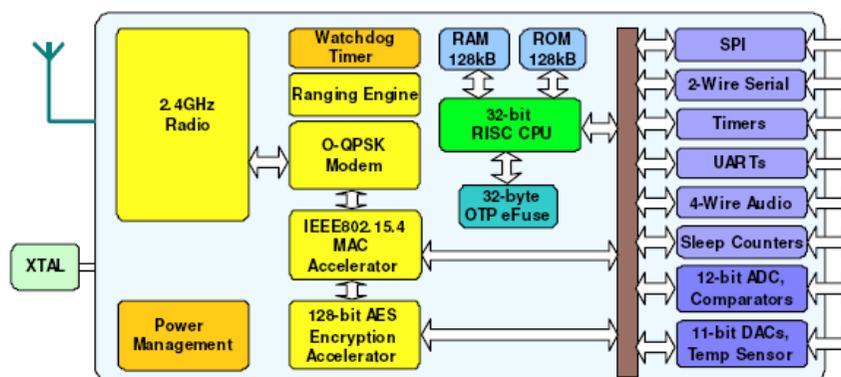


Рис. 1. Микроконтроллер JN5148

В приборе имеются счетчики импульсов с низким потреблением, работающие в спящем режиме, которые спроектированы для подсчета импульсов в AMR приложениях. Для подключения к внешним устройствам и для работы со звуком предусмотрен 4-проводной интерфейс I2S.

Основные характеристики приемопередатчика:

- частота 2.4 ГГц, соответствие стандарту IEEE802.15.4;
- имеется система позиционирования, которая по задержкам сигналов от смежных узлов оценивает свое местоположение;
- 128-битное шифрование данных AES;
- MAC ускоритель с пакетным форматированием, CRC, проверкой адреса и перезапросом при недопустимом количестве ошибок; таймеры;
- возможность передачи данных на скоростях 500 и 667 Кб/с;
- спящий режим для экономного потребления;
- напряжение питания 2.0–3.6 В, возможность работы от батареек;
- потребление в спящем режиме 0.12 мкА;
- потребление в спящем режиме с включенным таймером 1.25 мкА;
- стоимость дополнительных компонентов не превышает \$ 0,50;
- ток потребления при передаче 18 мА;
- ток потребления при приеме 15 мА;
- чувствительность приемника -95 дБм;
- мощность передатчика 2.5 дБм.

JN5148 требует минимального количества внешних компонентов для беспроводной передачи данных: кристалл, флэш-память, компоненты согласования и антенна – это все, что требуется для устойчивой работы при минимальной стоимости компонентов и с наименьшим размером модуля. Постоянная память ROM реализована на ОЗУ статического типа, которое хранит информацию только при подключенном питании; при первоначальном включении содержимое ROM переписывается из флэш-памяти. Достоинством сетей с такими модулями является то, что их развитие и модернизация не требуют аппаратурных перестроек и производятся перемещением положения узлов на контролируемой территории, добавлением новых элементов и модификацией программного обеспечения.

Первичные преобразователи

Как и в любых информационно-измерительных системах, основой получения информации в сенсорных сетях являются первичные преобразователи (датчики).

В рассмотренных выше блоках датчики являются внешними устройствами, подключаемыми через соответствующие интерфейсы. Однако в последнее время наметилась тенденция к интеграции чувствительных элементов первичных преобразователей непосредственно в модуль управления и приемопередачи, как это показано на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема встроенных датчиков

Энергопотребление

Мощность, потребляемая от встроенного источника питания, максимальна при наличии передачи информации. В частности, усилитель мощности должен направить достаточно энергии, чтобы приемная антенна и сам приемник обеспечили требуемое превышение уровня сигнала над уровнем шумов. В типичной беспроводной системе мощность источника питания P_{Bat} определяется потерями на пути распространения сигнала и необходимой мощностью на входе приемной антенны в соответствии со следующей формулой [8]:

$$P_{pr} = P_{Bat} \left(\frac{P_{prd}}{P_{Bat}} \right) \left(\frac{P_{izl}}{P_{prd}} \right) \left(\frac{P_I}{P_{izl}} \right) \left(\frac{P_{pr}}{P_I} \right) = P_{Bat} (\eta_{prd} \cdot \eta_{ant} \cdot \eta_{izl} \cdot \eta_{pra}) \leq P_{ш} (C / Ш),$$

где $P_{Bat}, P_{prd}, P_{izl}, P_I$ и P_{pr} – мощности источника питания, усилителя передатчика, излученная мощность антенны передатчика, мощность на приемной антенне и на входе приемника соответственно, а $\eta_{prd}, \eta_{ant}, \eta_{izl}, \eta_{pra}$ – коэффициенты передачи передатчика, передающей антенны, среды распространения и приемной антенны. $C/Ш$ – необходимое отношение сигнал/шум, $P_{ш}$ – мощность шума, приведенная ко входу приемника.

$$P_{ш} = kT\Delta f,$$

где Δf – полоса частот сигнала (предполагается, что шум в полосе частоты сигнала аддитивный и имеет гауссовское распределение).

Коэффициент передачи среды распространения обратно пропорционален квадрату расстояния между антеннами:

$$\eta_{izl} = \left(\frac{C}{4\pi df_c} \right)^2 (1 - |K|^2),$$

где C – скорость света, d – расстояние между антеннами, f_c – несущая частота сигнала, K – коэффициент отражения антенны.

В результате формула для расчета необходимой мощности источника питания принимает следующий вид:

$$P_{Bat} = \frac{(C / Ш)kT\Delta f}{\eta_{prd} \cdot \eta_{ant} \cdot \eta_{pra} \cdot \left(\frac{C}{4\pi df_c}\right)^2 (1 - |K|^2)}.$$

То есть необходимая мощность прямо пропорциональна полосе пропускания, отношению сигнал/шум и квадратам несущей частоты и расстояния до приемной антенны и обратно пропорциональна коэффициентам передачи усилителя и обеих антенн – передающей и приемной. Формула указывает на необходимость уменьшения до минимально возможных значений полосы пропускания, несущей частоты и дистанции передачи.

Первой проблемой, встающей перед разработчиком автономных датчиков, является интеграция в микросхему источника питания. Такой ИП должен содержать в малом объеме достаточно энергии, чтобы обеспечить его автономное функционирование в течение нескольких дней, месяцев или даже лет. Тонкопленочные литий-ионные аккумуляторные батареи довольно удобны и имеют приемлемую емкость, однако ее недостаточно для питания реального электронного устройства при приемлемых размерах. Определенный интерес представляет подзарядка или замена аккумуляторных элементов в труднодоступных местах с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [9].

Распределенные информационно-управляющие системы

Если в состав сенсорной сети в качестве конечных элементов включить исполнительные устройства, то в ней появятся функции распределенной управляющей системы. Исполнительные устройства работают на основе информации, получаемой из сети, и осуществляют воздействие на объект управления с целью приведения его в требуемое состояние. Если объект управления содержит чувствительные элементы, характеризующие текущее состояние объекта, и указанные чувствительные преобразователи направляют в сеть информацию о реальном состоянии объекта, то возникает эффект «обратной связи», замыкающей контур управления. Специалистам в области управления хорошо известно, что даже небольшие запаздывания в цепи обратной связи не только вызывают ухудшение качества процесса управления, но и могут привести к потере устойчивости всей системы в целом. В распределенных информационно-управляющих системах задержки в цепях обратной связи обусловлены в основном сетевыми задержками, которые могут достигать весьма значительных размеров. Сетевые задержки возникают по двум причинам: это задержки в цепях коммутации пакетов и задержки распространения сигналов в среде передачи. Именно поэтому сети ZigBee, хорошо зарекомендовавшие себя в низкоскоростных системах управления, становятся совершенно непригодными во многих управляющих системах промышленного применения.

Уменьшение задержек в цепях коммутации

Сегодня существует несколько вариантов промышленного Ethernet (Industrial Ethernet), имеющих самые различные протоколы работы. Появление различных модификаций промышленного Ethernet обусловлено тем, что несмотря на весьма большую пропускную способность сети обычные протоколы Ethernet, основанные

на случайном методе доступа абонентских устройств к ресурсам сети, не дают гарантии передачи информации за определенный, ограниченный промежуток времени. В большинстве случаев протоколы Industrial Ethernet, выбранные для использования в промышленных устройствах, различаются у различных производителей. Устройства совместимы только с оборудованием того поставщика, который использует данный протокол. Это заставляет клиентов покупать все промышленное оборудование от одного производителя (даже если это не наиболее экономично) или преодолевать значительные проблемы интеграции оборудования от нескольких поставщиков путем преобразования протоколов с помощью шлюзов.

Ситуация кардинально изменяется с появлением сетей TSN (Time-Sensitive Networking) [10]. Эти сети, совместимые с Ethernet, способны передавать чувствительные к задержкам пакеты с минимально возможными задержками. Они совместили в себе все положительные свойства сетей Ethernet с возможностью получения детерминированной задержки сетей TDM, предоставив абсолютный приоритет более высокоприоритетным пакетам. Основная идея TSN может быть понятна из рис. 3.

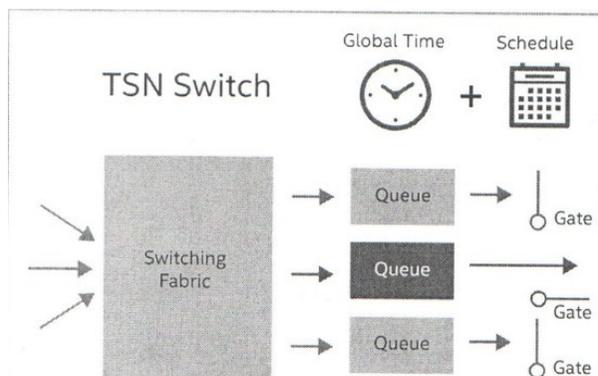


Рис. 3. Коммутация на выходе TSN-коммутатора

На рисунке показан выход коммутирующей матрицы, подключенной к одному из выходных портов коммутатора. Образующаяся на выходе порта очередь разделяется на несколько отдельных очередей в соответствии с приоритетами находящихся в них пакетов. Пакеты из указанных очередей попеременно направляются на выход коммутатора, образуя каждый раз поток пакетов с одноименным приоритетом. Передача каждого из потоков происходит в течение программно-управляемого временного окна. Таким образом, коммутирование пакетов внутри одного канала происходит с применением TDMA. Коммутация потоков производится по программно формируемому расписанию, обеспечивающему минимизацию задержек высокоприоритетных потоков. Ряд пакетов, следующих от одного источника к одному общему получателю, могут объединяться в сообщения, при этом все «окна» по пути следования указанного сообщения должны открываться одновременно, минимизируя время задержки пакетов в коммутаторах.

Ключевыми особенностями TSN, обеспечивающими гарантированные сроки доставки сообщений, являются синхронизация времени и планирование трафика. Они отражены в стандартах 802.1AS и 802.1Qbv соответственно. Все устройства, участвующие в сети TSN, синхронизированы с глобальным временем и «знают» о сетевом расписании, определяющем, как расставлены приоритеты и когда сообщения будут пересылаться с каждого коммутатора.

Своевременный выпуск сообщений из коммутатора гарантирует, что задержки в сети удастся предсказать детерминистически. Это позволяет объединить критичный и некритичный ко времени трафик в единой сети.

Для рынка промышленной автоматизации, который много лет боролся со множеством несовместимых протоколов связи, TSN предоставляет ряд преимуществ:

- TSN гарантирует совместимость на сетевом уровне между устройствами от разных производителей. Это дает клиентам гораздо больший выбор устройств для своей системы, позволяет избегать привязки к поставщику и обеспечивает связь между различными системами;

- поскольку TSN является частью семейства стандартов Ethernet, он, естественно, масштабируется с Ethernet. Это означает, что технология не будет ограничена с точки зрения пропускной способности или других критериев эффективности;

- TSN может использоваться для связи между машинами, а также от машин к корпоративным системам. Связь между критически важными системами можно осуществлять на основе TSN, а существующие, некритичные ко времени системы могут быть связаны посредством сети Ethernet.

Учет задержек в среде распространения сигналов

Задержки в среде распространения сигналов имеют физическую природу и не могут быть устранены при заданном размере сети. Однако они создают запаздывание как в цепях прямого канала, так и в цепях каналов обратной связи и могут оказать значительное влияние на качество и даже устойчивость процесса управления. С целью компенсации негативного влияния задержек в среде распространения, а также задержек в цепях коммутации используют *методы прогнозирования* процессов в системах управления. [2, 11–15]. Прогнозирование осуществляется методами математического моделирования. Различают два вида моделей, применяемых в целях прогнозирования: это модели, связанные с данной предметной областью, и модели в виде временных рядов. Модели в виде временных рядов достаточно просты, не связаны с данной предметной областью и применяются в сенсорных сетях в основном для сжатия передаваемых данных. К математическим методам, реализующим подобные модели, можно отнести методы экстраполяции тенденций (параболическая экстраполяция, метод подбора функций, метод скользящего окна и другие). Для распределенных информационно управляющих сетей, которые критичны к весьма малым задержкам, применяются в основном модели

предметной области. С повышением динамичности управляемости подобных систем, появлением скоростных компьютерных сетей такие модели, несомненно, получат свое дальнейшее развитие.

В качестве примеров одной из таких систем рассмотрим систему управления роем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представленную на рис. 4.

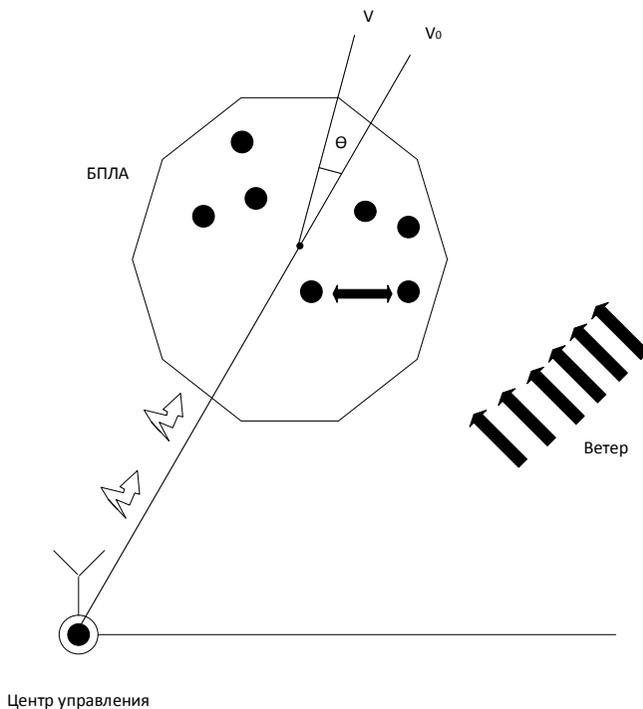


Рис. 4. Управление роем БПЛА

Рой таких БПЛА управляется из общего Центра управления и должен иметь направление и скорость перемещения центра роя, заданные вектором V_0 . Под воздействием ветра и иных внешних факторов перемещение центра роя отклоняется от заданного направления на угол θ и происходит в направлении вектора V . Изучая статистику перемещения центра роя, можно построить экстраполяционную модель вектора этого перемещения и передать каждому БПЛА упреждающий сигнал управления. Однако для качественного управления необходимо иметь также предметную модель самого БПЛА как объекта управления. Именно такая модель позволит управлять быстро протекающими процессами и исключить возможность столкновения соседних БПЛА. Следует отметить, что для уменьшения запаздываний управляющих сигналов контуры автоматического управления, исключая возможность столкновения БПЛА, целесообразно замыкать непосредственно между самими БПЛА, исключив из них Центр управления.

Рассмотренный пример показывает возможности применения БСС в качестве основы распределенных информационно-управляющих систем.

Заключение

Беспроводные сенсорные сети получили мировое признание в ведущих организациях по стандартизации. Тщательная проработка физического, канального, сетевого и транспортного уровней модели ISO/OSI создали хороший задел для быстрой разработки и внедрения сенсорных сетей во все сферы жизнедеятельности. Повсеместное внедрение сенсорных сетей явилось основой для перехода к концепции интернета вещей. Три ключевых параметра: низкое энергопотребление, самоорганизация и безопасность позволяют им и по сей день оставаться незаменимыми для сбора данных различных приложений. Таким образом, БСС, несомненно, являясь распределенными информационно-измерительными системами, заложили основу создания распределенных информационно-управляющих систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лихтциндер Б.Я., Киричек Р.В., Голубничая Е.Ю., Федотов Е.Д., Кочуров А.А.* Беспроводные сенсорные сети. – М.: Горячая линия-Телеком, 2020. – 236 с.
2. *Тиханычев О.В.* Прогнозирование при управлении динамическими системами // Программные продукты и системы. – 2017. – № 1. – С. 40–44.
3. ZigBee Alliance. ZigBee Specification. <http://www.ZigBee.org>
4. *Незнамов Ю., Козаченко В.* Перспективы использования беспроводных ZigBee-интерфейсов в электроприводе // Электронные компоненты. – 2008. – № 11.
5. *Варгаузин В.* Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 // Теле Мультимедиа. – 2005. – № 6.
6. *Кривченко Т.* Технология ZigBee // Коммунальный комплекс России. – 2006. – № 4.
7. *Еркин А.* Разработка распределенных систем контроля датчиков на основе защищенных низко потребляющих беспроводных ZigBee-сетей на базе микроконтроллеров фирмы Jennic // Беспроводные устройства CHIP NEWS#1= 2010. – С. 1–9.
8. *Ринси-Мора Г., Вогт Дж.* Беспроводные датчики с автономным питанием // Электронные компоненты. – 2007. – № 11. – С. 51–56.
9. *Лихтциндер Б.Я., Маслов О.Н.* Способ подзарядки аккумуляторов в беспроводной сенсорной сети. Патент на изобретение № 2730468 от 24.08.2020.
10. *Brooks' S., Uludag E.* Time-Sensitive Networking: From Theory to implementation in Industrial Automation // White Paper, Intel, WP-01279-1.0. Pp. 1–7.
11. *Выпускняк В.И., Гуральник А.М., Тиханычев О.В.* Моделирование военных действий – история, состояние, перспективы развития // Военная мысль. – 2014. – № 7. – С. 28–37.
12. *Денисов В.И., Саяпин О.В., Тиханычев О.В.* О месте математического моделирования в органах военного управления // Военная мысль. – 2016. – № 5. – С. 28–33.
13. *Тиханычев О.В., Саяпин О.В.* Оперативное прогнозирование развития обстановки как основа успешного управления применением войск (сил) // Военная мысль. – 2015. – № 4. – С. 3–7.
14. *Новиков Д.А., Чхартшвили А.Г.* Активный прогноз. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2002. – 101 с.
15. *Цигичко В.Н.* Модели в системе принятия военно-стратегических решений в СССР. – М.: Имперіум-Пресс, 2005. – 96 с.

Статья поступила в редакцию 14 января 2021 г.

ENSOR NETWORKS – DISTRIBUTED INFORMATION MEASURING AND INFORMATION CONTROL SYSTEMS

B.Ya. Likhhtsinder

Povolzhsky State University of Telecommunications and Informatic
23, L. Tolstoy st., Samara, 443010, Russia

Abstract. *The problems of control and management of geographically distributed objects are considered. The sensor networks operating on the ZigBee technology are considered. The characteristics of the 802.15.4 ZigBee standard are given. The advantages of this technology are shown when building networks that are not very critical to traffic delays. The elements of such a network are considered. The primary converters used in such networks and their energy characteristics are considered. The issues of reducing and compensating delays in control circuits are considered.*

It is shown that modern wireless sensor networks can be considered as distributed information measuring and information control systems.

Keywords: *sensor networks, measurement, control, feedback, modeling, sensors, delay.*

REFERENCES

1. *Likhhtzinder B.Ya., Kirichek R.V., Golubnichaya E.Yu., Fedotov E.D., Kochurov A.A.* Wireless sensor networks // Scientific and technical publishing house "Hot line-Telecom". Moscow, 2020. 236 p.
2. *Tikhanychev O.V.* Forecasting when controlling dynamic systems // Software products and systems # 1 2017. Pp. 40–44.
3. ZigBee Alliance. ZigBee Specification. <http://www.ZigBee.org>
4. *Neznamov Y., Kozachenko V.* Prospects for the use of wireless ZigBee interfaces in an electric drive // Electronic components. – 2008. – № 11.
5. *Vargauzin V.* Radio networks for data collection from sensors, monitoring and control based on the IEEE 802.15.4 standard // Tele Multimedia. – 2005. – № 6.
6. *Krivchenko T.* ZigBee Technology // Communal Complex of Russia. – 2006. – № 4.
7. *Erkin A.* Development of distributed sensor control systems based on secure low-power wireless ZigBee networks based on Jennic microcontrollers // Wireless CHIP NEWS # 1 = 2010. Pp. 1–9.
8. *Rinsey-Mora G., Vogt J.* Self-powered wireless sensors // Electronic components. 2007. No. 11. Pp. 51–56.
9. *Likhhtsinder B.Ya., Maslov O.N.* Method for recharging batteries in a wireless sensor network. Patent for invention No. 2730468 dated 24.08.2020.
10. *Brooks' S., Uludag E.* Time-Sensitive Networking: From Theory to implementation in Industrial Automation // White Paper, Intel, WP-01279-1.0. Pp. 1–7.
11. *Vypusknyak V.I., Guralnik A.M., Tikhanychev O.V.* Modeling of military operations – history, state, development prospects // Military Thought. 2014. No. 7. Pp. 28–37.
12. *Denisov V.I., Sayapin O.V., Tikhanychev O.V.* On the place of mathematical modeling in military command and control bodies // Military Thought. 2016. No. 5. Pp. 28–33.
13. *Tikhanychev O.V., Sayapin O.V.* Operational forecasting of the development of the situation as the basis for successful control of the use of troops (forces) // Military Thought. 2015. No. 4. Pp. 3–7.
14. *Novikov D.A., Chkhartishvili A.G.* Active forecast. M.: Publishing house of IPU RAN, 2002. 101 p.
15. *Tsigichko V.N.* Models in the system of making military-strategic decisions in the USSR. Moscow: Imperium-Press, 2005. 96 p.

УДК 620.19

**ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗАВИСИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ
ПЛАСТИНЫ ОТ ТОЛЩИНЫ ОТЛОЖЕНИЙ*****Е.Е. Ярославкина, А.В. Суслов***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: k0046979@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема асфальтосмолопарафиновых отложений при добыче нефти и нефтепродуктов. Изучены методы измерения отложений. Проведено компьютерное моделирование зависимости собственных частот колебаний металлической пластины от толщины отложений. Подтверждена корреляционная зависимость частоты колебаний объекта контроля от толщины отложений. Проведено экспериментальное исследование отложений. Полученные результаты дают возможность исследования толщины отложений трубопроводов.

Ключевые слова: собственные частоты, корреляционная зависимость, толщина, асфальтосмолопарафиновые отложения, неразрушающий контроль, акустические методы.

В настоящее время этап развития нефтяной промышленности характеризуется осложнениями условий добычи на большинстве нефтяных месторождений. Процессы добычи, сбора и транспортировки нефти сопровождаются комплексом проблем, обусловленных образованием нефтяных эмульсий, образованием на стенках оборудования и трубопроводов асфальтосмолопарафиновых отложений, отложений неорганических солей, наличием в нефти различных механических примесей, а также коррозионным разрушением оборудования и трубопроводов [1].

В настоящий момент большая часть месторождений страны вступает в позднюю стадию разработки и добычи нефти и вопрос о совершенствовании технологических процессов становится особо актуальным [2].

Одной из проблем в данной сфере является образование на стенках трубопроводов и технологического оборудования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) [1].

Под механизмом отложения АСПО понимается комплекс процессов, обуславливающий накопление твердой фазы смолопарафиновой смеси на поверхности трубопроводов и оборудования. Существует множество факторов, приводящих к процессу «парафинизации»: разность температур в пласте и на поверхности скважины, изменение давления и скорости потока, наличие газа в смеси нефти, а также сам состав углеводородов в смеси нефти [3]. В работе [2] отмечают, что основ-

Ярославкина Екатерина Евгеньевна (к.т.н., доц.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Суслов Антон Владимирович, ведущий инженер кафедры НОАП «Политех НК».

ными объектами, в которых происходит образование отложений парафина, являются скважинные насосы, насосно-компрессорные трубы, линии от скважин, резервуары сборных пунктов. Наиболее интенсивно парафин осаждается на внутренней поверхности подъемных труб скважин. Стоит также отметить, что состав углеводородов зависит от географического расположения скважины, а также меняется с течением времени [4].

Образование АСПО в проточной части уменьшает проходное сечение трубопроводов, что приводит к выводу оборудования из оптимального режима работы и, как следствие, к экономическим потерям и сокращению межремонтных периодов [5, 6]. Помимо трубопроводов, АСПО снижает эффективность работы насосов и другого технологического оборудования, а также является причиной их поломок. Так, в работе [7] указывается, что масса колонны штанг насосных установок вследствие отложения на ней парафина в среднем увеличивается на 600 кг, а количество отказов насоса из-за отложений составляет 72 % от общего числа отказов. А в работе [8] отмечается, что толщина отложений парафинов на дне резервуаров за 3–5 лет может достигать 1,5–2,0 м, что существенно уменьшает объем самих резервуаров.

«Парафинизация» трубопроводов является одной из старых проблем, которая появилась с началом добычи нефти и нефтепродуктов и до настоящего времени остается актуальной [9]. На некоторых месторождениях процесс «парафинизации» и, следовательно, межочистной период занимает всего 15–40 ч [10].

В борьбе с отложениями АСПО можно выделить два направления:

- предотвращение образования отложений;
- удаление сформировавшихся отложений.

В случае применения теплоносителя идет нагрев жидкости в специальном нагревателе (например, в передвижной котельной установке) и затем осуществляется подача этой жидкости в скважину способом прямой или обратной промывки.

Из недостатков таких методов можно выделить их высокую энергоемкость, электроопасность, пожароопасность, ненадежность и низкую эффективность применяемых технологий.

Одним из наиболее известных и повсеместно распространенных методов удаления отложений АСПО является применение различных растворителей, хотя данный метод не лишен существенной проблемы – подбор применяемого растворителя зависит от условий конкретного месторождения и в настоящее время проводится опытным путем.

Для удаления уже образовавшихся отложений также используется механический метод. Существует множество специально разработанных скребков различной конструкции. Однако использование этой группы методов борьбы с отложениями осложняется тем, что для их реализации нередко необходимо остановить работу оборудования. [11].

Ежегодно страны тратят большие средства на очистку трубопроводов и оборудования от отложений АСПО. Для планирования и своевременного проведения очистных мероприятий необходима информация о текущей толщине слоя АСПО на стенках данного оборудования [12–14].

Методы определения толщины отложений

Сформируем ряд требований к методу определения толщины отложений, которые будут характеризовать его оптимальным как со стороны экономической эффективности, так и со стороны практической реализации:

- 1) метод должен быть неразрушающим и не нарушать целостность технологического оборудования;
- 2) метод должен реализовываться при одностороннем доступе к объекту контроля;
- 3) требуется отсутствие технически сложного и дорогостоящего оборудования для контроля;
- 4) должны использоваться простые алгоритмы обработки результатов контроля [15].

Методы определения толщины отложений можно разделить на две группы: прямые и косвенные [16]. Реализация прямых методов осуществляется с прямым доступом внутрь трубопровода или с помощью запуска снаряда.

Косвенные методы определяют толщину отложений, опираясь на различные характеристики как самого оборудования, так и отложений. Есть методы, использующие электрическое сопротивление, скорость потока продукта, теплопроводность, акустические свойства, давление, количество прошедшего продукта и др. [17, 18].

Основными недостатками косвенных методов являются:

- погрешности, вызванные косвенными измерениями;
- сложность алгоритмов вычислений;
- сложность технической реализации.

Анализ существующих методов показал, что для реализации поставленных выше требований подойдут акустические методы неразрушающего контроля. Однако проведенная работа [19] установила, что предложенные на настоящий момент акустические методы имеют ряд недостатков и существует необходимость в разработке нового подхода к измерению отложений.

Компьютерное моделирование

Для проведения теоретического исследования собственных частот была разработана имитационная модель в виде металлической пластины. Вид модели был следующий: материал пластины – сталь 20; плотность 7800 кг/м³; модуль упругости 210·10⁹ Па; коэффициент Пуассона – 0,3; геометрические размеры пластины: 150 мм вдоль оси *OX* и вдоль оси *OY*, толщина 12 мм.

Была поставлена следующая гипотеза: наличие отложений на стенках объекта контроля будет влиять на его частоту собственных колебаний. Для подтверждения поставленной гипотезы проведено исследование свободных колебаний металлической пластины в среде конечно-элементных расчетов T-Flex Анализ программного комплекса T-Flex CAD. В данном программном модуле возможно провести анализ расчета собственных (резонансных) частот конструкции и соответствующих форм колебаний. Результаты используются для повышения надежности и работоспособности изделия в условиях, исключающих возникновение резонансов [20].

Была определена собственная частота первой формы колебаний металлической пластины. Для квадратной пластины, заделанной по краям, аналитическое решение находится по следующему выражению:

$$\omega = \frac{2\pi^2(m+\frac{1}{3})^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (1)$$

где D – изгибная жесткость;

h – толщина пластины;
 ρ – плотность;
 a – размер пластины вдоль оси OX и вдоль оси OY ;
 m – целые числа 1, 2, 3 ... [22]. Для первой формы колебаний $m=1$.
 Изгибная жесткость находится по формуле

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости;
 μ – коэффициент Пуассона;
 h – толщина пластины.

Подставив значения в выражение (1), получим частоту $\omega=29357,33$ Гц.

Соответственно, собственная частота первой формы $f_p = \omega/2\pi = 4674,73$ Гц.

Моделирование в программном комплексе T-Flex CAD с использованием конечно-элементного анализа для заданного объекта контроля показало значение собственной частоты колебаний $f_M = 4518,26$ Гц.

На рис. 1 представлен анализ определения частот пластины в программном комплексе T-Flex CAD.

Задача_1 [Собственные частоты]
 Относительные перемещения, модуль
 Форма 1 - резонансная частота: 4518.259 Гц
 Масштаб перемещений: 0.00

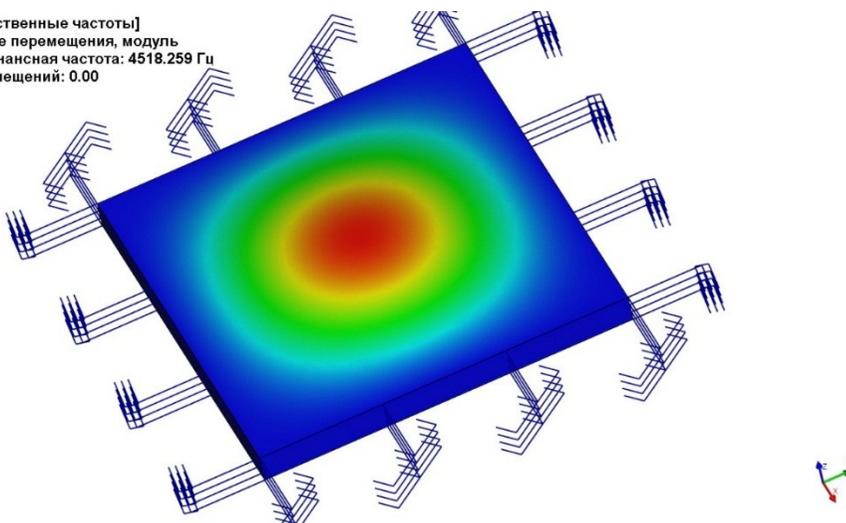


Рис. 1. Свободные колебания пластины

Для определения влияния парафиновых отложений на колебания пластины было проведено последовательное моделирование парафиновых отложений. Было решено провести моделирование последовательно с толщинами от 2 до 14 мм (с шагом в 2 мм).

На рис. 2 представлена модель колебаний пластины с отложением толщиной 14 мм.

По результатам моделирования проведен анализ зависимости резонансной частоты колебаний пластины на каждом шаге. С ростом толщины отложений резонансная частота колебаний стенки уменьшалась. Собственная частота с парафиновыми отложениями толщиной 14 мм составила 4347,92 Гц.

Анализ полученных значений результатов компьютерного моделирования был проведен с помощью метода наименьших квадратов. Для поиска коэффициентов уравнения a и b проведен регрессионный анализ. По результатам анализа получены следующие коэффициенты:

$$a = -11,88, b = 4507,51.$$

Задача_1 [Собственные частоты]
Относительные перемещения, модуль
Форма 1 - резонансная частота: 4347.924 Гц
Масштаб перемещений: 0.00

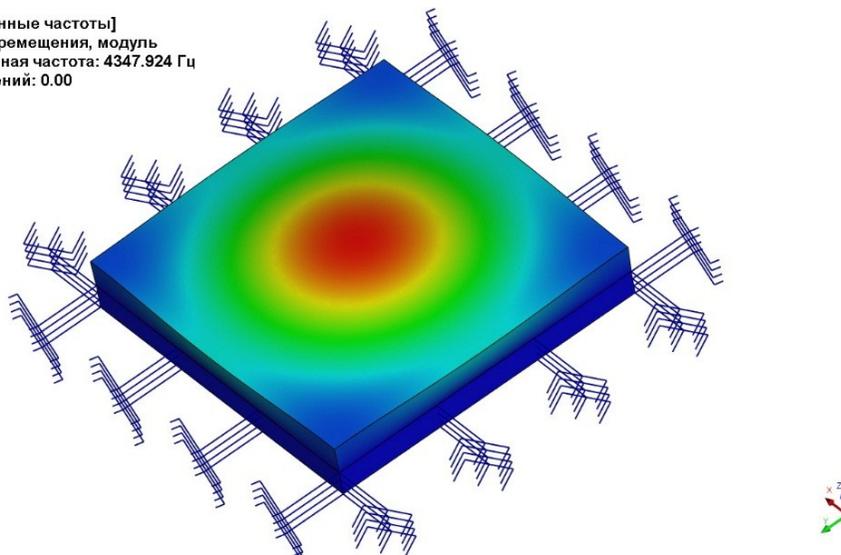


Рис. 2. Собственные частоты пластины с отложениями $h=14$ мм

И, соответственно, уравнение регрессии принимает вид

$$y = -11,88x + 4507,51.$$

Регрессионный анализ показал, что коэффициент детерминации составляет

$$R_2 = 0,99.$$

Результаты компьютерного моделирования представлены на графике (рис. 3).

Если рассматривать металлическую пластину и отложения как единую систему, то наличие отложений будет снижать жесткость системы, которая, в свою очередь, определяет частоту собственных колебаний.

Представим жесткость системы как сумму жесткостей отдельных ее частей. При сохранении граничных условий аналитическое решение примет вид

$$\omega = \frac{2\pi^2(m+\frac{1}{3})^2}{a^2} \sqrt{\frac{D_M+D_0}{\rho_M h_M + \rho_0 h_0}}, \quad (3)$$

где D_M – жесткость металлической пластины;

D_0 – жесткость парафиновых отложений;

ρ_M – плотность пластины;

h_M – толщина пластины;

ρ_0 – плотность отложений;

h_0 – толщина отложений.

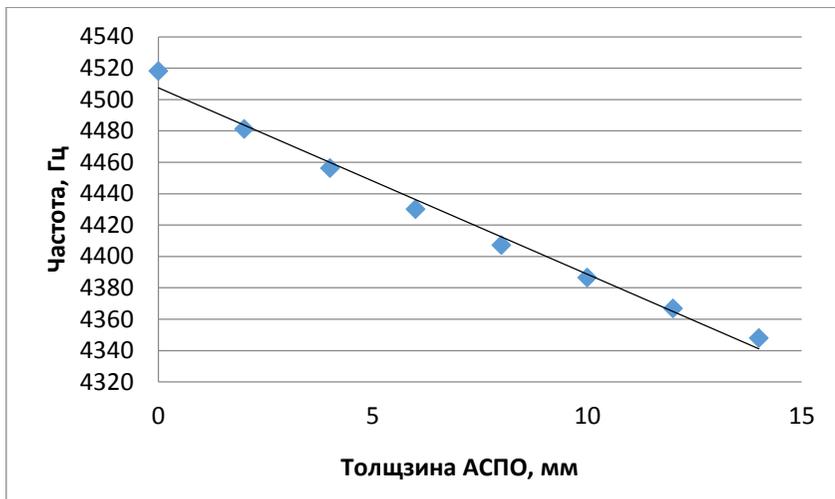


Рис. 3. График зависимости частоты колебаний от толщины отложений (по результатам компьютерного моделирования)

Найдено аналитическое решение для смоделированных ранее толщин парафиновых отложений и проведен их сравнительный анализ. Результаты анализа представлены в таблице.

Сравнение аналитического решения и результатов моделирования

Толщина отложений, мм	Аналитическое решение, Гц	Результат моделирования, Гц	Относительная погрешность, $\delta = \frac{ f_m - f_p }{f_m} \cdot 100\%$
0	4674,73	4518,26	3,47
2	4630,51	4481,22	3,33
4	4588,05	4456,34	2,96
6	4547,82	4430,15	2,66
8	4510,23	4407,24	2,34
10	4475,73	4386,50	2,03
12	4444,71	4366,83	1,78
14	4417,56	4347,92	1,60

На рис. 4 представлены графики аналитического решения и результатов моделирования.

Анализ моделирования показывает наличие прямолинейной зависимости частоты собственных колебаний объекта исследования от толщины отложений.

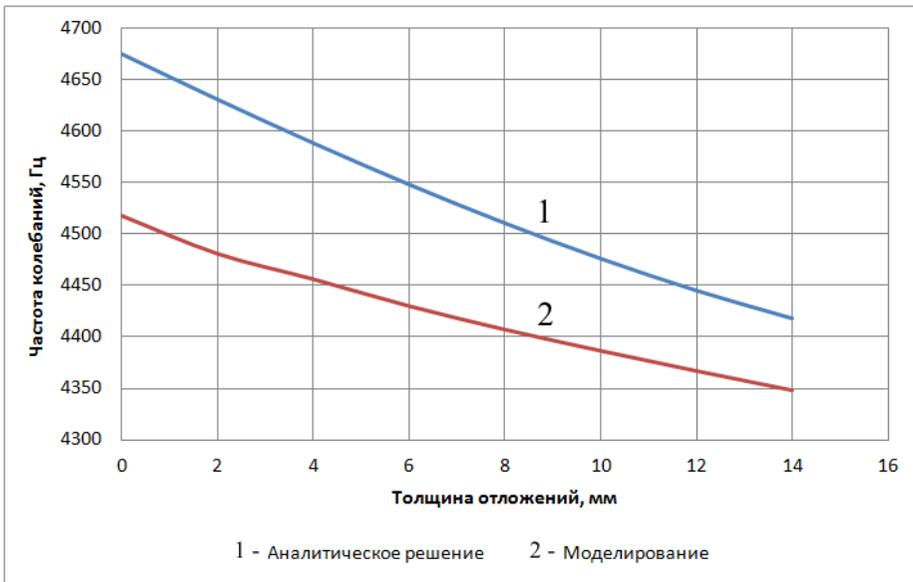


Рис. 4. Сравнение результатов аналитического решения и моделирования

Экспериментальное исследование

Для подтверждения компьютерного моделирования была разработана информационно-измерительная система с применением акустических методов. Принцип работы системы заключается в возбуждении на локальном участке объекта контроля свободных колебаний и измерении их параметров [21].

Эксперимент строился по следующему плану [15]: на участке трубопровода диаметром 91 мм и толщиной 6 мм возбуждались периодические акустические колебания импульсной формы. Свободные колебания участка трубопровода регистрировались приемником акустических колебаний, обрабатывались, и на полученном частотном спектре отмечалась частота с наибольшей амплитудой (рис. 5).

Во время эксперимента были проведены серии равнооточных измерений: без отложений АСПО и с отложениями различной толщины. Толщина АСПО накладывалась с шагом, как и при компьютерном моделировании, в 2 мм в диапазоне от 2 до 18 мм.

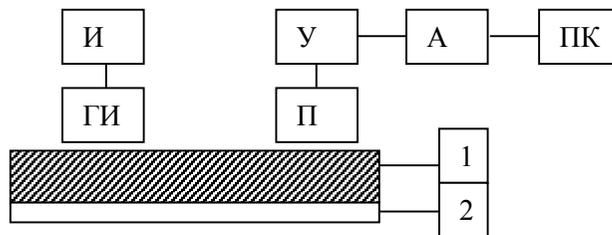


Рис. 5. Структурная схема информационно-измерительной системы:

1 – объект контроля; 2 – АСПО; ИН – источник напряжения; ГИ – генератор прямолинейного излучения; ПП – приемник акустического сигнала; У – усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

На рис. 6 представлен спектр колебаний стенки трубопровода без отложений АСПО. Частота свободных колебаний составила 2005,3 Гц.

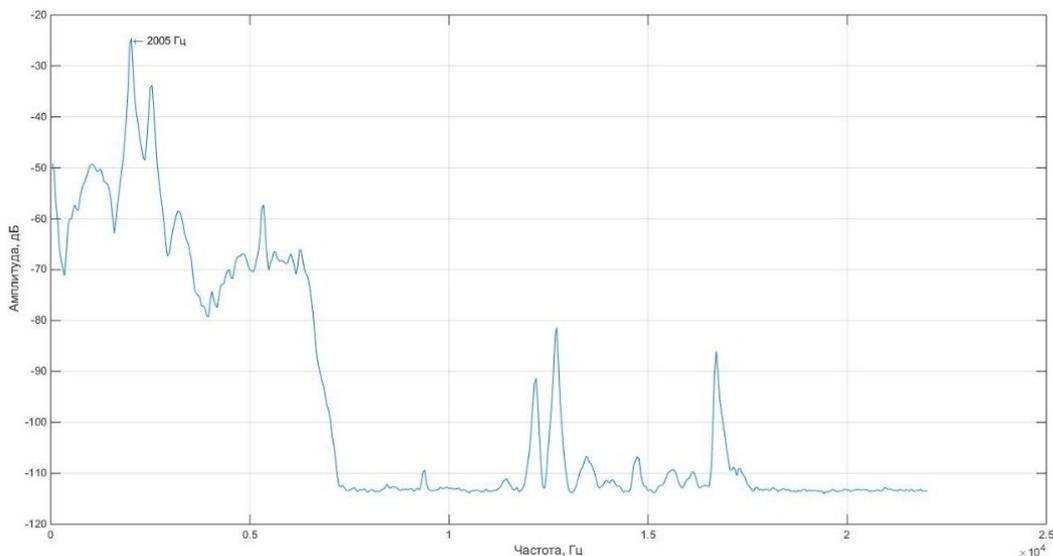


Рис. 6. Спектр колебаний стенки трубопровода без отложений АСПО

Как и в случае компьютерного моделирования, наличие отложений на внутренней стенке трубопровода приводит к изменению частоты собственных колебаний. Частота собственных колебаний стенки трубопровода с отложениями толщиной 18 мм составила 1920 Гц (рис. 7).

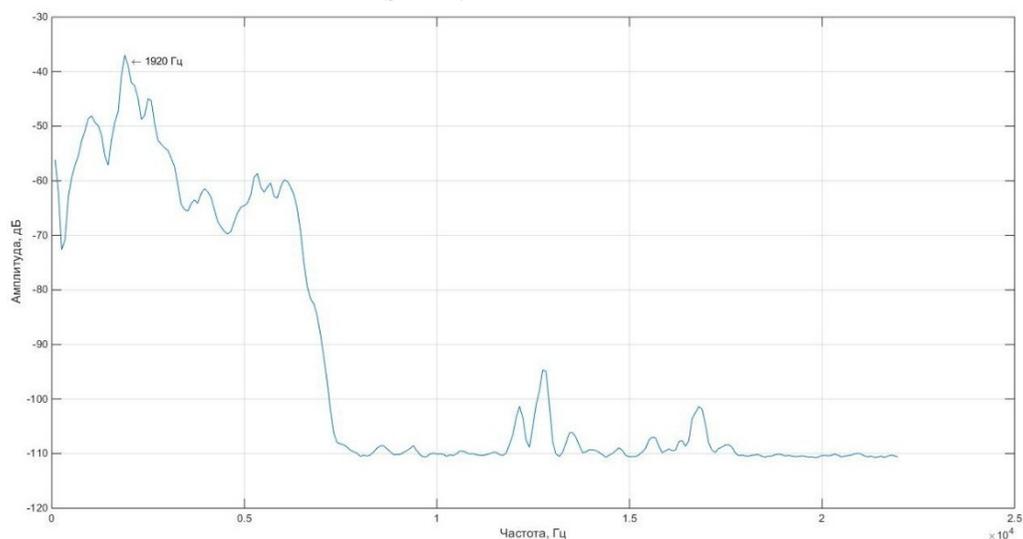


Рис. 7. Спектр колебаний стенки трубопровода с отложениями АСПО толщиной 18 мм

По результатам эксперимента обнаружена линейная зависимость частоты колебаний стенки трубопровода от толщины отложений.

Равнорасеянность дисперсий групп измерений была подтверждена критерием Фишера.

Далее с применением метода наименьших квадратов получено уравнение регрессии:

$$y = -4,64x + 2007,10.$$

Коэффициент детерминации составляет

$$R_2 = 0,97,$$

что говорит о хорошей линейной корреляционной зависимости.

На рис. 8 представлен график корреляционной зависимости экспериментальных данных.

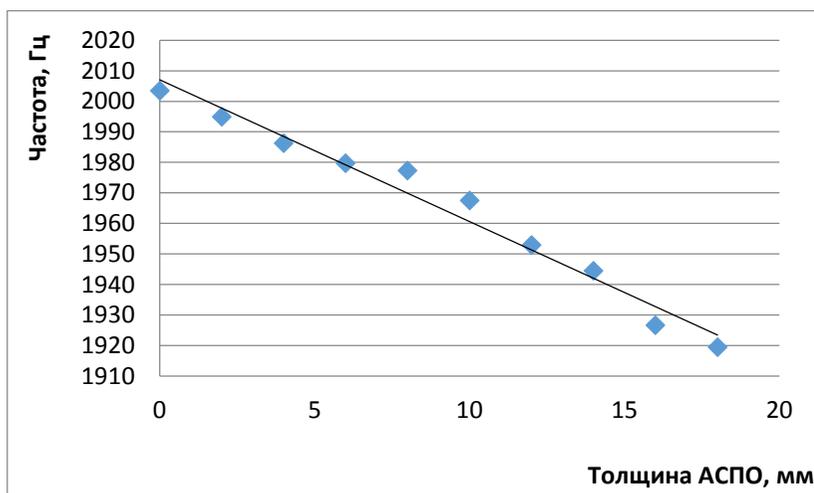


Рис. 8. График зависимости частоты колебаний от толщины отложений (по результатам экспериментального исследования)

Проведенный эксперимент и анализ полученных результатов показали наличие тесной зависимости частоты свободных колебаний трубопровода от толщины отложений на его внутренних стенках. Зависимость является линейной обратно пропорциональной, и с ростом толщины отложений частота колебаний уменьшается, что согласуется с компьютерным моделированием.

Заключение

В настоящее время проблема отложений АСПО на внутренних стенках трубопроводов и технологического оборудования остается актуальной. Соответственно, актуальным остается и вопрос об измерении толщины отложений. Данные измерения несут информацию о текущем состоянии технического оборудования и о необходимости или, наоборот, об отсутствии потребности в очистке трубопровода от отложений на данном временном отрезке его работы. Такая информация несет в себе не только экономическую выгоду, но и предупреждение возможных катастроф в результате выхода оборудования из строя.

Анализ предложенных на настоящий момент методов показал необходимость разработки нового подхода, который совмещал бы в себе решение обозначенных в данной статье проблем: метод должен быть неразрушающим; метод должен быть реализован через односторонний доступ к объекту контроля; метод не должен

быть дорогостоящим; должны использоваться простые алгоритмы для обработки результатов контроля.

Найденная по результатам экспериментального исследования и по результатам компьютерного моделирования зависимость частоты свободных колебаний стенки трубопровода от толщины отложений может быть положена в основу разработки нового метода измерения толщины АСПО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ибрагимов Н.Г., Хафизов А.Р.* Осложнения в нефтедобыче / Н.Г. Ибрагимов, Хафизов А.Р., Шайдаков В.В. и др. – Уфа: Монография, 2003. – 302 с.
2. *Рогачев М.К., Стрижнев К.В.* Борьба с осложнениями при добыче нефти. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2006. – 295 с.
3. *Тронов В.П.* Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. – М.: Недра, 1969. – 191 с.
4. Waxes in asphaltenes of crude oils and wax deposits / Yulia M. Ganeeva, Tatiana N. Yusupova, Gennady V. Romanov. Springenlink.com, 2016.
5. *Денисламов И.З., Мусин И.И., Якупов Р.Р., Ситдииков И.А.* Количественная диагностика и удаление асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинах и нефтесборных трубопроводах // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 1. – С. 41–49.
6. Wenda Wang, Qiyu Huang. Prediction for wax deposition in oil pipelines validated by field pigging // Journal of the Energy Institute, 2014. – С. 196–207.
7. *Персиянцев М.Н.* Добыча нефти в осложненных условиях. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 653 с.
8. *Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В.* Нефтепромысловая химия: практическое руководство. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 288 с.
9. Herbert Hofstatter. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 6–9.
10. *Чеботников В.А.* Исследование условий образования асфальтосмолопарафиновых отложений в скважинах и разработка технологии борьбы с ними: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 23.11.2011. – Тюмень, 2011. – 24 с.
11. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессе добычи, транспорта и хранения / Л.В. Иванова, Е.А. Буров, В.Н. Кошелев // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 1. – С. 268–284.
12. *Табет Н.К.А.* Система автоматического контроля толщины парафиновых отложений в нефтепроводах на основе модифицированного теплового метода измерения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 02.10.2020. – Уфа, 2020. – 20 с.
13. *Фетисов В.С., Табет Н.К.А.* Проблемы измерений толщины отложений асфальтопарафиновых отложений в нефтепроводах и пути их решения // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 1. – Т. 14. – С. 55–60.
14. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review / A.L. Sousa, H.A. Matos, L.P. Guerreiro // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2019. No. 9. Pp. 2091–2017.
15. *Суслов А.В., Ярославкина Е.Е.* Исследование зависимости собственных частот колебаний стенки трубопровода от толщины отложений // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сборник научных статей 6-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (12 февраля 2021 г.) / отв. ред. А.А. Горохов. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. – С. 234–238.
16. *Валеев А.Р., Гирфанова Д.Ю.* Прямые и косвенные методы определения количества парафиноотложений в нефтепроводе // Нефтегазовое дело. – 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 110–114.
17. Wax Thickness and Distribution Monitoring Inside Petroleum Pipes Based on External Temperature Measurements / Shumpei Ito, Yoshiaki Tanaka, Tatsuya Hazuku, Tomonori Ihara, Motoaki Morita, and Ivor Forsdyke // ACS Omega, 2021. – № 6. – С. 5310–5317.
18. Techniques for Measuring Wax Thickness During Single and Multiphase Flow / Chen X.T., Bulter T., Volk M., J.P. Brill // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1997.
19. *Ярославкина Е.Е., Суслов А.В.* Методы определения толщины отложений в нефтепроводах // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – № 1(18). – С. 210–217.
20. Методические материалы для профессионального и высшего уровня образования. <https://www.tflex.ru/vuzam/methodology>

21. Ланге Ю.В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
22. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.) – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. 1978. – 352 с.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

THEORETICAL-EXPERIMENTAL STUDY OF DEPENDENCE OF NATURAL FREQUENCIES OF OSCILLATIONS PLATES FROM APPLICATION THICKNESS

E.E. Yaroslavkina, A.V. Suslov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *The paper considers the problem of asphalt-resin-paraffin deposits in the production of oil and oil products. Methods of sediment measurement have been studied. Computer simulation of dependence of natural frequencies of metal plate oscillations on thickness of deposits was carried out. Correlation dependence of oscillation frequency of the control object on thickness of deposits is confirmed. The obtained results allow prospective investigation of pipe-wires deposits thickness.*

Keywords: *additional signals, harmonic signals, error instantaneous values, phase-shift blocks, harmonic model.*

REFERENCES

1. Ibragimov N.G., Hafizov A.R. Complications in oil production / N.G. Ibragimov, A.R. Hafizov, V.V. Shaidakov. – Ufa: Monograph, 2003. – 302 p.
2. Rogachev M.K., Strizhnev K.V. Combating complications in oil production. Moscow: Nedra-Businesscenter LLC, 2006. – 295 p.
3. Tronov V.P. Mechanism for the formation of resin-paraffin deposits and the fight against them. – Moscow: Nedra, 1969. – 191 p.
4. Waxes in asphaltenes of crude oils and wax deposits / Yulia M. Ganeeva, Tatiana N. Yusupova, Gennady V. Romanov. Springenlink.com, 2016.
5. Denislamov I.Z., Musin I.I., Yakupov R.R., Sitdikov I.A. Quantitative diagnostics and removal of asphalt-resin-paraffin deposits in wells and oil collection pipelines // Oil and gas business. – 2019. – No. 1. – Pp. 41–49.
6. Wenda Wang, Qiyu Huang. Prediction for wax deposition in oil pipelines validated by field pigging // Journal of the Energy Institute, 2014. – С. 196–207.
7. Persiyantsev M.N. Oil production in complicated conditions. Nedra-Businesscenter LLC2000. 653 p.
8. Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V. Neftpromyslovaya chemistry: practical leadership. Vladivostok: Dalnauka, 2011. 288 p.
9. Hofstatter H. Application of ultrasound for the destruction of resin-paraffin deposits in pipeline transport of oil // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – P. 6–9.
10. Chebotnikov V.A. Study of the conditions for the formation of asphalt-resin-paraffin deposits in wells and the development of technology for combating them. Auto-abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 23.11.2011. Tyumen, 2011. 24 p.

Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Head of the Department of Measuring Technique.

Anton V. Suslov, lead engineer certification authority “Politeh NK”.

11. *Ivanova L.V., Burov E.A., Koshelev V.N.* Asphaltosmoloparaffin deposits in the process of production, transport and storage // *Oil and gas business*. 2011. No. 1. Pp. 268–284.
12. *Tabet N.K.A.* Automatic control system of paraffin deposit thickness in oil pipelines based on modified thermal measurement method. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. 02.10.2020. Ufa, 2020. 20 p.
13. *Fetisov V.S., Tabet N.K.A.* Problems of measuring the thickness of deposits of as-faltoparaffin deposits in oil pipelines and ways to solve them // *Elek-trotechnical and information complexes and systems*. 2018. No. 1. Vol. 14. Pp. 55–60.
14. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review / A.L. Sousa, H.A. Matos, L.P. Guerreiro // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2019. No. 9. Pp. 2091–2017.
15. *Suslov A.V., Yaroslavkina E.E.* Study of the dependence of the natural frequencies of the pipeline wall oscillations on the thickness of deposits // *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: a collection of scientific articles of the 6th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation (February 12, 2021)* / Editor: Gorokhov A.A. (ed. edition); South-West. state. Un-t., Kursk: South-West. gos. un-t, 2021. Pp. 234–238.
16. *Valeev A.R., Girfanova D.Yu.* Direct and indirect methods of determining the amount of paraffin deposits in the oil pipeline // *Oil and gas business*. 2013. Vol. 11. No. 4. Pp. 110–114.
17. Wax Thickness and Distribution Monitoring Inside Petroleum Pipes Based on External Temperature Measurements / Shumpei Ito, Yoshiaki Tanaka, Tatsuya Hazuku, Tomonori Ihara, Motoaki Morita, and Ivor Forsdyke // *ACS Omega*, 2021. No. 6. Pp. 5310–5317.
18. Techniques for Measuring Wax Thickness During Single and Multiphase Flow / Chen X.T., Bulter T., Volk M., J.P. Brill // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, October 1997*.
19. *Yaroslavkina E.E., Suslov A.V.* Methods of determining the thickness of deposits in oil pipelines // *Information-measuring and control systems*. 2020. No. 1(18). Pp. 210–217.
20. Methodological materials for professional and higher education. <https://www.tflex.ru/vuzam/methodology>.
21. *Lange Yu.V.* Acoustic low-frequency methods and means of non-destructive testing of multilayer structures. M.: Engineering, 1991. 272 p.
22. *Vibrations in technology: Reference book*. In 6 t. / Ed. council: V.N. Chelomey (before). Moscow: Engineering, 1978. Vol. 1. Oscillations of linear systems / Ed. V.V. Bolotin. 1978. 352 p.

Электротехника

УДК 621.365.511

КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА АЛЮМИНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ*

А.А. Базаров, А.А. Навасардян, Н.В. Бондарева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрен комплекс вопросов по компьютерному моделированию электромагнитных и тепловых процессов в индукционном кристаллизаторе расплава алюминия, в котором обеспечивается создание сил между расплавом и катушкой индуктора, сжимающих столб жидкого материала и предотвращающих прямой контакт расплава со стенками тигля. В известных индукционных системах, использующих электромагнитное давление на расплавленный металл, для кристаллизации выбираются параметры индуктора такими, чтобы при достаточном усилии не происходило повышения температуры за счет внутренних источников тепловыделения при достаточном водяном охлаждении поверхности. Необходимым условием в существующих установках является интенсивное водяное охлаждение, обеспечивающее отвод тепла, выделяющегося при охлаждении и кристаллизации слитка. В предлагаемой работе отвод тепла в основном происходит через контакт с водоохлаждаемой опорной поверхностью.

Целью работы является определение параметров процесса, при которых происходит формирование необходимого электромагнитного усилия на стенку расплава с учетом изменения плотности тока на границе твердой и жидкой фаз алюминия.

При определении параметров электромагнитных кристаллизаторов использовались температурные зависимости теплофизических свойств. Исследованы варианты реализации индуктора, позволяющего охватывать весь объем расплава, внутри которого наблюдаются значительные изменения электропроводности алюминия и мощности внутренних источников тепла. Получение цилиндрической формы слитка в отличие от известных электромагнитных кристаллизаторов достигается путем определения конструкции индуктора, обеспечивающей снижение отталкивающей электромагнитной силы, воздействующей на боковую поверхность расплава, по высоте. Результаты исследования показали возможность применения кристаллизатора при различных соотношениях высоты и диаметра столба расплава, интенсивности охлаждения. Эффективность процесса для алюминия увеличивается при увеличении радиуса столба расплава, что также приводит к уменьшению искажения формы в области верхнего торца.

*Работа над статьей поддержана РФФИ (проект №19-06-00212).

Базаров Александр Александрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Навасардян Ашот Александрович, аспирант.

Бондарева Наталья Викторовна, аспирант.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, кристаллизация, алюминий, метод конечных элементов, электромагнитное литье.*

Введение

В современной цветной металлургической промышленности широко применяются системы кристаллизации расплавов при одновременном воздействии электромагнитного поля и быстрого охлаждения потоками воды [1–6]. Взаимодействие токов индуктора и расплава обеспечивает отталкивание расплава от стенок футеровки. Интенсивное водяное охлаждение приводит к формированию твердого слоя сначала в поверхностном слое, а затем и в более глубоких областях. Необходимым условием успешного протекания процесса является большой коэффициент теплопроводности материала расплава, чтобы было возможным завершить переход в твердое состояние за минимальное время. Дополнительно сплав должен обладать достаточной пластичностью для предотвращения появления критических термонапряжений, способных привести к внутренним дефектам в слитке.

В работе [1] была показана технология литья алюминия в сжимающем электромагнитном поле. Данный способ позволяет получать цилиндрические слитки с контролируемым диаметром и ровной поверхностью без дополнительного загрязнения расплава. Последующее широкое распространение электромагнитных кристаллизаторов в промышленности нашло отражение в трудах, посвященных как самой технологии, так и моделированию процессов. Среди последних работ, посвященных проблемам моделирования, можно отметить [7, 8]. Кроме тепловых процессов в них рассмотрены вопросы гидродинамики при течении расплава.

Электромагнитное поле индуктора создает отталкивающие силы, действующие на расплав. Движение металла вниз относительно индуктора сопровождается быстрым охлаждением поверхностного слоя и кристаллизацией. На выходе из индуктора твердая корка уже способна удержать внутреннюю незатвердевшую часть. Продолжение охлаждения слитка и после выхода из индуктора позволяет завершить кристаллизацию. Параметры процесса подобраны таким образом, что радиус слитка не изменяется. Индуктор может иметь минимальную длину и содержать один виток.

Применение технологии кристаллизации в электромагнитном поле без охлаждающей жидкости возможно, но процесс охлаждения становится более длительным. В этом случае приемлемым является способ при периодической работе кристаллизатора. При заливке в тигель расплава и обжатию его магнитным полем возникает сложность в формировании изменяющегося по высоте сжимающего усилия, позволяющего получить слиток заданного диаметра по всей высоте. Основная причина проблемы заключается в наличии краевых эффектов, обусловленных конструктивными параметрами индуктора и свойствами металла.

Компьютерное моделирование процесса с учетом изменения теплофизических свойств в широком диапазоне температур позволяет с достаточной точностью предсказать поведение процесса кристаллизации металлов в сжимающем электромагнитном поле.

Моделирование процессов охлаждения с учетом теплообмена с внешней средой и выделения теплоты плавления показало возможность контроля перемещения границы «жидкость – твердое тело» [5–8]. Определение электродинамических усилий при кристаллизации рассмотрено во многих работах, посвященных

электромагнитным кристаллизаторам. Общий подход к задачам электродинамики при индукционном нагреве показан в работе [9].

Формулировка задачи

Для реализации управляемого процесса кристаллизации расплава алюминия необходим учет нескольких факторов [6, 7]. Формирование кристаллов нужной величины и предотвращение недопустимых термонапряжений требуют определенной скорости охлаждения и поддержания величины тепловых потоков. Создание магнитного поля, обеспечивающего электромагнитную силу [8, 9], необходимую для удержания расплава на расстоянии от футеровки, требует решения задачи проектирования индуктора.

Поддержание общего характера процесса кристаллизации направлено на формирование распределения электромагнитной силы на боковой поверхности расплава по высоте. При этом требуется преобладание охлаждающего теплового потока над мощностью тепловыделения.

Для получения цилиндрической формы столба расплава необходимо снижение силы по линейному закону с увеличением высоты. Решение данной задачи требует применения математического моделирования нелинейных связанных электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в условиях изменения агрегатного состояния [6–8, 11, 12].

Математическая модель в общем случае представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В рассматриваемой задаче необходимо учитывать целый ряд нелинейных процессов при переходе металла из жидкого состояния в твердое:

– происходит теплообмен между расплавом, футеровкой, системой охлаждения и окружающей средой, т. е. одновременно протекают процессы кондуктивного, конвективного, радиационного теплообмена;

– в процессе охлаждения расплава теплофизические и электрофизические свойства нагреваемого изделия изменяют свои значения с падением температуры, что приводит к изменению распределения мощности и силы по высоте расплава.

В качестве исходной конструкции кристаллизатора принята цилиндрическая форма. В нижней часть корпуса располагается тонкая подложка из алюминиевого сплава, чтобы на начальном этапе кристаллизации не было контакта с футеровкой. Под металлическим основанием располагается теплообменник в виде медной трубки с проточной водой, поэтому охлаждающий поток препятствует расплавлению подложки.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида [13]

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \rho L \frac{\partial b}{\partial t} + Q \quad (1)$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0 \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4]; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha_2 [T(r, x, t) - T_{ext}]; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha_3 [T(r, X, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(r, X, t) - T_{ext}^4]. \quad (6)$$

Здесь C – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;

λ – теплопроводность;

L – удельная теплота плавления;

b – подвижная граница раздела твердой и жидкой фаз металла;

Q – плотность внутренних источников тепла;

α_i – коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях загрузки,

футеровки, основания под расплавом;

ε – степень черноты загрузки и футеровки;

T_{wall} – температура внутренней стенки футеровки;

T_{ext} – температура окружающей среды.

Решение тепловой задачи выполняется методом конечных элементов. Данный метод позволяет с высокой точностью учитывать все нелинейности задачи путем изменения всех свойств на каждом шаге по времени, а также задавать сложные геометрические формы нагреваемого изделия. Для учета изменения агрегатного состояния используется коррекция удельной теплоемкости с помощью функции Хевисайда, позволяющей увеличить значение в заданном диапазоне температуры, чтобы отразить повышение теплосодержания.

Коэффициенты конвективного теплообмена и степень черноты участвующих в теплообмене сред имеют разные значения для разных участков. Кроме того, при расчете теплообмена между поверхностями учитывается взаимное отражение лучистых потоков.

Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

Электромагнитная задача формулируется в виде уравнений Максвелла, описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция. Для перехода к численному решению исходная система преобразуется в терминах векторного магнитного потенциала к виду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial rA}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rA}{\partial r} \right] - j\omega A - J_0 = 0, \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

μ_a – магнитная проницаемость материалов, определяется как произведение относительной проницаемости на проницаемость вакуума $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$.

В качестве граничных условий для однозначности задачи принимаются наиболее общие условия – равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области:

$$A_{|S_1 \in S} = 0, \quad (8)$$

где S_1 – удаленная граница расчетной области.

На базе основного дифференциального уравнения и граничных условий осуществляется переход к конечно-элементной формулировке и строится система алгебраических уравнений. В результате ее решения определяются значения магнитного потенциала для каждого элемента, по которым производится расчет токов и других переменных. В индукционной системе кристаллизации алюминия не предусматривается применение ферромагнитных материалов, поэтому для всех сред магнитная проницаемость равна единице.

Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(J_z \sigma^{-1} J_z^* \right). \quad (9)$$

Здесь в скобках показано произведение плотности тока на его комплексно сопряженную величину.

Со стороны катушки индуктора на нити тока, протекающего в расплаве, действуют силы Лоренца, определяемые векторным произведением плотности тока и индукции

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (10)$$

Такой способ определения удобен для расчета электромагнитных сил в проводящих областях.

Задание теплофизических характеристик материалов

При реализации предлагаемой технологии необходимо учитывать особенности изменения теплофизических свойств материала в большом диапазоне температур. На примере алюминия можно наблюдать изменения свойств. Электрические свойства алюминия сильно изменяются при переходе из твердого состояния в расплавленное, удельное сопротивление возрастает приблизительно в десять раз. При кристаллизации за счет увеличения электропроводности уменьшается глубина проникновения и одновременно усиливаются краевые эффекты. Снижение тепловыделения при неизменном токе является положительным фактором, но значительное возрастание плотности тока и сил на краю усложняет задачу управления формой слитка.

Для разрешения этой проблемы необходим поиск параметров индукционной системы, футеровки и системы охлаждения, что позволяет одновременно минимизировать энергозатраты [10, 14–16].

При использовании численного метода решения задач для повышения точности расчетов удобно пользоваться аппроксимирующими выражениями для физических параметров. Коэффициенты теплопроводности и теплоемкости для алюминиевого сплава представлены функциями

$$\lambda = 117 + 0,16 \cdot (T - 273) - 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273)^2 - 4,3 \cdot 10^{-7} \cdot (T - 273)^3; \quad (11)$$

$$C = 820 + 1,2 \cdot (T - 273) - 7,7 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)^2 - 13100 \cdot (H(T - 933) - H(T - 963)). \quad (12)$$

Плотность алюминия принята постоянной и равна 2700 кг/м^3 .

В выражении для коэффициента теплоемкости включена компонента, позволяющая учесть изменение теплосодержания при плавлении и кристаллизации [13]. Температура плавления алюминия равна $660 \text{ }^\circ\text{C}$, и в качестве интервала температур, где происходит кристаллизация, можно взять величину $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейшее уменьшение диапазона нежелательно из-за вычислительных проблем, вызванных плохой сходимостью при ограниченном числе элементов модели. Значение в выражении получено при делении теплоты плавления алюминия, равной 393 кДж/кг , на интервал температуры 30 градусов, принятый для проведения процесса плавления. Приведенное значение позволяет выполнить вычисления с приемлемыми затратами времени.

Для теплоизоляции, в качестве которой используется корунд, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости представлены выражениями

$$\lambda = 12,2 - 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot T; \quad (13)$$

$$C = 680,3 + 0,42 \cdot T. \quad (14)$$

Электропроводность алюминия при расплавлении снижается приблизительно в 10 раз. Для задания электропроводности используется ступенчатая функция, задающая скачкообразное изменение при переходе через температуру плавления:

$$\sigma = 4 \cdot 10^7 \cdot (0,01 + 3,1 \cdot e^{-T/190} + (0,3 - H(T - 900))). \quad (15)$$

Расчеты электромагнитных и тепловых процессов

Расчеты электромагнитных и тепловых процессов при кристаллизации алюминия выполнялись для разных видов модели. Электротепловая модель эффективна при расчете процессов нагрева и охлаждения без учета изменения агрегатного состояния. Для моделирования процессов кристаллизации из-за существенных нелинейностей, создающих очень серьезные вычислительные проблемы, приходится переходить к тепловой модели с формированием области тепловыделения с заранее заданными характеристиками.

Целью расчета индуктора является доказательство возможности формирования необходимого давления на столб жидкого алюминия, но при этом выделяющееся тепло не должно превосходить величину отводимого теплового потока через охлаждаемую поверхность основания. Для обеспечения силы, прилагаемой к стенке расплава, достаточной для создания зазора, электромагнитное давление на расплавленный кремний должно превышать гидростатическое давление столба жидкого металла

$$p = \rho gh. \quad (16)$$

Цилиндрический индуктор с конической загрузкой

Использование цилиндрического вертикально расположенного индуктора для обжата магнитным полем расплава алюминия позволяет обеспечить воздушный зазор между стенкой футеровки и расплавленным металлом. Возникает

проблема переменного гидростатического давления по высоте столба расплава. В самом простом случае можно обеспечить постоянство электромагнитного давления на боковую стенку металла при подборе заглубления загрузки, за исключением областей краевых эффектов. Давление металла снижается с максимального значения в нижней части до нуля в верхней части. Разница двух давлений (гидростатического и электромагнитного) приводит к образованию конической формы расплава, а затем и слитка.

Исходными данными для расчета послужили следующие значения для двух вариантов цилиндрической загрузки и индуктора (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные

Индуктор		
R_u , м	0,22	0,35
H_u , м	0,2	0,2
Цилиндрическая загрузка		
$H_{заг}$, м	0,15	0,3
$R_{заг}$, м	0,15	0,3
V , м ³	0,0106	0,085
$S_{осн}$, м ²	0,07065	0,283
$S_{бок}$, м ²	0,143	0,57
m , кг	28,6	229
$P_{стат}$, Па	3970	7930
$F_{бок}$, Н	567	4520

Здесь R_u – радиус индуктора;

H_u – высота индуктора;

$H_{заг}$ – высота загрузки;

$R_{заг}$ – радиус загрузки;

V – объем цилиндра;

m – масса загрузки;

$S_{осн}$ – площадь основания цилиндра (загрузки);

$S_{бок}$ – площадь боковой поверхности цилиндра (загрузки);

$P_{стат} = g \cdot m / S_{осн}$ – гидростатическое давление в основании загрузки;

$F_{бок} = P_{стат} \cdot S_{бок}$ – максимальное значение силы на боковую поверхность.

Исходя из того, что при цилиндрической форме индуктора с удалением от нижнего основания загрузки гидростатическое давление снижается, форма загрузки (расплава) приобретет вид усеченного конуса. Предполагая линейное изменение силы по высоте, примем форму загрузки в виде правильного усеченного конуса с целью определения распределения объемной плотности силы отталкивания (f_r) и интегрального значения силы, действующей на боковую поверхность. Для модели системы «цилиндрический индуктор – коническая загрузка» с радиусом нижнего основания 0,3 м и высотой 0,3 м с помощью программы Comsol проведены расчеты сил. Для удобства загрузка разбита на десять слоев толщиной 3 см. Полученные значения электромагнитных сил отталкивания вдоль

вертикальной линии боковой поверхности конической загрузки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Силы отталкивания и объемная плотность сил по слоям загрузки

№ слоя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_r , Н	292	290	228	169	122	85	59	42	32	23
f_r , $\times 10^5$, Н/м ³	3	3,1	2,5	1,8	1,3	0,8	0,6	0,4	0,3	0,25

Суммарная сила отталкивания равна 1342 Н.

Формирование конической формы слитка нежелательно, поэтому определены значения гидростатического давления в основании слоев и рассчитаны необходимые средние силы для каждого слоя. Значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения гидростатического давления и отталкивающей силы в слоях расплава

m_i , кг	230	207	184	161	138	115	92	69	46	23
$P_{стат}$, Па	7930	7310	6500	5690	4880	4060	3250	2440	1625	813
$F_{бок}$, Н	452	416	370	324	278	231	185	139	92	46

Суммарное требуемое значение силы отталкивания равно 2533 Н, что почти в два раза меньше, чем максимальное значение, полученное ранее (4520 Н).

Для определения более реальных геометрических размеров исходного объема расплава в результате взаимодействия двух сил (электромагнитной силы отталкивания и силы тяжести) проведены расчеты электромагнитных полей и сил в системе «металл – индуктор». Для нескольких вариантов конического тела при одинаковом объеме определено распределение объемной плотности радиальной составляющей силы на боковой поверхности загрузки.

В предположении, что форма остается конической для всех вариантов, производилось увеличение высоты загрузки в виде усеченного конуса с одновременным уменьшением радиуса верхнего основания. Результаты расчетов сведены в табл. 4, где представлены геометрические размеры, а также мощность тепловыделения и радиальная составляющая электромагнитной силы, действующей на боковую поверхность.

Таблица 4

Расчетные значения электромагнитной силы и мощности тепловыделения в конической загрузке

№	$H_{заг}$, м	R_H , м	R_g , м	V , м ³	F_r , Н	$P_{заг}$, Вт
1	0,15	0,15	0,15	0,0106	543	6179
2	0,17	0,15	0,13	0,0105	454	4993
3	0,2	0,15	0,11	0,0107	399	4306
4	0,25	0,15	0,08	0,0107	346	3741
5	0,3	0,15	0,055	0,0106	322	3516

Принятая в расчетах значительная разница между радиусами загрузки (расплава) и индуктора объясняется наличием теплоизоляции и воздушного промежутка, отделяющего расплавленный металл от стенок.

Плотность силы не дает возможности оценить давление на боковую стенку столба расплава. Более информативным является расчет интегрального значения силы, действующей на тонкий слой металла (диск).

Для принятых геометрических размеров основной загрузки, имеющей свойства расплавленного металла, и подложки из алюминия, имеющей толщину 0,025 м, выполнен ряд расчетов при неизменном токе индуктора. Для упрощения величина тока одновиткового индуктора для всех вариантов составляла 40 кА. Для обеспечения постоянства плотности тока по длине индуктора в электромагнитной модели была задана нулевая электропроводность материала проводника.

Нижний край катушки индуктора находится на одном уровне с основанием подложки. Это позволяет сместить область краевых эффектов индуктора и загрузки на подложку, чтобы в зоне расплавленного алюминия распределение силы по высоте имело линейный вид.

На рис. 1 показан индуктор с загрузкой и подложкой. Уменьшение радиуса верхнего основания конуса R_6 сопровождается увеличением высоты. На рисунке показаны варианты № 2 и № 5 согласно табл. 4.

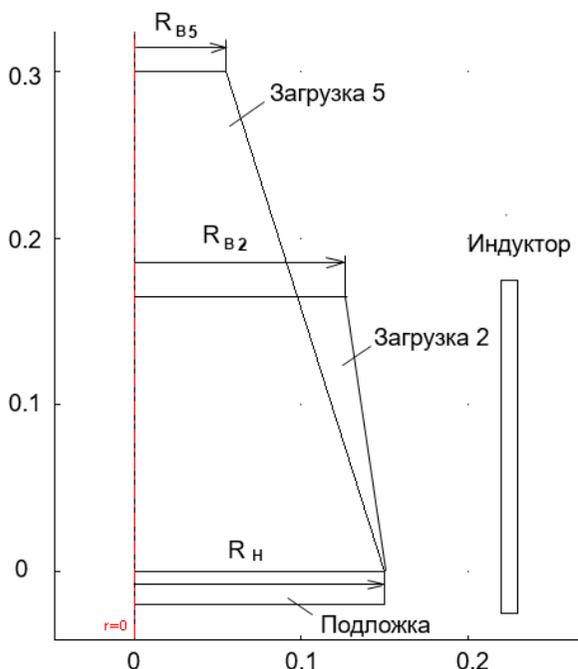


Рис. 1. Индуктор с загрузкой (два варианта) и подложкой

Также были построены диаграммы распределения электромагнитной силы (рис. 2). Сила, приложенная к загрузке, имеет отрицательное значение, так как является отталкивающей. Диаграммы на рис. 2 показывают, как изменяется вид распределения в зависимости от соотношения высот загрузки и индуктора. Сильное влияние на нижний участок диаграммы оказывает близость с подложкой, имеющей низкую температуру и высокое значение электропроводности. По сравнению со значениями усилий, показанных на рисунке, в области подложки силы больше в несколько раз. Чтобы сохранить наблюдаемые различия между диаграммами, участок диаграмм с большими значениями не показан.

Проведенные вычисления показывают, что по мере увеличения высоты расплава вид диаграммы становится ближе к наклонной прямой линии. Именно при такой форме диаграммы распределения электромагнитной силы возможен баланс двух сил. Неполное соответствие вида диаграммы 1 линии боковой поверхности конуса говорит о том, что баланс сил гидростатического давления и отталкивающих электромагнитных сил приведет к искажению формы.

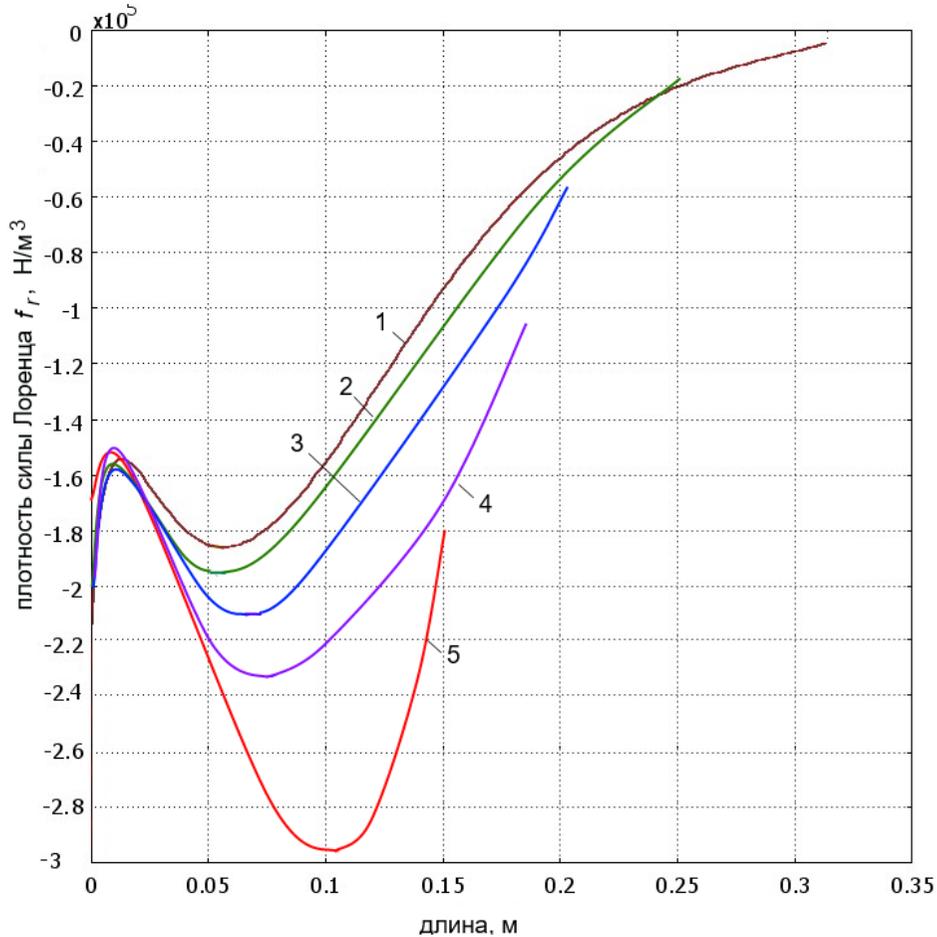


Рис. 2. Диаграммы радиальной составляющей плотности силы Лоренца вдоль линии боковой поверхности конусообразной загрузки при высоте загрузки: 1 – 0,15 м; 2 – 0,17 м; 3 – 0,2 м; 4 – 0,25 м; 5 – 0,3 м

В результате проведенных расчетов были найдены геометрические размеры усеченного конуса расплава внутри цилиндрического индуктора в процессе кристаллизации в условиях обжимающего электромагнитного поля. Несмотря на некоторые отклонения, форма расплава близка к конической. Такая форма слитка не очень удобна для дальнейшей работы. Поэтому проведены расчеты, направленные на поиск формы индуктора, при которой загрузка приобретет форму цилиндра.

Конический индуктор с цилиндрической загрузкой

В качестве исходной конструкции индуктора служит катушка высотой 0,15 м, что совпадает с высотой загрузки. При расчетах для разных вариантов производилось изменение формы индуктора от цилиндрической до конической с углами наклона направляющей до 25 градусов (рис. 3). Во всех вариантах высота индуктора принималась уменьшенной по сравнению с обычными индукторами, где требуется снижение краевых эффектов. Предыдущие расчеты показали сложность в управлении распределением боковой составляющей электромагнитной силы в загрузке.

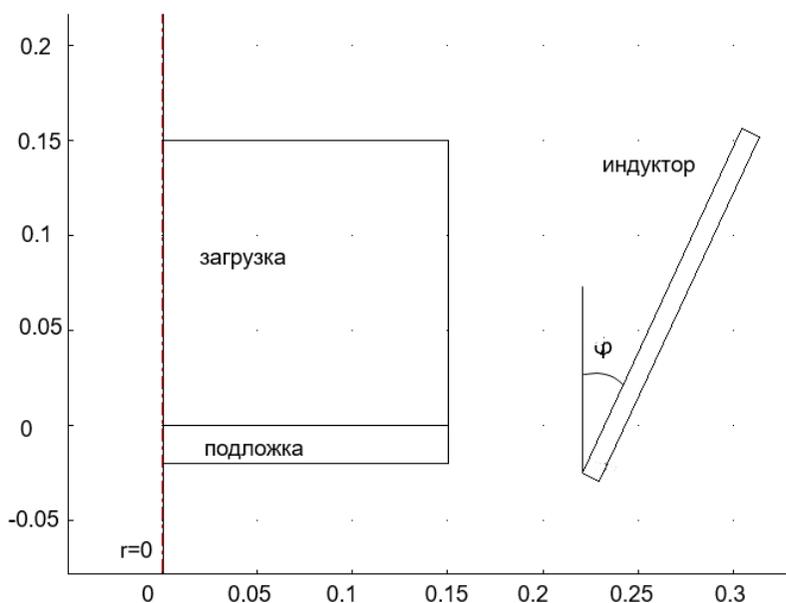


Рис. 3. Индуктор с загрузкой и подложкой:
 φ – угол наклона направляющей конуса

Расчеты показали нецелесообразность использования индукторов большой длины, так как краевые эффекты усиливаются при превышении длины (высоты) загрузки. Расчеты для загрузки диаметром 0,3 м и индукторов высотой 0,2 м и 0,15 м представлены на рис. 4, 5.

На приведенных на рис. 4, 5 диаграммах видно, что уменьшение силы в верхней части загрузки происходит недостаточно для того, чтобы обеспечить цилиндрическую форму загрузки. Избыточное давление электромагнитных сил приведет к сужению верхней части. Таким образом, рассматриваемая конструкция системы «индуктор – загрузка» не позволяет решить поставленную задачу. Одной из причин такого результата является относительно большое значение зазора между индуктором и загрузкой. Так как уменьшать его нежелательно, то для улучшения формы диаграмм произведено увеличение габаритов загрузки. Соотношение радиуса индуктора и воздушного зазора становится более значительным. В дальнейших расчетах приняты диаметр загрузки 0,6 м; высота загрузки 0,3 м; высота и угол наклона стенки катушки изменяются.

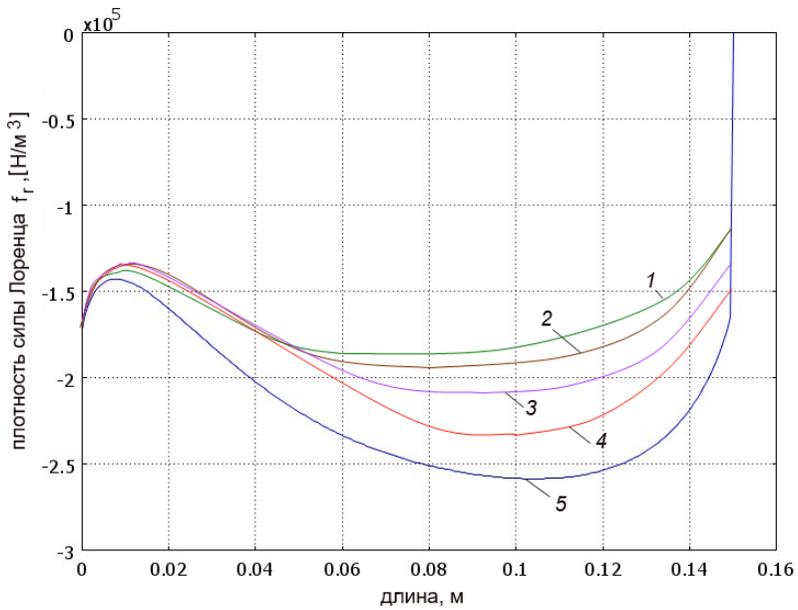


Рис. 4. Распределение плотности радиальной составляющей силы Лоренца на линии боковой поверхности расплава для конического индуктора высотой 0,2 м с углом наклона стенки:
 1 – 25 градусов; 2 – 20 градусов; 3 – 15 градусов; 4 – 10 градусов;
 5 – 5 градусов

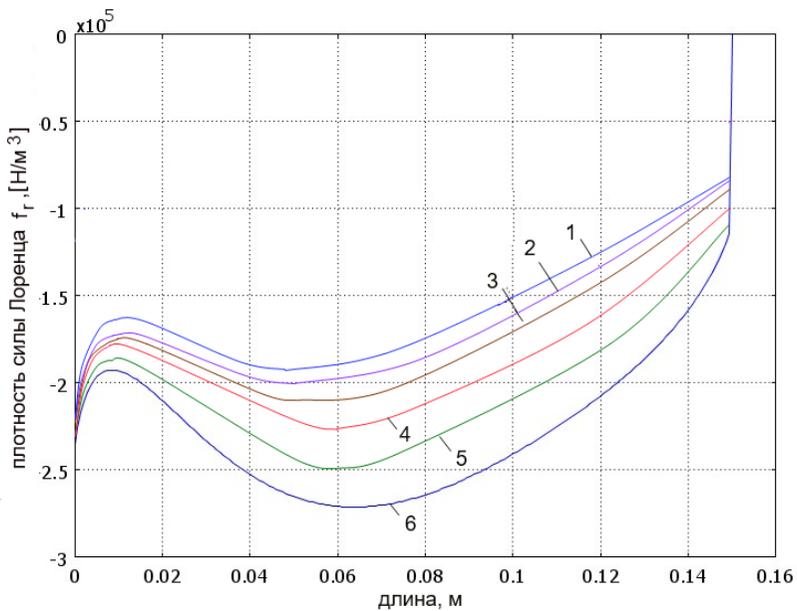


Рис. 5. Распределение плотности радиальной составляющей силы Лоренца на линии боковой поверхности расплава для конического индуктора высотой 0,15 м с углом наклона стенки:
 1 – 30 градусов; 2 – 25 градусов; 3 – 20 градусов; 4 – 15 градусов;
 5 – 10 градусов; 6 – 5 градусов

На рис. 6 приведены диаграммы распределения плотности электромагнитной силы f_r на боковой поверхности цилиндрической загрузки. В отличие от диаграмм на рис. 4, 5 вид этих диаграмм гораздо ближе к наклонной прямой линии, как у направляющей конуса. Дальнейшее улучшение вида диаграмм затруднено. Использование переменного шага намотки катушки индуктора цилиндрической или конической формы также не позволяет получить требуемое распределение. Если чисто теоретически возможно спроектировать индуктор с требуемыми характеристиками, то практическая реализация становится неоправданно сложной.

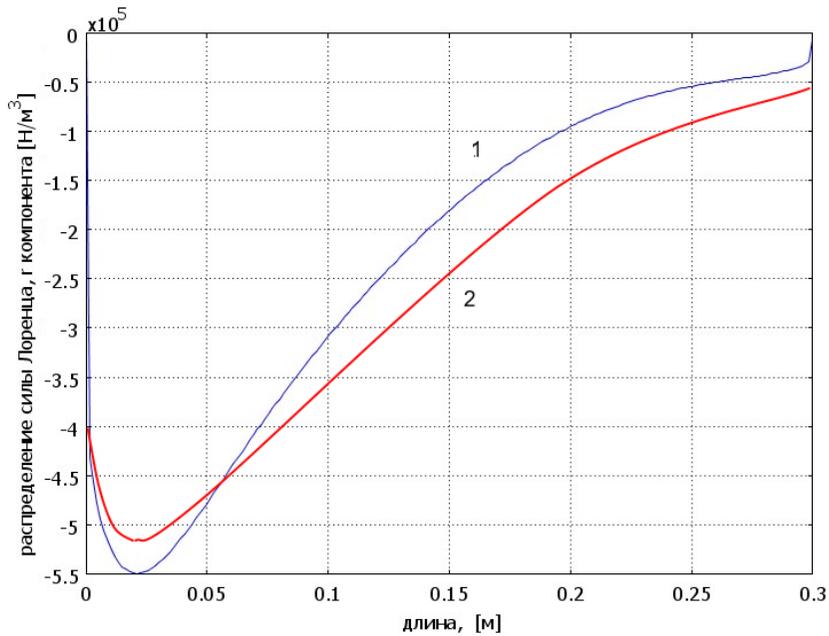


Рис. 6. Распределение плотности радиальной составляющей силы Лоренца на линии боковой поверхности расплава высотой 0,3 м радиусом 0,3 м для конического индуктора длиной 0,2 м (1) и 0,25 м (2) с углом наклона стенки 25 градусов

Диаграммы распределения плотности электромагнитной силы для двух вариантов индуктора показывают возможность получения формы загрузки при кристаллизации, близкой к цилиндрической. Интегральные значения силы оттачивания составляют 2267 Н для диаграммы 1 и 2547 Н для диаграммы 2.

Основное внимание при моделировании процессов было уделено достижению требуемого распределения электромагнитных сил. Однако процесс кристаллизации возможен только при условии эффективного охлаждения. В данной задаче отвод тепла осуществляется в основном через основание загрузки, так как для алюминия характерен низкий коэффициент излучения. Предусмотрено принудительное охлаждение с помощью катушки из медной трубки, по которой циркулирует вода. Катушка плотно прилегает к основанию нижней части теплоизоляции. Несмотря на низкое значение коэффициента теплопроводности теплоизолирующего слоя, процесс охлаждения слитка протекает успешно при разных значениях коэффициента теплообмена между основанием и охладителем. Даже при значении коэффициента теплообмена, равном $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$, что обеспечивается при принудительном воздушном, а не жидкостном, охлаждении, процесс

остывания не прекращается. Это возможно при условии относительно низких значений мощности тепловыделения в загрузке по сравнению с тепловыми потоками охлаждения в окружающую среду и к охладителю.

Моделирование тепловых процессов внутри слитка диаметром 0,6 м и высотой 0,3 м при охлаждении при коэффициенте теплообмена на нижней поверхности 1000 Вт/(м²град) для интервала времени 1200 секунд показало, что наиболее значительный тепловой поток направлен в сторону основания и составляет около 7,5 кВт. Потери с боковой поверхности за счет излучения и конвекции снижаются со значения 4 кВт до 3,5 кВт; потери с верхней поверхности уменьшаются с 1020 до 930 Вт. Нужно учесть, что охлаждение осуществляется в условиях постоянного тепловыделения в поверхностном слое. По мере снижения температуры и кристаллизации алюминия мощность тепловыделения уменьшается и скорость охлаждения увеличивается. В течение указанного интервала времени температура в различных точках слитков снижается на 60–130 градусов, что показано на рис. 7.

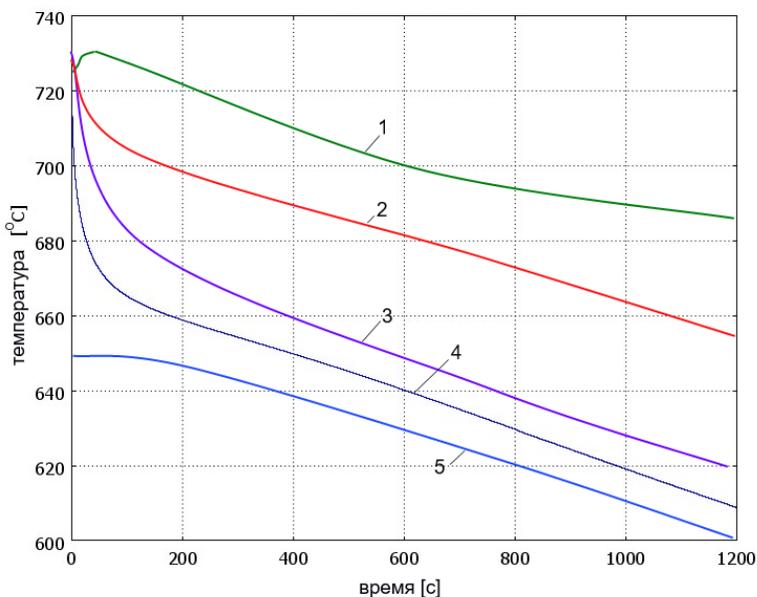


Рис. 7. Временные диаграммы температуры в слитке на расстоянии от основания: 1 – 0,1 м; 2 – 0,05 м; 3 – 0,02 м; 4 – 0,01 м; 5 – 0

Диаграммы температуры, представленные на рис. 7, относятся к точкам, расположенным на осевой линии загрузки. Такие особенности процесса, как тепловыделение в слое большой толщины и высокий коэффициент теплопроводности, приводят к тому, что перепад температуры по радиальной координате невелик по сравнению с перепадом по продольной координате.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения периодического режима в электромагнитных кристаллизаторах для заготовок небольшой длины и значительного диаметра. Возможно получение цилиндрической формы слитка с небольшими отклонениями в верхней части. Этот вопрос требует дополнительной проработки, так как процессы усадки металла при кристаллизации сложно моделировать.

Заключение

На основании проведенных исследований процесса кристаллизации слитка из сплава алюминия подтверждена идея использования магнитного поля в качестве средства для изоляции расплава от футеровки с целью повышения чистоты продукции в условиях ограниченных объемов производства и нежелательного контакта с охлаждающей жидкостью. Применение численного метода моделирования позволило получить хорошие результаты расчета за счет корректной формулировки задачи, учета нелинейностей и применения эффективных аппроксимирующих зависимостей. Конструктивные параметры индуктора, найденные при анализе вариантов, позволяют обеспечить формирование заданной формы при кристаллизации слитка из алюминиевого сплава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов и др. – М.: Металлургия, 1983. – 152 с.
2. *Первухин М.В., Сергеев Н.В., Хацаюк М.Ю.* Электромагнитный кристаллизатор для получения непрерывно литых слитков с высокими скоростями охлаждения // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 121–129.
3. *Авдулов А.А., Усынина Г.П., Сергеев Н.В., Гудков И.С.* Технология литья алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор для производства длинномерных заготовок малого диаметра // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2017. – Т. 10. – № 1. – С. 82–89.
4. *Авдулов А.А., Сергеев Н.В., Гудков И.С., Тимофеев В.Н., Горохов Ю.В., Авдулова Ю.С.* Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного прессования способом конформ // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 1. – С. 85–94.
5. *Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А.* Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации // Литейное производство. – 2016. – № 8. – С. 24–26.
6. *Минаков А.В., Хацаюк М.Ю., Первухин М.В.* Численное моделирование динамики свободной поверхности и кристаллизации расплава в электромагнитном кристаллизаторе // Индукционный нагрев. – 2014. – № 1 (27). – С. 37–42.
7. *Демидович В.Б., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н., Максимов А.А.* Численное моделирование бесстигельного плавления титанового сплава в переменном магнитном поле // Металлургия машиностроения. – 2017. – № 3. – С. 2–5.
8. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukdar P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet // Journal of Materials Processing Technology. Vol. 270, August 2019. Pp. 132–141.
9. *Егизарян А.С., Зимин Л.С.* Электродинамические процессы при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 156–159.
10. *Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Сокунов Б.А., Урманов Ю.Р.* Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-технологий // Промышленная энергетика. – М.: Научно-техническая фирма "Энергопрогресс", 2016. – № 12. – С. 21–27.
11. О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве / Л. А. Соколовская, В. А. Мамишев // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 24–29.
12. *Базаров А.А., Навасардян А.А.* Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в индукционном кристаллизаторе кремния // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (55). – С. 105–119.
13. *Балакин Ю.А., Завалишин И.В., Шумская Л.П.* Разработка теоретических основ инновационных технологий внешнего воздействия на кристаллизацию металлов // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 2 (129). – С. 23–30.
14. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

15. Кувалдин А.Б., Федин М.А., Поляков О.А. Исследование параметров электромагнитного поля в дискретной среде // Известия Российской Академии Наук. Серия: Физическая. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 161–163.
16. Данилушкин А.И., Животягин Д.А., Кибкало С.С., Сурков Д.В. Оптимизация электротехнического комплекса для высокопроизводительных линий индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Т. 28. – № 3 (67). – С. 110–124.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.

THE DESIGN OF THE ELECTROMAGNETIC ALUMINUM MOLD OF PERIODIC ACTION

A.A. Bazarov, A.A. Navasardyan, N.V. Bondareva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *This publication discusses a set of issues on computer modeling of electromagnetic and thermal processes in an induction crystallizer of an aluminum melt, in which forces are created between the melt and the inductor coil, compressing the column of liquid material and preventing direct contact of the melt with the crucible walls. In known induction systems using electromagnetic pressure on molten metal, for crystallization, the parameters of the inductor are selected so that, with sufficient force, the temperature does not rise due to internal sources of heat release with sufficient water cooling of the surface. In the proposed work, heat removal mainly occurs through contact with a water-cooled support surface.*

The aim of the work is to determine the process parameters at which the required electromagnetic force is formed on the melt wall, taking into account the change in the current density at the interface between the solid and liquid phases of aluminum.

When determining the parameters of induction crystallizers, the temperature dependences of the thermophysical properties were used. Variants of the inductor realization are investigated, which makes it possible to cover the entire volume of the melt, inside which significant changes in the electrical conductivity of aluminum and the power of internal heat sources are observed. Obtaining a cylindrical shape of the ingot, in contrast to the known electromagnetic crystallizers, is achieved by determining the design of the inductor, which provides a decrease in the repulsive electromagnetic force acting on the side surface of the melt in height. The results of the study showed the possibility of using the crystallizer at various ratios of the height and diameter of the melt column, and the intensity of cooling. The efficiency of the process for aluminum increases with an increase in the radius of the melt column, which also leads to a decrease in shape distortion in the region of the upper end.

Keywords: *induction heating, crystallization, aluminum, finite element method, electromagnetic casting.*

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Ashot A. Navasardyan, Postgraduate Student.
Natalya V. Bondareva, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. Nepreryvnoye lit'ye v elektromagnitnyy kristallizator / Z.N. Getselev, G.A. Balakhontsev, F.I. Kvasov e dr. M.: Metalluggiya, 1983. 152 c.
2. *Pervukhin M.V., Sergeev N.V., Khatsayuk M.Yu.* Elektromagnitnyy kristallizator dlya poluchiniya nepreryvno litykh slitkov s vysokimi skorostyami okhlazhdeniya // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika.* 2013. No. 3. Pp. 121–129.
3. *Avdulov A.A., Usynina G.P., Sergeev N.V., Gudkov I.S.* Tekhnologiya lit'ya aluminiyevykh splavov v elektromagnitnyy kristallizator dlya proizvodstva dlinnomernykh zagotovok malogo diametra // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya; Khimiya.* 2017. Vol. 10. No. 1. Pp. 82–89.
4. *Avdulov A.A., Sergeev N.V., Gudkov I.S., Timofeev V.N., Gorokhov Yu.V., Avdulova Yu.S.* Razrabotka tekhnologii proizvodstva provoloki iz spetsial'nykh aluminiyevykh solavov na osnove sposoba lit'ya v elektromagnitnyy kristallizator I nepreryvno pressovaniya sposobom conform // *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika I tekhnologiyi.* 2017. Vol. 10. No. 1. Pp. 85–94.
5. *Kolyadov Ye.V., Gerasimov V.V., Visik Ye.M., Mezhin Yu.A.* Lit'ye metodom napravlennoy kristallizatsii s upravlyayemym gradientom temperatury na fronte kristallizatsii // *Liteynoye proizvodstvo.* 2016. No. 8. Pp. 24–26.
6. *Minakov A.V., Khatsayuk M.Yu., Pervukhin M.V.* Chislennoe modelirovanie dinamiki svobodnoy poverkhnosti I kristallizatsii rasplava v elektromagnitnom kristallizatore // *Induktsionnyy nagrev.* 2014. No. 1 (27). Pp. 37–42.
7. *Demidovich V.B., Khatsayuk M.Yu., Timofeev V.N., Maksimov A.A.* Chislennoe modelirovanie bestigel'nogo plavlenniya titanovogo splava v peremennom magnitnom pole // *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2017. No. 3. Pp. 2–5.
8. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukdar P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet // *Journal of Materials Processing Technology.* Vol. 270. August 2019. Pp. 132–141.
9. *Yegiazaryan A.S., Zimin L.S.* Elektridynamicheskiye protsessy pri induktsionnom nagreve // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki.* 2016. No. 1. Pp. 156–159.
10. *Sarapulov F.N., Frizen V.E., Sokunov B.A., Urmanov Yu.R.* Snizheniye energozatrat v metallurgicheskom proizvodstve za schet primeneniya MGD-tekhnologiy // *Promyshlennaya energetika.* Moscow: Nauchno-tekhnicheskaya firma "Energopress", 2016. No. 12. Pp. 21–27.
11. O matematicheskom modelirovanii s fazovymi perekhodami v metallurgii I liteynom proizvodstve / L.A. Sokolovskaya, V.A. Mamishev // *Pritsessy lit'ya.* 2009. No. 2. Pp. 24–29.
12. *Bazarov A.A., Navasardyan A.A.* Modelirovanie elektromagnitnykh I teplovykh protsessov v induktsionnom kristallizatore kremniya // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki.* 2019. No. 3 (55). Pp. 105–109.
13. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 599 p.
14. *Balakin Yu.A., Zavzlishin I.V., Shumskaya L.P.* Razrabotka teoreticheskikh osnov innovatsionnykh tekhnologiy vneshnego vozdeystviya na kristallizatsiyu metallov // *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye.* 2016. No. 2 (129). Pp. 23–30.
15. *Kuvaldin A.B., Fedin M.A., Polyakov O.A.* Issledovanie parametrov elektromagnitnogo polya v diskretnoy srede // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya.* 2020. Vol. 84. No. 2. Pp. 161–163.
16. *Danilushkin A.I., Zhivotyagin D.A., Kibkalo S.S., Surkov D.V.* Optimizatsiya elektritekhnicheskogo kompleksa dlya vysokoproizvoditel'nykh liniy induktsionnogo nagreva // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki.* 2020. Vol. 28. No. 3 (67). Pp. 110–124.

УДК 621.3.078

КОРРЕКЦИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ АМПЛИТУД РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОСТОЛА

А.С. Ведерников¹, Д.И. Дунаев²

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Россия, 607188, Нижегородская область, г. Саров, пр-т Мира, 37

Аннотация. Известно, что вибрационные системы направленных колебаний на базе асинхронных вибродвигателей в настоящее время широко применяются на практике, но при этом имеют существенный недостаток – резкое увеличение амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в момент разгона и торможения вибродвигателей, что отрицательно сказывается на их работе. В статье рассматривается вибрационный стол с двумя дебалансными асинхронными вибродвигателями. Приведена расчетная схема и уравнения движения такой вибрационной системы. Показано, что вибрационный стол как объект управления представляет колебательное звено с ярко выраженной резонансной частотой. Приведены уравнения движения асинхронных вибродвигателей при скалярном частотном управлении. Разработана структурная схема вибрационного стола с дебалансными возбудителями, моделирование которой позволило определить амплитуды резонансных колебаний. Предложено для уменьшения резонансных амплитуд применить коррекцию статической характеристики частотного преобразователя, связывающей действующее значение выходного напряжения с частотой. Приведены уравнения желаемой статической характеристики инвертора и аналитические зависимости для расчета необходимых коэффициентов для ее реализации. Разработана расчетная модель, позволяющая учитывать влияние скорректированной статической характеристики частотного преобразователя на работу вибрационного стола на этапах разгона и торможения. Приведены результаты компьютерного моделирования, убедительно показывающие, что коррекция статической характеристики инвертора является эффективным средством снижения амплитуд резонансных колебаний. Показано, что современные частотные преобразователи обладают функциональными возможностями, позволяющими легко осуществлять коррекцию зависимости действующего значения выходного напряжения от частоты. Отмечена необходимость подстройки статической характеристики инвертора под конкретный тип испытываемого на вибрационном столе изделия.

Ключевые слова: вибрационный стол, асинхронный вибродвигатель, резонанс, амплитуда колебаний, частотный преобразователь.

Вибрационные стенды находят широкое применение в научных лабораториях, производящих испытания на динамическую прочность изделий радиоэлек-

Ведерников Александр Сергеевич (к.т.н., доцент), декан Электротехнического факультета.

Дунаев Дмитрий Иванович, инженер.

роники, точного приборостроения, средств автоматизации, самолетостроения и ракетостроения. Интерес к изучению вибрационных систем и процессов, протекающих в них, прослеживается как у отечественных, так и зарубежных ученых [1–5].

Одним из видов вибрационных испытательных стендов являются вибростолы инерционного действия, в которых для создания вынуждающей силы применяются асинхронные дебалансные вибродвигатели (АДВД), работающие в резонансной зоне частотной характеристики стенда [6]. Один из недостатков стендов с АДВД заключается в резком увеличении амплитуд колебаний (в 2–3 раза) в момент прохождения зоны резонанса при разгоне и торможении, что недопустимо с точки зрения нормальной эксплуатации [7]. Большие амплитуды колебаний при резонансе сокращают ресурс вибростенда и могут привести к выходу из строя вибрационной системы.

Проблеме снижения амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в момент разгона и торможения вибродвигателя посвящено множество работ [8–11]. Результатом таких исследований является использование вибродвигателей с автоматически или вручную регулируемым статическим моментом дебалансов, применение последовательно подключенных конденсаторов к обмоткам статора, использование двигателей со значительным резервом мощности, что обеспечивает форсированный запуск вибродвигателей. Также исследования посвящены и снижению амплитуд колебаний в процессе торможения. При этом используются конденсаторное торможение асинхронного вибродвигателя, торможение конденсаторным противотоканием, торможение пульсирующим током [12–15]. Однако каждый из перечисленных способов имеет свой существенный недостаток: например, конденсаторное торможение и запуск весьма ограничено и может не совпадать с зоной резонанса, а резерв мощности ухудшает энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности в рабочем режиме) и т. д. Таким образом, применение новых эффективных способов разгона и торможения вибродвигателя с целью сокращения резонансных амплитуд остается актуальным вопросом.

Целью проводимого исследования является уменьшение амплитуд резонансных колебаний вибростола за счет коррекции статической характеристики частотного преобразователя.

Расчетная схема вибрационной системы с АДВД представлена на рис. 1.

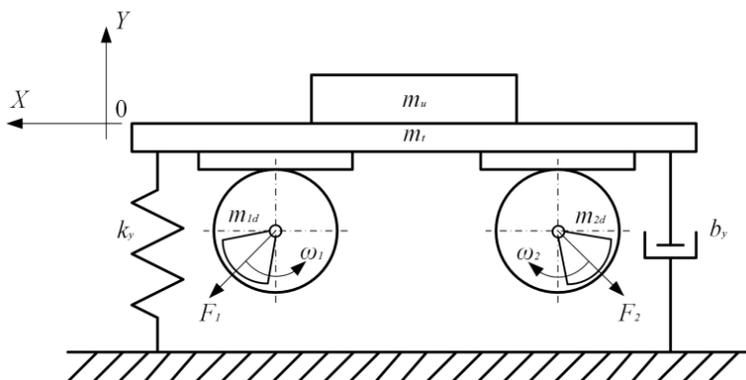


Рис. 1. Расчетная схема вибрационной системы

Движение вибрационного стенда с дебалансными возбудителями описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [16]

$$\left. \begin{aligned} (m_t + m_u) \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y &= F_1 + F_2; \\ F_1 &= m_{1d} r_{1d} \left(\frac{d\omega_1}{dt} \sin \varphi_1 + \omega_1^2 \cos \varphi_1 \right); \\ F_2 &= m_{2d} r_{2d} \left(\frac{d\omega_2}{dt} \sin \varphi_2 + \omega_2^2 \cos \varphi_2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где m_t – масса вибростола;

m_u – масса испытуемого изделия;

y – смещение вибростола по оси Y ;

b_y – суммарный коэффициент демпфирования колебаний;

k_y – суммарный коэффициент жесткости;

F_1 и F_2 – проекции центробежных сил дебалансов на ось Y ;

m_{1d} и m_{2d} – массы дебалансов, установленных на первом и втором вибродвигателе соответственно;

r_{1d} и r_{2d} – эксцентриситеты дебалансов (расстояния от осей вращения до центров масс дебалансов);

ω_1 и ω_2 – скорости вращения дебалансов (вибродвигателей);

φ_1 и φ_2 – углы поворота дебалансов относительно оси Y .

Главная особенность вибрационного стола как объекта управления заключается в том, что он в соответствии с первым уравнением системы (1) описывается колебательным звеном с ярко выраженной резонансной частотой:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_y}{m_t + m_u}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) вытекает, что значение резонансной частоты переменного и будет зависеть как от массы стола m_t , так и массы m_u испытуемого изделия. Как правило, соотношение коэффициента жесткости и масс таково, что резонансная частота лежит внутри рабочего диапазона частот вибростола.

Для того чтобы производить исследование испытуемого изделия на разных частотах, скорость вибродвигателей регулируется с помощью частотного преобразователя со скалярным управлением. Математическая модель каждого асинхронного вибродвигателя, например первого, при скалярном частотном управлении описывается следующей системой нелинейных уравнений [17–19]:

$$\left. \begin{aligned}
\frac{d\psi_{1x}}{dt} &= U_{1x} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1x} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2x} + \omega_0 \psi_{1y}; \\
\frac{d\psi_{1y}}{dt} &= U_{1y} - \frac{R_1 L_2'}{\Delta} \psi_{1y} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{2y} - \omega_0 \psi_{1x}; \\
\frac{d\psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2x} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1x} + (\omega_0 - \omega_1) \psi_{2y}; \\
\frac{d\psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R_2' L_1}{\Delta} \psi_{2y} + \frac{R_2' L_0}{\Delta} \psi_{1y} - (\omega_0 - \omega_1) \psi_{2x}; \\
\frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{m_1 Z_n L_0}{2J_{np1} \Delta} (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}) + \\
&+ m_{1d} r_{1d} \frac{d^2 y}{dt^2} \sin \varphi_1 - \frac{1}{J_{np1}} M_{c1}; \\
U_{1x} &= U_{1y} = k_{U1} f_1 + U_0; \\
\omega_0 &= \frac{2\pi f_1}{Z_n},
\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ψ_{1x} и ψ_{1y} – проекции вектора потокосцепления статора на оси ортогональной системы координат Oxy , вращающейся со скоростью магнитного поля;

U_{1x} и U_{1y} – проекции изображающего вектора напряжения на ту же систему координат;

ψ_{2x} и ψ_{2y} – соответствующие проекции вектора потокосцепления ротора;

L_1 и R_1 – индуктивность и активное сопротивление цепи статора;

L_2' и R_2' – приведенные индуктивность и активное сопротивление цепи ротора;

L_0 – взаимная индуктивность;

ω_0 – угловая скорость вращения магнитного поля;

ω_1 – угловая частота вращения ротора первого вибродвигателя;

J_{np1} – приведенный момент инерции ротора этого двигателя;

m_1 – число фаз электродвигателя;

Z_n – число пар полюсов;

M_{c1} – момент сопротивления на валу электродвигателя;

$\Delta = L_1 L_2' - L_0^2$;

f_1 – частота питающего напряжения;

k_{U1} – коэффициент пропорциональности;

U_0 – напряжение на нулевой частоте.

Система уравнений (3) составлена в предположении, что в инверторе используется линейный закон регулирования напряжения в функции частоты. Частотный преобразователь производит разгон и торможение вибродвигателей с определенным темпом. Это связано с необходимостью ограничения на определен-

ном уровне пусковых токов и перенапряжения в линии постоянного тока преобразователя.

Большой интерес представляет исследование процесса прохождения вибродвигателями резонансной частоты как при пуске, так и при торможении. Поэтому с помощью систем уравнений (1) и (3) разработана структурная схема вибростола с дебалансными вибродвигателями, которая позволяет исследовать работу установки при пуске, вращении с постоянной скоростью и торможении вибродвигателей (рис. 2).

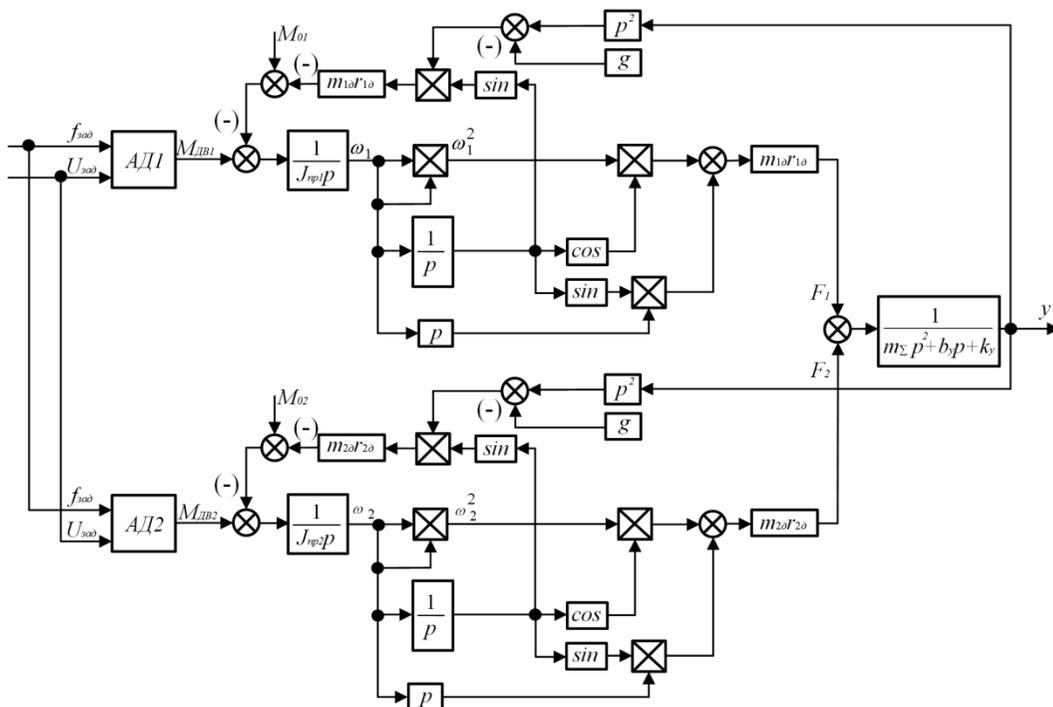


Рис. 2. Структурная схема электромеханической вибрационной системы

Например, вибрационный стенд с массой стола $m_t = 230$ кг, жесткостью опор $k_y = 73150$ Н/м и коэффициентом демпфирования $b_y = 1050$ Нс/м имеет резонансную частоту $\omega_r = 17.834$ рад/с, что соответствует 2,838 Гц. Стол приводится в движение двумя вибродвигателями АД1 и АД2 типа ИВ-105-2,2 со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность $P_{ном} = 2,2$ кВт; номинальное фазное напряжение $U_{1ном} = 220$ В; $f_{1ном} = 50$ Гц; приведенный момент инерции ротора $J_{рп1} = J_{рп2} = 0,015$ кгм²; $Z_n = 1$; $\cos\varphi = 0,87$; $\eta = 0,832$; $R_1 = 3,565$ Ом; $L_1 = 0,4183$ Гн; $R_2' = 2,257$ Ом; $L_2' = 0,4236$ Гн; $L_0 = 0,4108$ Гн; $m_{1d} = m_{2d} = 3,7$ кг; $r_{1d} = r_{2d} = 0,06$ м. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 10813-1-2011 такой вибрационный стенд должен обеспечивать диапазон частот колебаний стола от 5 до 80 Гц [20]. Поэтому асинхронные двигатели приводятся во вращение с помощью инвертора с линейным законом регулирования напряжения в функции частоты.

Моделирование в программе Matlab Simulink структурной схемы, приведенной на рис. 2, показывает, что на этапе разгона при темпе изменения задающего воздействия $f_{зад} = 5$ Гц/с максимальная амплитуда колебаний при прохождении резонанса составляет $y_{max.раз} = 5,79$ мм, что в 2,97 раза превышает установившуюся амплитуду вибраций (рис. 3).

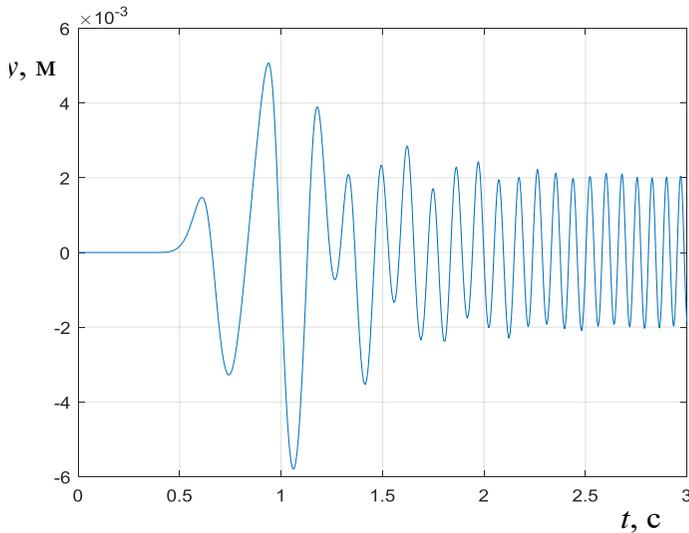


Рис. 3. График колебаний вибрационного стола при прохождении резонансной частоты

При торможении амплитуда колебаний при прохождении резонанса несколько уменьшается и становится равной $y_{max.тор} = 4,14$ мм.

Большинство современных частотных преобразователей обладают функцией обхода резонансных частот, и применение ее в вибрационных стендах дает положительный эффект [21]. Однако при этом одновременно сужается диапазон рабочих частот вибрационной машины.

Поэтому для уменьшения амплитуд резонансных колебаний предлагается применить коррекцию статической характеристики частотного преобразователя, а именно зависимости U_1 от f_1 (рис. 4). В соответствии с формулой (2) резонансу соответствует частота формируемого инвертором напряжения

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_y}{m_t + m_u}}. \quad (4)$$

Задаваясь некоторой величиной Δf , можно сформировать характеристику частотного преобразователя при скалярном управлении асинхронными двигателями $U_1(f_1)$, которая определяется следующими аналитическими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= k_{U1} f_1 + U_0, \text{ при } 0 \leq f_1 \leq f_p - \Delta f \text{ и } f_p + \Delta f < f_1 \leq f_{1ном}; \\ U_1 &= (k_{U1} - k_1) f_1 + k_1 (f_p - \Delta f) + U_0, \text{ при } f_p - \Delta f < f_1 \leq f_p; \\ U_1 &= (k_{U1} + k_1) f_1 - k_1 (f_p + \Delta f) + U_0, \text{ при } f_p < f_1 \leq f_p + \Delta f, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $k_1 = \frac{k_{U1} f_p + U_0 - U_p}{\Delta f}$;

U_p – желаемая величина фазного напряжения на резонансной частоте.

Следует отметить, что на рис. 4 изображен случай, когда $U_0 = U_p = 0$. Для рассматриваемого вибрационного стола $k_{U1} = 4,4$ В/Гц при $U_0 = U_p = 0$, поэтому, выбирая, например, $\Delta f = 2$ Гц, можно рассчитать необходимую величину коэффициента k_1 , который будет равен 6,24 В/Гц.

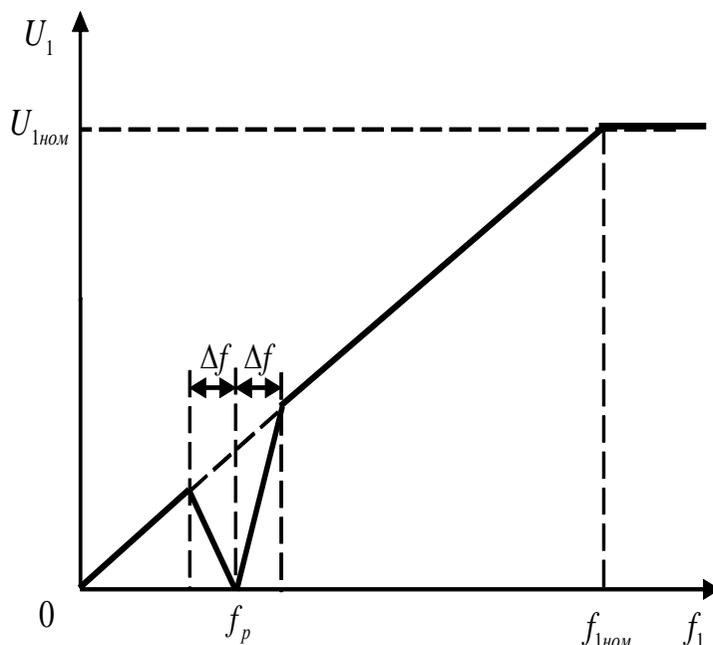


Рис. 4. Предлагаемый график зависимости U_1 от f_1 для уменьшения амплитуд резонансных колебаний

При этом расчетная модель задающего воздействия, формирующего требуемую статическую характеристику частотного преобразователя, принимает вид, приведенный на рис. 5.

Моделирование показывает, что при прохождении резонансной частоты наблюдается изменение напряжения на статорных обмотках вибродвигателей по требуемому закону и значительное уменьшение амплитуды колебаний (рис. 6).

На этапе разгона при темпе изменения задающего воздействия $f_{зад} = 5$ Гц/с максимальная амплитуда колебаний при прохождении резонанса составляет $y_{\max.раз} = 4,85$ мм, а при торможении – $y_{\max.тор} = 3,49$ мм.

Очевидно, что на амплитуды резонансных колебаний вибростола будут влиять темп разгона и торможения, величина Δf и масса испытуемого изделия m_u . Результаты компьютерного моделирования показывают зависимость максимальных амплитуд резонансных колебаний вибростола при разгоне $y_{\max.раз}$ и торможении $y_{\max.тор}$ от величины Δf и $\left| \frac{df_{зад}}{dt} \right|$ (см. таблицу).

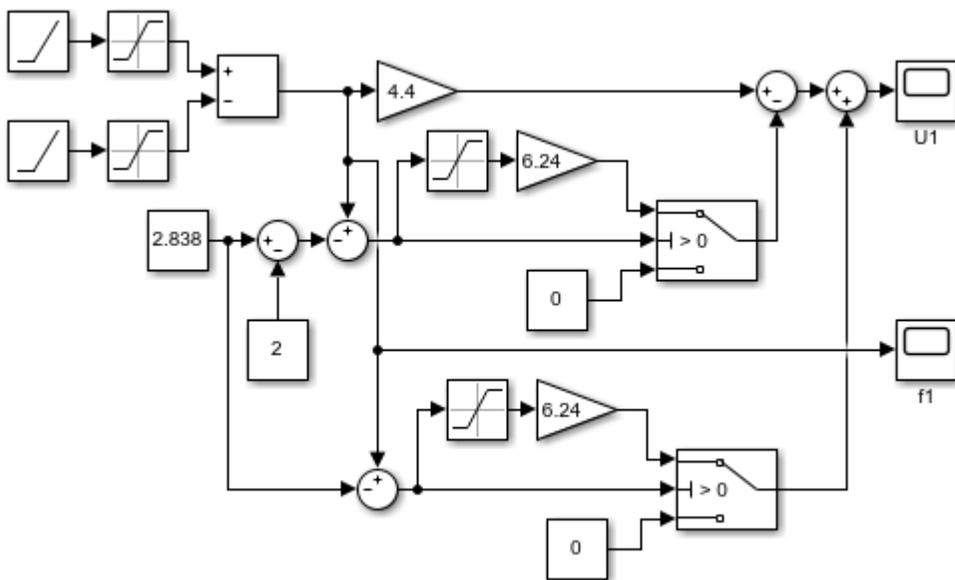


Рис. 5. Модель задающего воздействия, формирующего требуемую статическую характеристику частотного преобразователя

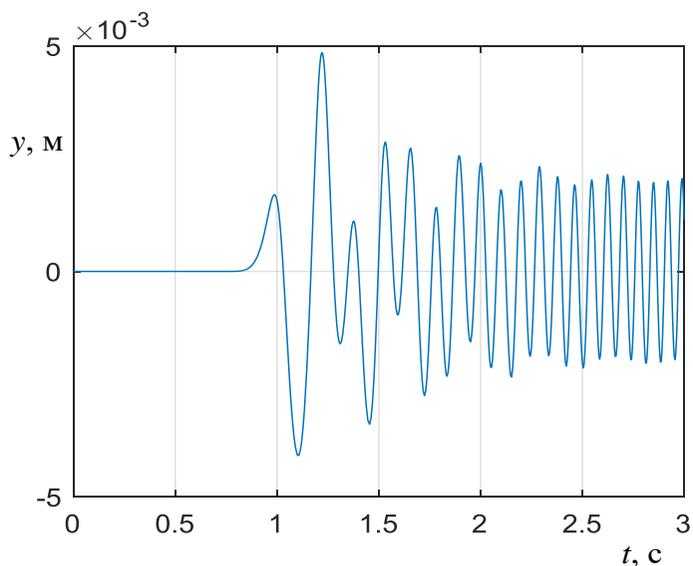


Рис. 6. График колебаний вибрационного стола при прохождении резонансной частоты при $\Delta f = 2$ Гц

Зависимость максимальных амплитуд резонансных колебаний вибростола

при разгоне $y_{\max, \text{раз}}$ и торможении $y_{\max, \text{тор}}$ от величины Δf и $\left| \frac{df_{\text{зад}}}{dt} \right|$

$\left \frac{df_{\text{зад}}}{dt} \right $, Гц/с	Δf , Гц	$y_{\max, \text{раз}}$, мм	$y_{\max, \text{тор}}$, мм
5	1,5	5,03	3,2
	2	4,85	3,49
	2,5	4,47	3,87
10	1,5	4,23	3,7
	2	4,23	3,27
	2,5	4,23	2,77
20	1,5	4,06	2,61
	2	4,02	2,62
	2,5	4	2,65

Следует отметить, что приведенные в таблице данные получены при минимальной массе вибростола, поскольку в этом случае наблюдаются наибольшие амплитуды колебаний.

Анализ результатов компьютерного моделирования позволяет сделать вывод, что предлагаемый способ коррекции статической характеристики частотного преобразователя является эффективным средством уменьшения амплитуд резонансных колебаний вибростола с АДВД. Действительно, если выбрать темп разгона задающего воздействия 10 Гц/с и $\Delta f = 2$ Гц, то амплитуды резонансных колебаний снижаются в 1,37 раза.

Техническая реализация коррекции зависимости U_1 от f_1 в соответствии с выражениями (5) легко осуществляется в современных инверторах за счет использования функции свободного программирования этой кривой по точкам, причем достаточно иметь всего три таких точки. Однако из формулы (4) следует, что значение резонансной частоты зависит от массы испытуемого изделия. Поэтому необходимо проводить подстройку зависимости $U_1(f_1)$ инвертора под фактическое значение резонансной частоты.

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение коррекции статической характеристики частотного преобразователя снижает максимальные амплитуды колебаний вибрационного стола, что благоприятно сказывается на работе вибрационной системы в целом.
2. Предлагаемая коррекция зависимости выходного напряжения от частоты может быть реализована на любом современном инверторе.
3. Необходимо производить настройку статической характеристики частотного преобразователя под конкретный вид испытуемого изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быховский И.И.* Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
2. *Пановко Г.Я., Шохин А.Е., Еремейкин С.А.* Управление резонансным режимом работы вибромашины с приводом от асинхронного электродвигателя // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 2. – С. 3–8.
3. *Еремейкин С.А., Крестниковский К.В., Пановко Я.Г., Шохин А.Е.* Экспериментальный анализ работоспособности системы управления колебаниями механической системы с автосинхронизирующимися вибровозбудителями // Журнал машиностроения и надежности. – 2016. – Т. 45, № 6. – С. 553–558.
4. *Cieplak G.* Estimation of the resonance amplitude in machines with inertia vibrator in the coast-down phase. *Mechanics & Industry*. 2018. Vol. 19, No. 1. P. 9.
5. *Lanets O.S., Dmytriv V.T., Borovets V.M., Derevenko I.A., Horodetskyi I.M.* Analytical Model of the Two-Mass Above Resonance System of the Eccentric-Pendulum Type Vibration Table. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2020. Vol. 25, No. 4. Pp. 116–129.
6. *Блехман И.И.* Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб.: Руда и металлы, 2013. – 640 с.
7. *Гаврилов Е.Н.* Динамические процессы зарезонансных вибрационных машин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 12. – С. 87–90.
8. *Дмитриев В.Н., Горбунов А.А., Гаврилов Е.Н.* Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя в зарезонансную зону // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1–2. – С. 128–132.
9. *Дмитриев В.Н., Горбунов А.А., Гаврилов Е.Н., Хахалева Н.А.* Вибрационный электропривод на базе дебалансов с переходным статическим моментом // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Моделирование электромеханических процессов: сборник научных трудов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 130–135.
10. *Дмитриев В.Н., Лунина Н.А., Дунаев Д.И.* Математическое моделирование асинхронного вибрационного электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 312–315.
11. *Петров Л.П.* Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
12. *Гаврилов Е.Н.* Исследование тормозных режимов зарезонансных вибрационных транспортирующих машин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 12. – С. 84–87.
13. *Кислицин А.Л., Дунаев Д.И., Жирнов С.Н.* Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 4 (41). – С. 11–16.
14. *Дмитриев В.Н., Дунаев Д.И., Жирнов С.Н., Лунина Н.А., Бабин А.Н.* Тормозные режимы асинхронного двигателя // Сборник материалов 48-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск, 2014. – С. 9–12.
15. *Кашкалов В.И.* Кондесанторное торможение асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1977. – 120 с.
16. *Дубовик Д.В.* Обоснование рациональных динамических параметров вибрационных установок с асинхронным электроприводом для работы в зоне резонанса: дис. ...канд. техн. наук / Д.В. Дубовик. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 176 с.
17. Системы управления электроприводом: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
18. *Михайлов О.П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 302 с.
19. *Кузнецов В.А., Мигачев А.В., Стариков А.В., Титов А.Р.* Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 171–179.
20. ГОСТ 32144-2013. Вибрация. Руководство по выбору вибростендов. Ч. 1. Оборудование для испытаний на воздействие вибрации. – М.: Стандартиформ, 2019. – 35 с.

21. Alexander Starikov, Dmitry Dunaev. Research of the Effect of the Inverter Resonance Frequency Skip Function on the Operation of a Vibration Stand in Acceleration and Braking Modes // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) IEEE Xplore, 2020. – P. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210. 2020.9271223.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2021 г.

CORRECTION OF THE STATIC CHARACTERISTIC OF A FREQUENCY CONVERTER TO REDUCE THE AMPLITUDES OF RESONANCE VIBRATIONS OF THE VIBRATING TABLE

A.S. Vedernikov¹, D.I. Dunaev²

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

²FSUE «RFNC-VNIIEF»
37, Prospect Mira, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

Abstract. *It is known that vibration systems of directional vibrations based on asynchronous vibration motors are currently widely used in practice, but at the same time they have a significant drawback - a sharp increase in vibration amplitudes when passing through the resonance zone at the time of acceleration and deceleration of vibration motors, which negatively affects their operation. The article discusses a vibration table with two unbalanced asynchronous vibration motors. The calculation scheme and equations of motion of such a vibration system are presented. It is shown that the vibration table as a control object is an oscillatory link with a pronounced resonant frequency. The equations of motion of asynchronous vibration motors with scalar frequency control are given. A structural diagram of a vibration table with unbalanced exciters has been developed, the modeling of which made it possible to determine the amplitudes of resonant oscillations. It is proposed to apply correction of the static characteristics of the frequency converter, which connects the effective value of the output voltage with the frequency, to reduce the resonance amplitudes. Equations of the desired static characteristics of the inverter and analytical dependences for calculating the necessary coefficients for its implementation are given. A computational model has been developed that makes it possible to take into account the effect of the corrected static characteristic of the frequency converter on the operation of the vibrating table at the stages of acceleration and deceleration. The results of computer simulation are given, convincingly showing that the correction of the static characteristics of the inverter is an effective means of reducing the amplitudes of resonant oscillations. It is shown that modern frequency converters have functionality that makes it easy to correct the dependence of the effective value of the output voltage on the frequency. The need to adjust the static characteristics of the inverter for a specific type of product tested on the vibration table is noted.*

Keywords: *vibration table, asynchronous vibration motor, resonance, vibration amplitude, frequency converter.*

REFERENCES

1. Bykhovskiy I.I. Fundamentals of the theory of vibration technology. M.: Mechanical Engineering, 1968. 362 p.

*Alexander S. Vedernikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Dmitry I. Dunaev, Engineer.*

2. *Panovko G.Ya., Shokhin A.E., Ereimeikin S.A.* Control of the resonant mode of operation of a vibratory machine driven by an asynchronous electric motor // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. 2015. Vol. 2. Pp. 3–8.
3. *Eremeykin S.A., Krestnikovskiy K.V., Panovko Ya.G., Shokhin A.E.* Experimental analysis of the operability of the vibration control system of a mechanical system with self-synchronizing vibration exciters // Journal of Mechanical Engineering and Reliability. 2016. T. 45. Vol. 6. Pp. 553–558.
4. *Cieplak G.* Estimation of the resonance amplitude in machines with inertia vibrator in the coast-down phase. Mechanics & Industry. 2018. Vol. 19. No. 1. P. 9.
5. *Lanets O.S., Dmytriv V.T., Borovets V.M., Derevenko I.A., Horodetskyi I.M.* Analytical Model of the Two-Mass Above Resonance System of the Eccentric-Pendulum Type Vibration Table. International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 2020. Vol. 25. No. 4. Pp. 116–129.
6. *Blekhman I.I.* Theory of vibration processes and devices. Vibration mechanics and vibration technology. St. Petersburg: Ore and Metals, 2013. 640 p.
7. *Gavrilov E.N.* Dynamic processes of resonant vibration machines // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. T. 16. Vol. 12. Pp. 87–90.
8. *Dmitriev V.N., Gorbunov A.A., Gavrilov E.N.* Investigation of starting modes of an asynchronous debalance vibration motor into the resonance zone // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavod. Energy problems. 2012. Vol. 1–2. Pp. 128–132.
9. *Dmitriev V.N., Gorbunov A.A., Gavrilov E.N., Khakhaleva N.A.* Vibration electric drive based on unbalances with transient static moment // Questions of theory and design of electrical machines. Modeling of electromechanical processes: collection of scientific papers. Ulyanovsk: UISTU, 2010. Pp. 130–135.
10. *Dmitriev V.N., Lunina N.A., Dunaev D.I.* Mathematical modeling of an asynchronous vibration electric drive // Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automated electric drive AEP-2014. Saransk: Publishing house of Mordovs University. 2014. T. 1. Pp. 312–315.
11. *Petrov L.P.* Management of starting and braking of asynchronous motors. Moscow: Energoizdat, 1981. 184 p.
12. *Gavrilov E.N.* Investigation of braking modes of resonant vibration transporting machines // Bulletin of Kazan Technological University. 2013. T. 16. Vol. 12. Pp. 84–87.
13. *Kislitsin A.L., Dunaev D.I., Zhirnov S.N.* Investigation of capacitor opposition in the braking mode of an asynchronous vibration motor // Electrotechnical systems and complexes. 2018. Vol. 4 (41). Pp. 11–16.
14. *Dmitriev V.N., Dunaev D.I., Zhirnov S.N., Lunina N.A., Babin A.N.* Braking modes of an induction motor // Collection of materials of the 48th scientific and technical conference "University science in modern conditions". Ulyanovsk, 2014. Pp. 9–12.
15. *Kashkalov V.I.* Condesantor braking of asynchronous motors. Moscow: Energy, 1977. 120 p.
16. *Dubovik D.V.* Substantiation of rational dynamic parameters of vibration installations with an asynchronous electric drive for operation in the resonance zone: Dis. ... cand. tech. sciences / D.V. Dubovik. St. Petersburg: SPbGETU "LETI", 2014. 176 p.
17. Electric drive control systems: Textbook for students. higher. study. institutions / V.M. Terekhov, O.I. Osipov; ed. V.M. Terekhova. Moscow: Academy, 2005. 304 p.
18. *Mikhailov O.P.* Automated electric drive of machine tools and industrial robots. Moscow: Machine building, 1990. 302 p.
19. *Kuznetsov V.A., Migachev A.V., Starikov A.V., Titov A.R.* Features of the mathematical model of an asynchronous electric motor for oil air coolers // Bulletin of the Samara State Technical University. Engineering sciences. 2011. Vol. 3 (31). Pp. 171–179.
20. State Standard 32144-2013. Vibration. Shaker selection guide. Part 1. Equipment for vibration testing. M.: Standartinform, 2019. 35 p.
21. *Alexander Starikov, Dmitry Dunaev.* Research of the Effect of the Inverter Resonance Frequency Skip Function on the Operation of a Vibration Stand in Acceleration and Braking Modes // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) IEEE Xplore, 2020. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon50210. 2020.9271223.

УДК 517.977.56, 519.6, 621.785

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК*

А.В. Попов, Ю.Э. Плешивецва

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Формулируются задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя, реализующего стадию нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, для решения которых в ПО MATLAB разработан проблемно-ориентированный программный комплекс. Основой комплекса является оптимизационная процедура, базирующаяся на использовании альтернативного метода параметрической оптимизации, который позволяет записать системы трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех неизвестных конструктивных характеристик и параметров алгоритмов управления. В оптимизационную процедуру интегрирована нелинейная двумерная численная модель процесса индукционного нагрева, разработанная в программном пакете Altair FLUX. Предложен вариант технической реализации найденного в ходе решения задачи оптимального быстрого действия алгоритма управления с учетом ограничения на максимальную температуру обрабатываемой заготовки.*

Ключевые слова: *поверхностная закалка, индукционный нагрев, оптимальное проектирование, оптимальное по быстродействию управление, программный комплекс, альтернативный метод, численная модель, электромагнитные и тепловые поля, FLUX.*

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем в машиностроении и металлургии является повышение экономической эффективности производственных процессов за счет увеличения производительности и снижения операционных затрат и себестоимости конечной продукции. Для достижения указанной цели необходима оптимизация конструкции и режимов работы существующего или проектирование принципиально нового оборудования. До недавнего времени подавляющее большинство методов оптимизации было ориентировано на использование упрощенных аналитических моделей исследуемых технологических процессов, что обусловлено их сравнительной простотой и низкими требованиями к вычислительным ресурсам при построении оптимизационных процедур [1]. Однако развитие и усложнение методов моделирования и оптимизации при совершенствовании вычислительной техники в последние годы привели к тому, что в настоящее время при решении задач оптимизации все чаще используются нелиней-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-08-00232 и №20-08-00240.

Попов Антон Валерьевич, младший научный сотрудник НИС кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Плешивецва Юлия Эдгаровна (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

ные многомерные модели, построенные с помощью современных программных средств численного компьютерного моделирования, которые позволяют учесть многочисленные специфические особенности и усложняющие факторы, присущие рассматриваемым процессам.

В этой связи одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности функционирования сложных объектов с распределенными параметрами представляется междисциплинарный подход к решению задач оптимизации, который заключается в применении современных достижений теории оптимального управления и компьютерного моделирования. Этот подход, в частности, предполагает построение оптимизационных процедур на основе высокоэффективных оптимизационных алгоритмов, во многих случаях гарантирующих получение решения, близкого к глобальному оптимуму, в комплексе с многомерными нелинейными численными моделями, позволяющими с высокой степенью адекватности отразить реальные свойства оптимизируемых объектов. Применение междисциплинарного подхода, открывающее несомненные перспективы получения результатов нового уровня, тем не менее, связано с рядом серьезных технических проблем, основной из которых является осуществление эффективного взаимодействия между оптимизационными алгоритмами и численными моделями. Поэтому в настоящее время в области оптимизации электротехнологических систем одной из основных проблем является интеграция численных нелинейных многомерных моделей в разрабатываемые на базе известных методов оптимизационные процедуры, которая преимущественно обусловлена необходимостью компромисса между точностью моделирования и высокими требованиями к вычислительным ресурсам.

Одной из наиболее широко используемых в промышленности технологий термической обработки металлов является поверхностная индукционная закалка, применение которой обусловлено необходимостью получения определенных изменений в микроструктуре поверхностного слоя обрабатываемого изделия.

В соответствии с вышесказанным самостоятельный интерес приобретает рассматриваемая в статье проблема построения программного комплекса для оптимизации процесса поверхностной индукционной закалки. При решении задач оптимального проектирования и управления режимами работы нагревателя, реализующего стадию нагрева процесса упрочнения стальных заготовок, используются интегрированные в оптимизационную процедуру численные проблемно-ориентированные модели исследуемого процесса.

Постановка задач оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя для поверхностной закалки

В общем случае процесс поверхностной индукционной закалки заключается в интенсивном нагреве обрабатываемого слоя детали до температур, значительно превышающих точку Кюри, что приводит к формированию в поверхностном слое аустенитной структуры, и резком охлаждении нагретого участка ниже температуры, при которой начинается процесс мартенситного преобразования [2–4]. Особенности формирования аустенита на первой стадии рассматриваемого процесса обуславливают необходимость получения максимально равномерного температурного поля в упрочняемом слое изделия для исключения на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя. В то же время снижается вероятность превышения

критического уровня закалочных напряжений, которые могут привести к выбраковке обрабатываемых заготовок. Поскольку использование типовых нагревателей и режимов их работы часто оказывается недостаточным для обеспечения требуемого температурного распределения в поверхностном слое, особенно важными представляются задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционной установки.

В работе рассматривается индукционная нагревательная система, состоящая из двухвиткового индуктора и стальной цилиндрической заготовки [5–6] (рис. 1).

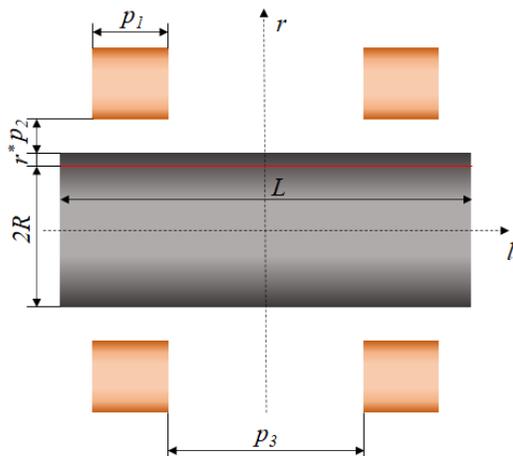


Рис. 1. Геометрия нагревательной системы

Витки сечением $p_1 \times p_1$ находятся на расстоянии p_2 от поверхности стальной цилиндрической заготовки радиусом R и длиной L . Витки расположены симметрично относительно оси r на расстоянии p_3 друг от друга.

Поведение электромагнитных и температурных полей в процессе индукционного нагрева в указанной осесимметричной системе с распределенными параметрами описывается известными взаимосвязанными уравнениями Максвелла и Фурье [5–7].

Задача оптимального проектирования индуктора заключается в поиске значений вектора оптимизируемых параметров $\bar{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, состоящего из перечисленных ранее геометрических характеристик индуктора и тока источника питания I . На указанные параметры накладываются ограничения, которые записываются в следующем виде:

$$p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max}, i = \overline{1, 3}; I_{\min} \leq I \leq I_{\max}. \quad (1)$$

Поскольку главной целью стадии нагрева поверхностной закалки является максимально равномерный нагрев закаливаемого слоя детали до заданной температуры, в качестве критерия оптимальности рассматривается максимум абсолютного отклонения температуры на границе поверхностного слоя толщиной r^* в конце стадии нагрева длительностью t^0 от заданного значения T^* , которое требуется минимизировать:

$$J_1 = \max_{l \in [0, L]} \left| T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}) - T^* \right| \rightarrow \min_{\bar{P}}. \quad (2)$$

Задача оптимального проектирования индуктора в таком случае формулируется следующим образом: требуется найти такие значения составляющих вектора оптимизируемых параметров \overline{P}^0 , стесненные ограничениями (1), которые обеспечивают за время t^0 достижение в поверхностном слое стальной заготовки толщиной r^* требуемой температуры T^* при минимальном значении критерия оптимальности (2) [5, 8].

Процесс закалки характеризуется высокой скоростью нагрева поверхностного слоя обрабатываемого изделия до температур выше точки Кюри, поэтому одной из существенных проблем становится возможный перегрев поверхности заготовки, которого можно избежать путем учета ограничения на максимальную температуру, согласно которому температура в процессе нагрева не должна превышать предельно допустимого значения $T_{дон}$ [6–9]:

$$T_{\max}(t) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, t) \leq T_{дон}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (3)$$

По этой причине важное значение приобретает решение задачи оптимального по критерию быстродействия

$$J_2 = \int_0^{t^0} dt = t^0 \rightarrow \min \quad (4)$$

управления мощностью источников внутреннего тепловыделения при наличии фазового ограничения (3) на максимальную температуру поверхности детали в процессе нагрева в индукторе оптимальной конструкции, полученной на этапе решения задачи оптимального проектирования.

Требования к конечному температурному распределению вдоль границы закаливаемого слоя заготовки имеют следующий вид:

$$\max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (5)$$

где ε_0 – максимальная величина абсолютного отклонения температуры от заданного значения.

Управляющим воздействием для данной задачи является управление током источника питания индуктора $I(t)$ с ограничением следующего вида:

$$I_{\min} \leq I(t) \leq I_{\max}. \quad (6)$$

Таким образом, задача оптимального управления сводится к поиску оптимальной программы изменения во времени сосредоточенного управляющего воздействия $I^*(t)$, стесненного ограничениями (6), которое обеспечивает перевод объекта из заданного начального в требуемое конечное состояние (5) за минимальное время согласно критерию (4) в условиях выполнения фазового ограничения (3).

Решение задач оптимального проектирования и управления

Сформулированные в предыдущем разделе задачи могут быть решены с помощью альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Согласно теории данного метода [10–11] оптимальным

значениям параметров вектора $\bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0)$, которые являются решением сформулированной задачи оптимального проектирования, отвечает пространственное распределение температур $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (2). Основное свойство результирующего температурного распределения $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ состоит в том, что число K точек $l_j^0 \in [0, L]$ вдоль продольного сечения обрабатываемой заготовки, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения конечной температуры $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ от требуемого значения T^* , равные ε_0 , всегда оказывается не меньше числа N искомого оптимизируемых параметров процесса. Кроме того, эти отклонения оказываются знакопеременными, то есть обладают альтернансным свойством. В [5–6] показано, что в рассматриваемом случае наличия четырех оптимизируемых параметров температурное распределение $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ имеет пять точек с максимальным отклонением температуры $\varepsilon_{\min}^{(4)}$ от T^* , что позволяет записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}, j = \overline{1, 5}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, I^0); \\ 0 = l_1^0 < l_2^0 < l_3^0 < l_4^0 < l_5^0 = L; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{2, 4}. \end{cases} \quad (7)$$

Система из восьми уравнений (7) оказывается замкнутой относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым в данном случае относятся четыре компонента вектора \bar{P}^0 , три координаты точек с предельно допустимым абсолютным отклонением температуры от заданной l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение этого отклонения $\varepsilon_{\min}^{(4)}$.

Как показано в [7, 9], программное управление для задачи оптимального по быстродействию управления является релейной функцией времени, попеременно принимающей свои предельно допустимые согласно (6) значения и заданной с точностью до вектора $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ длительностей соответствующих интервалов нагрева и выравнивания температур. Поскольку рассматриваемая задача сформулирована применительно к процессу поверхностной закалки, состоящему из одного интервала нагрева, алгоритм управления при наличии фазового ограничения (3) на максимальную температуру детали примет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\max}, t \in [0; t_1]; \\ I^T(t), t \in (t_1; t_2], \end{cases} \quad (8)$$

где $I^T(t)$ – управление на особом участке движения по ограничению, t_1 – момент выхода на этот участок, который находится из уравнения $\max_{\substack{l \in [0; L] \\ r \in [0; R]}} T(r, l, t_1) = T_{don}$, t_2 – время окончания стадии нагрева.

Согласно [7] оптимальное управление на особом участке может быть аппроксимировано с помощью кусочно-постоянной функции времени, представленной на рис. 2.

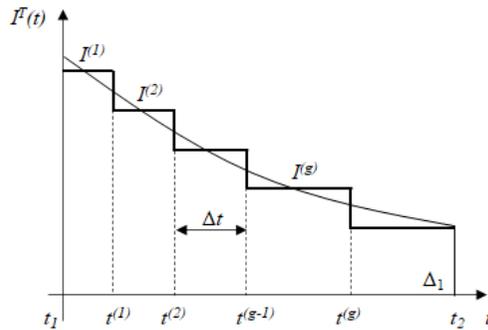


Рис. 2. Кусочно-постоянная аппроксимация управления $I^T(t)$

Приведенная аппроксимация управления на особом участке сводится к итерационной процедуре поиска на каждом временном шаге Δt значения управляющего воздействия $I^{(g)}$, $g = \overline{1, J}$, при котором выполняется условие

$$T_{\max}(t) = T_{don} \quad (9)$$

в моменты времени $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(J)}$, где $t^{(g)} = t_1 + g \cdot \Delta t$ [9]. При этом необходимая точность аппроксимации определяется выбором достаточно большого числа J шагов изменения управляющего воздействия при достаточно малой длительности каждого шага по времени Δt .

Время окончания нагрева t_2 соответствует моменту, когда средняя температура в упрочняемом слое достигает заданного значения T^* .

Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной индукционной закали

Для численного решения сформулированных задач оптимального проектирования и управления в ПО MATLAB был разработан программный комплекс, общая схема которого представлена на рис. 3.

Основой рассматриваемого программного комплекса является автоматизированная процедура оптимизации на базе альтернативного метода, сводящаяся в данном случае к решению системы уравнений (7) и расчету алгоритма оптимального управления (8). Результирующее двумерное температурное поле

$T(R - r^*, l_j^0, t^0, P^0)$ в (7) и температура $T_{\max}(t)$ в уравнении (9), являющиеся решением сложной взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, определяются с помощью специализированного пакета прикладных программ Al-

tair FLUX для численного моделирования электротехнологических систем [12]. Для этого в указанном программном пакете была разработана нелинейная двумерная численная модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки. Встроенная возможность интеграции разработанной FLUX-модели в ПО MATLAB [13] позволяет наиболее эффективно использовать данный пакет при построении показанного на рис. 3 программного комплекса.

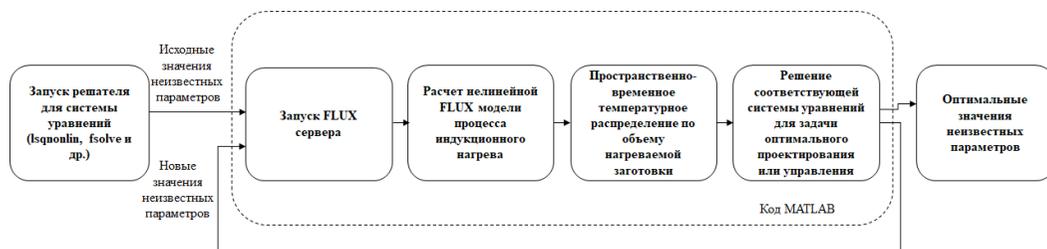


Рис. 3. Программный комплекс для оптимизации процесса поверхностной закалки в ПО MATLAB

Общую схему работы программного комплекса можно описать с помощью следующей последовательности шагов. На первом шаге происходит запуск решателя MATLAB для системы нелинейных трансцендентных уравнений альтернансного метода с начальными приближениями искомым оптимизируемых параметров, которые затем передаются в численную модель процесса нагрева. Взаимодействие пакетов MATLAB и FLUX осуществляется по клиент-серверной технологии, поэтому на схеме присутствует блок «запуск FLUX сервера». На этом этапе процедуры происходит запуск Altair FLUX в роли сервера, к которому в качестве клиента подключается пакет MATLAB. Для обмена данными между программами на каждом шаге приведенной процедуры оптимизации используются текстовые файлы. На втором шаге производится расчет численной модели с заданными начальными приближениями, результатом которого является пространственно-временное температурное распределение по объему нагреваемой заготовки, которое затем используется при решении соответствующей системы уравнений альтернансного метода. В случае, если решение системы с заданной точностью найдено, полученные значения оптимизируемых параметров сохраняются в отдельном файле. В противном случае осуществляется повторный расчет значений искомым параметров, которые вновь передаются в разработанную численную модель процесса, после чего начинается новая итерация представленной процедуры оптимизации. Окончанием представленной итерационной процедуры является достижение либо заданной точности решения, либо заданного на этапе вызова решателя количества итераций.

В общем случае для решения как нелинейных уравнений, так и систем таких уравнений в ПО MATLAB реализован ряд существенно отличающихся друг от друга решателей, к которым относятся: `fsolve`, `lsqnonlin`, `fmincon`, `lsqcurvefit`, `fminunc`, `fzero` и др. Практически все указанные решатели входят в набор инструментов Optimization Toolbox [14] программного пакета MATLAB и не могут быть использованы без него. Поскольку рассматриваемая оптимизационная процедура разрабатывается для решения задач оптимального проектирования и управления, предполагающих задание ограничений на значения искомым оптимизируемых параметров, то для решения соответствующих систем уравнений можно использовать только функции `lsqcurvefit`, `lsqnonlin` и `fmincon`. Для рассматриваемой

процедуры был выбран решатель Isqnonlin, осуществляющий поиск неизвестных значений переменных с заданными ограничениями, который минимизирует значение нелинейной функции, являющейся суммой квадратов невязок системы однородных нелинейных уравнений.

Результаты решения задач оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя для поверхностной закалки

Представленный на рис. 3 программный комплекс был использован для решения сформулированных задач оптимального проектирования и управления режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок. Исходные данные для построения численной FLUX-модели показаны в табл. 1.

На параметры вектора \bar{P} накладываются следующие ограничения:

$$5 \leq p_1 \leq 15, 2 \leq p_2 \leq 10, 3 \leq p_3 \leq 15, 500 \leq I \leq 1500. \quad (10)$$

Общий вид FLUX модели системы «индукционная установка – заготовка» с наложенной конечно-элементной сеткой представлен на рис. 4.

Таблица 1

Исходные данные для построения модели в пакете FLUX

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Частота питающего тока	f	100000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	900	°С
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°С
Начальная температура заготовки	T_0	20	°С
Количество витков индуктора	N	2	
Радиус заготовки	RB	14	мм
Длина заготовки	LB	32.9	мм
Время нагрева	t^0	8	с
Толщина закаливаемого слоя	r^*	4	мм
Материал заготовки		Сталь (C40) [15]	

Для всех указанных ранее неизвестных параметров процесса с учетом ограничений (10) были заданы начальные приближения, которые сведены в табл. 2. В результате запуска автоматизированной процедуры оптимизации с указанными начальными приближениями оптимизируемых параметров были получены результаты, которые также приведены в табл. 2.

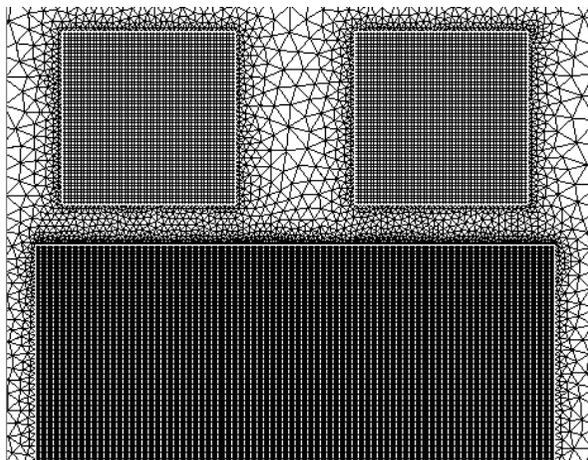
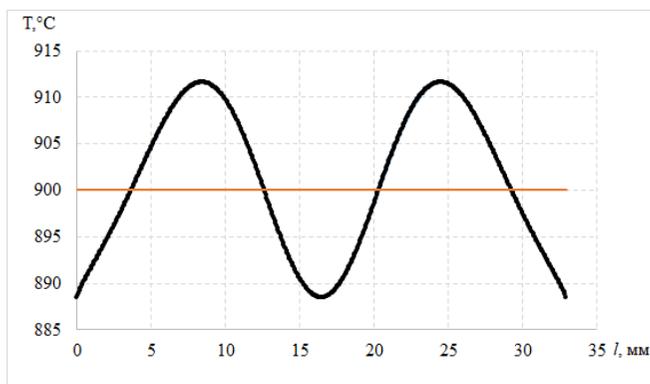


Рис. 4. Численная FLUX-модель с наложенной сеткой

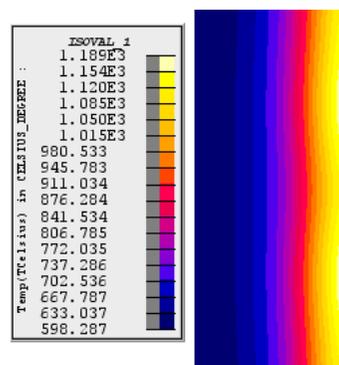
Таблица 2

Начальные приближения и оптимальные значения искомым параметров

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Начальное приближение	13 мм	4 мм	3 мм	1045 А	–
Оптимальное значение	11,9 мм	3 мм	4,4 мм	1382 А	11,5 °С



a



б

Рис. 5. Результаты решения задачи оптимального проектирования:
a – конечное распределение температуры на границе закаливаемого слоя;
б – температурное поле в продольном сечении заготовки в конце стадии нагрева

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя $r = R - r^*$, а также температурное поле по продольному сечению заготовки в конце стадии нагрева поверхностной индукционной закалки с найденными оптимальными

значениями конструктивных параметров индуктора представлены на рис. 5. Анализ результатов показывает, что максимальное отклонение температуры вдоль границы упрочняемого слоя заготовки составляет не более $11,5^\circ\text{C}$, что полностью удовлетворяет самым жестким технологическим требованиям, предъявляемым к процессу поверхностной закалки.

Как было указано на этапе постановки задач оптимизации, с целью исключения перегрева поверхности заготовки выше допустимой температуры $T_{\text{доп}} = 1050^\circ\text{C}$ для найденной конструкции индукционного нагревателя решается задача оптимального по быстродействию управления с учетом фазового ограничения на максимальную температуру вида (3).

На первом шаге решения сформулированной задачи была произведена аппроксимация особого участка управления кусочно-постоянной функцией времени, показанной на рис. 2. Найденный в результате данной аппроксимации алгоритм управления представлен на рис. 6а. Значения конструктивных характеристик нагревателя приняты равными оптимальным значениям, полученным в результате решения задачи оптимального проектирования (см. табл. 2).

Для технической реализации найденного оптимального алгоритма управления необходимо провести аппроксимацию полученной кусочно-постоянной функции времени с помощью непрерывной функции, для чего используется инструмент Curve Fitting Tool программного пакета MATLAB [14]. Данный модуль позволяет провести аппроксимацию экспериментальных данных с помощью различных функций, включая степенные полиномы, экспоненциальные функции, функцию Фурье и Гаусса и другие. В рассматриваемом случае максимальная точность аппроксимации достигается при экспоненциальной зависимости вида

$$I^T(t) = ae^{bt} + ce^{dt}, \quad (11)$$

параметры a, b, c, d которой определяются инструментом Curve Fitting Tool автоматически.

Таким образом, искомое программное управление для задачи с ограничением на максимальную температуру детали примет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1382A, & t \in [0; 6.1]; \\ 8.349 \cdot 10^{15} e^{(-5.154t)} + 1979e^{(-0.0852t)}, & t \in (6.1; 9.7]. \end{cases} \quad (12)$$

Время выхода максимальной по объему закаливаемой заготовки температуры на ограничение составило $t_1 = 6.1\text{ с}$, а общее время стадии нагрева $t_2 = 9.7\text{ с}$. (рис. 6б).

Конечные распределения температуры по границе закаливаемого слоя и вдоль боковой поверхности заготовки в конце оптимальной по быстродействию стадии нагрева поверхностной закалки с учетом ограничения на максимально допустимую температуру представлены на рис. 7.

Как видно из представленных результатов, на поверхности нагреваемой детали отсутствует перегрев, имевший место при нагреве с постоянной максимальной мощностью. Максимальная температура в течение всей стадии нагрева не превышает допустимого значения $T_{\text{доп}} = 1050^\circ\text{C}$ более чем на 1°C , что вызвано погрешностями численного расчета.

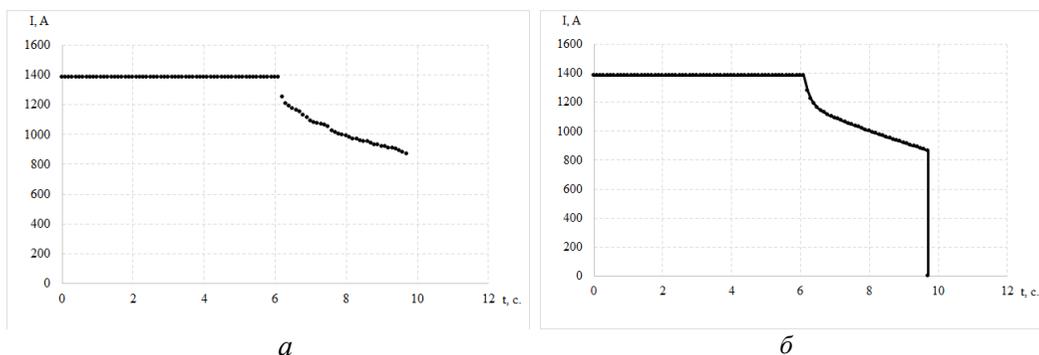


Рис. 6. Алгоритмы оптимального по быстродействию управления в задаче с ограничением на максимальную температуру:

a – аппроксимация алгоритма управления с помощью кусочно-постоянной функции;
б – аппроксимация алгоритма управления с помощью экспоненциальной функции

Техническая реализация оптимального алгоритма управления с учетом ограничения на максимально допустимую температуру заготовки

Современный рынок технических средств для построения промышленных систем автоматического управления позволяет осуществить техническую реализацию найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимально допустимую температуру обрабатываемой детали.

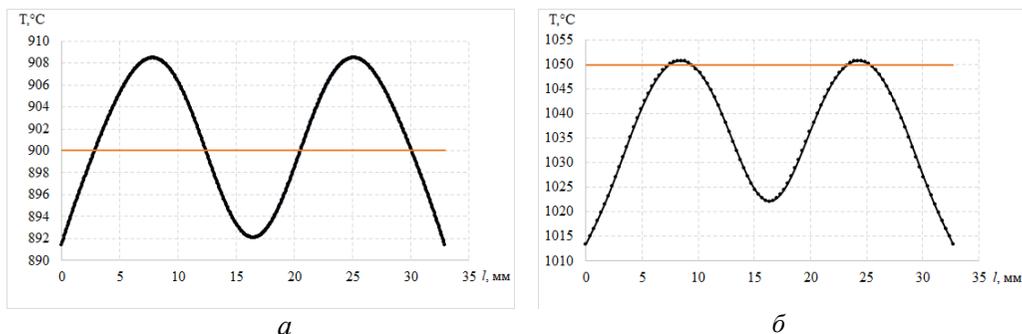


Рис. 7. Конечные температурные распределения:

a – вдоль границы закаливаемого слоя заготовки;
б – вдоль боковой поверхности заготовки

В качестве среды для программирования контроллера был выбран пакет Codesys v2.3 [16]. Данная программная среда позволяет разрабатывать программы на любом из языков программирования ПЛК стандарта IEC 61131-3, а также создавать систему визуализации для панелей оператора. Достоинством данного ПО является возможность использования ПК в режиме эмулирования реального ПЛК, что позволяет осуществить отладку созданного программного кода перед подключением к реальному оборудованию.

На первом шаге технической реализации в качестве объекта управления используется FLUX-модель процесса, а персональный компьютер – в режиме эмулирования работы ПЛК. В данном случае возникает проблема обмена данными между двумя программными пакетами, для решения которой используется библиотека Simulink в качестве промежуточного звена взаимодействия.

Существует несколько вариантов обмена данными в реальном времени между Codesys и Simulink. Одним из них является применение OPC технологии, использование которой предполагает настройку программной среды Codesys в качестве OPC-сервера и дальнейшее подключение к нему ПО MATLAB с помощью набора инструментов OPC Toolbox. Данный набор инструментов включает блоки конфигурирования OPC, считывания значений переменных с заданного OPC-сервера и передачу в него данных, полученных в Simulink (рис. 8) [8].

Подключение пакета FLUX к библиотеке Simulink осуществляется с помощью клиент-серверной технологии, где в качестве сервера выступает ПО FLUX, к которому в роли клиента подключается ПО MATLAB. Запуск FLUX-сервера в этом случае обеспечивается стандартным m-файлом, входящим в библиотеку FLUX. В Simulink-модели данный файл представлен блоком Interpreted MATLAB-function, который позволяет запускать m-файлы функции непосредственно в Simulink.

Таким образом, на каждом шаге расчета модели управляющее воздействие из контроллера будет передаваться в Simulink-модель с помощью OPC-технологии, а затем и в FLUX-модель процесса, после чего происходит расчет одного шага FLUX-модели с переданным значением управления и передача полученного температурного распределения вдоль боковой поверхности заготовки в Simulink. На последнем шаге в Simulink производится вычисление максимального значения температуры и передача его в контроллер, который, в свою очередь, рассчитывает новое значение управляющего воздействия, если температура поверхности достигла своего максимально допустимого значения.

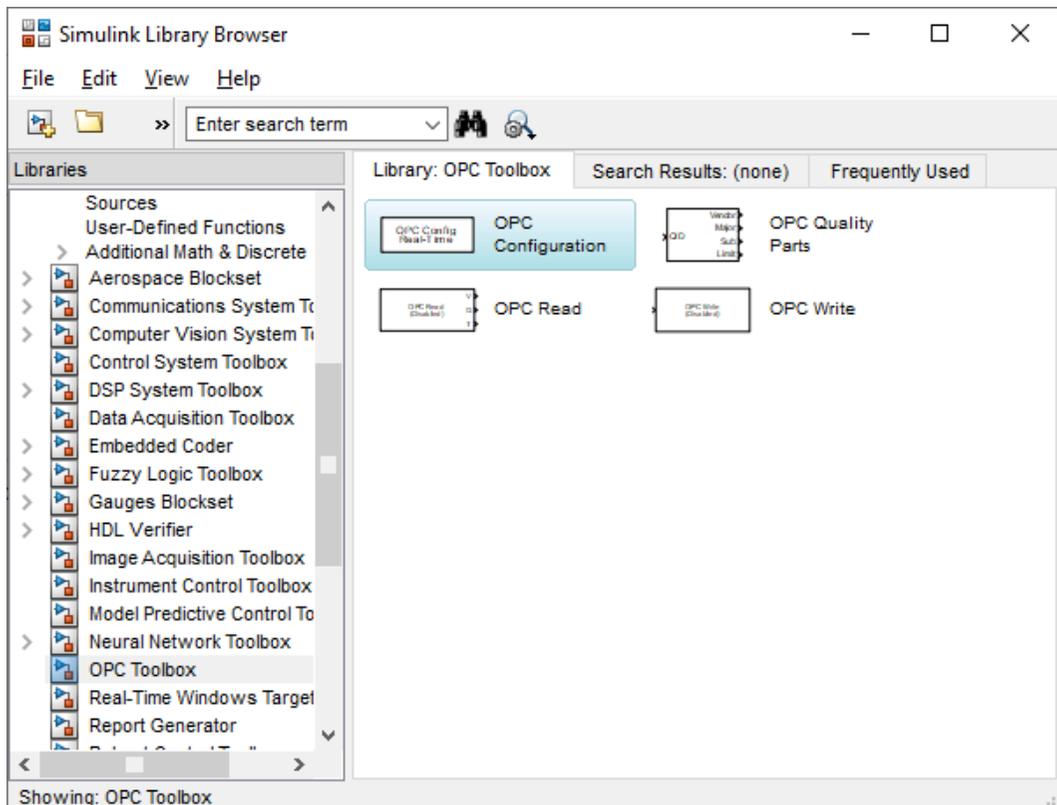


Рис. 8. Набор блоков инструмента OPC Toolbox

Общий вид полученной Simulink-модели, а также внешний вид созданной в среде Codesys системы визуализации показаны на рис. 9.

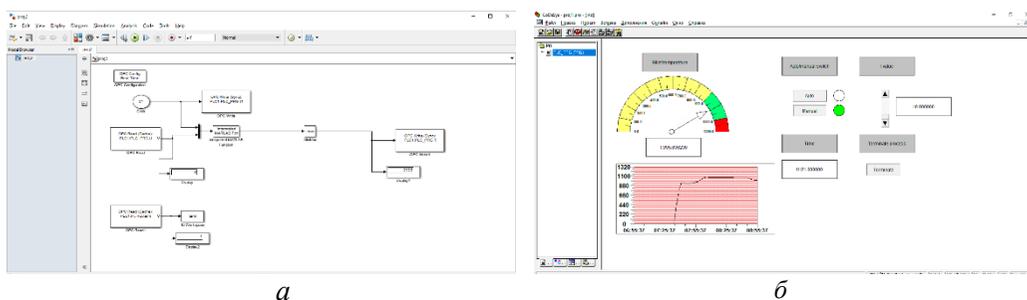


Рис. 9. Техническая реализация алгоритма управления с ограничением на максимальную температуру:

a – Simulink-модель; *б* – система визуализации Codesys

Программа контроллера написана так, что при загрузке в индуктор новой заготовки по умолчанию запускается автоматический режим, который реализует полученный алгоритм оптимального управления (12). После окончания процесса контроллер автоматически переходит в ручной режим с нулевым значением управляющего воздействия. В этом режиме оператор имеет возможность самостоятельно задавать требуемое значение управления. В течение всего процесса на экране отображаются текущие значения времени процесса и максимальной температуры заготовки, а также сохраняется история изменения максимальной температуры во времени.

Как видно из рис. 10, максимальная температура заготовки в течение всего процесса нагрева в автоматическом режиме не превышала своего допустимого значения.

На следующем шаге технической реализации необходимо выбрать технические средства автоматизации, соответствующие основным требованиям к ПЛК: наличие аналоговых входов (для передачи значения максимальной температуры с инфракрасного датчика температуры) и выходов (для задания тока источника питания), малое время опроса аналогового входа, а также наличие интерфейса RS-485 для подключения датчика температуры. Всем этим требованиям удовлетворяет ПЛК150 компании ОВЕН (рис. 11а) [17].

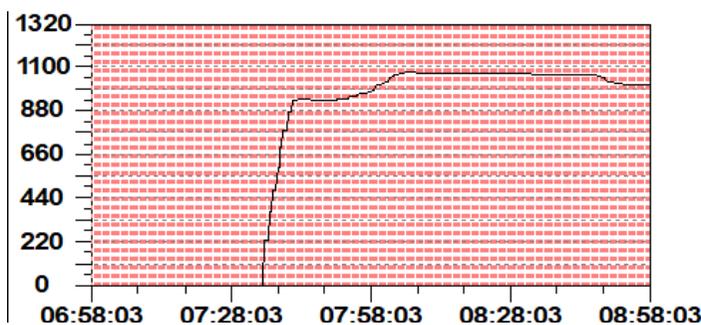


Рис. 10. История изменения максимальной температуры в Codesys



Рис. 11. Вид средств автоматизации компании ОВЕН:
 а – ПЛК150; б – панели оператора семейства ОВЕН СП3хх

Данный ПЛК имеет 6 дискретных входов, 4 дискретных выхода типа электромагнитного реле, а также 4 аналоговых входа и 2 аналоговых выхода. Время опроса одного выхода в данном контроллере составляет 0,5 секунды, что соответствует требованиям к быстродействию контроллера для данного процесса. Существенным преимуществом данного контроллера является встроенная возможность связи со средой разработки Codesys.

В качестве панели оператора для реализации системы визуализации, разработанной в Codesys, предлагается использовать панель ОВЕН СП307-Б (рис. 11б) [18].

Заключение

В работе представлен программный комплекс для оптимизации на базе альтернативного метода процесса поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок. Сформулированы задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционного нагревателя в условиях наличия фазового ограничения на максимальную температуру обрабатываемой детали. Приведены результаты решения сформулированных задач с помощью описанного программного комплекса, которые полностью удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к процессам поверхностного упрочнения. Рассмотрен вариант технической реализации полученной программы оптимального по быстродействию управления в программной среде Codesys.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.
2. Rudnev V.I. et al. Handbook of Induction Heating. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. 797 p.
3. Блантер М.Е. Металловедение и термическая обработка. – М.: Машгиз, 1963. – 416 с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.
5. Плевшицева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю. Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 40–50.

6. *Popov A.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, 2019. Pp. 237–241.
7. *Рапопорт Э.Я., Пleshivtseva Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012. – 309 с.
8. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2020. – 24 с.
9. *Попов А.В., Дьяконов А.И.* Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 56–68.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
12. Flux [Электронный ресурс]: сайт программного продукта FLUX. URL: www.altair.com/flux/ (дата обращения 01.05.2021).
13. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
14. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]: сайт документации MATAB. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения 04.05.2021).
15. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
16. Codesys [Электронный ресурс]. URL: <https://www.codesys.com/> (дата обращения 03.05.2021).
17. OWEN ПЛК [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/product/plk100_150_154/ (дата обращения 04.05.2021).
18. OWEN панели оператора [Электронный ресурс]. URL: <https://www.owen.ru/product/sp3xx/> (дата обращения 04.05.2021).

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2021 г.

PROGRAM COMPLEX FOR OPTIMIZATION OF SURFACE HARDENING OF STEEL BILLETS*

A.V. Popov, Yu.E. Pleshivtseva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *The aim of the paper is to develop program complex in software MATLAB with integrated numerical 2D nonlinear FLUX model, which is used for solving optimal inductor design and control problems for heating stage of surface induction hardening. Considered program complex is based on alternance method, that allows to write systems of transcendental equations, closed with respect to all unknown design and control parameters of the process. The suggestion for implementation of obtained optimal control algorithm is presented.*

Keywords: *surface hardening, induction heating, optimal design, time-optimal control, program complex, alternance method, numerical model, electromagnetic and thermal fields, FLUX.*

**The work was funded by RFBR, projects №20-08-00240, №19-08-00232.*

*Anton V. Popov, Junior researcher.
Yulia E. Pleshivtseva, Professor.*

REFERENCES

1. *Rapoport E.Ya.* Optimalnoe upravleniye sistemami s raspredelennimi parameterami [Optimal control of systems with distributed parameters]. Moscow: Visshaya shkola, 2009. 678 p.
2. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of Induction Heating. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. 797 p.
3. *Blanter M.E.* Metallovedenie i termicheskaya obrabotka [Metal science and heat treatment]. Moscow: Mashgiz, 1963. 416 p.
4. *Lakhtin Yu.M.* Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal science and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 360 p.
5. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Popova M.A., Derevyanov M.Yu.* Optimalnoye proektirovaniye induktora dlya poverkhnostnoi zakalki tsilindricheskikh zagotovok na osnove chislennoi dvumernoi modeli [Optimal inductor design for surface hardening of cylindrical billets] // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series "Control, computer engineering, informatics". Astrakhan, 2019. No. 1. Pp. 40–50.
6. *Popov A.V.* Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, 2019. Pp. 237–241.
7. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimalnoe upravleniye temperaturnimi rezhimami induktsionnogo nagreva [Optimal control of induction heating processes]. Moscow: Nauka, 2012. 309 p.
8. *Popov A.V.* Optimalnoe proektirovaniye i upravlenie rezhimami induktsionnogo nagreva v protsesse poverkhnostnoy zakalki. Avtoref. kand. diss. [Optimal design and control of induction heating for surface hardening process. Cand. diss. abstract]. Samara, 2020. 24 p.
9. *Popov A.V., Diakonov A.I.* Optimalnoe po bistrodeystviyu upravlenie protsessom periodicheskogo induktsionnogo nagreva s uchetom ogranicheniya na maksimalnuyu temperaturu [Time-optimal control of batch induction heating process with respect to maximum temperature restriction] // Bulletin of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2015. No. 3(47). Pp. 56–68.
10. *Rapoport E.Ya.* Optimizatsiya protsessov induktsionnogo nagreva metalla [Optimization of induction heating processes]. Moscow: Metallurgiya, 1993. 279 p.
11. *Rapoport E.Ya.* Alternansniy metod v prikladnikh zadachakh optimizatsii [Alternance method in applied optimization problems]. Moscow: Nauka, 2000. 336 p.
12. Flux [electronic source]: www.altair.com/flux/ (accessed 01.09.2020).
13. *Pleshivtseva Yu., Rogachev G., Popov A.* MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29,02033 (2016).
14. MATLAB Documentation [electronic source]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (accessed 04.05.2021).
15. *Marochnik staley i splavov 2-e izdaniye* [Grade guide of steels and alloys. Second edition] / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu.V. Kashirskiy et al. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p.
16. Codesys [electronic source]. URL: <https://www.codesys.com/> (accessed 03.05.2021).
17. Owen PLC [electronic source]. URL: https://owen.ru/product/plk100_150_154/ (accessed 04.05.2021).
18. Owen operator panels [electronic source]. URL: <https://www.owen.ru/product/sp3xx/> (accessed 04.05.2021).

УДК 621.3.078

СИНТЕЗ ФИНИТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

А.В. Стариков, В.А. Кирдяшев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Статья посвящена синтезу финитного регулятора для цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем, а также определению возможности и сферы его применения. Рассмотрена структурная схема одноконтурного следящего электропривода, содержащая цифровой финитный регулятор, обеспечивающий завершение переходных процессов за строго определенное количество тактов периода дискретизации. Предложен вид дискретной передаточной функции финитного регулятора. Найдена передаточная функция замкнутого электропривода с предложенным типом регулятора. Составлена и решена система уравнений, позволяющая определить параметры настройки финитного регулятора для следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем. Приведены результаты компьютерного моделирования, показывающие, что переходные процессы по управляющему и возмущающему воздействию в следящем электроприводе завершаются за 6 тактов периода дискретизации. Получена формула для расчета выходного сигнала финитного регулятора при цифровой технической реализации на микроконтроллере. Разработана расчетная модель рассматриваемого цифрового электропривода, учитывающая ограничение тока и напряжения в силовом преобразователе. Показано, что при малых периодах дискретизации следящий электропривод с финитным регулятором требует ограничения тока на уровне 16 номинальных значений. При малых значениях ограничения привод становится неустойчивым. Для обеспечения работоспособности электропривода с финитным регулятором предложено увеличить период дискретизации. Показано, что при этом следящий электропривод сохраняет устойчивость во всем диапазоне перемещений даже при ограничениях тока и напряжения на уровне номинальных значений. Результаты моделирования позволили сделать вывод о том, что разрабатываемый электропривод обладает высоким быстродействием, поскольку при отработке управляющего воздействия вход в зону ± 1 дискрета от заданного значения составляет 0,022 с. Показано, что отрицательным эффектом от применения финитного управления в следящем электроприводе с синхронным исполнительным двигателем является наличие статической ошибки позиционирования, которая возрастает с увеличением периода дискретизации. Предложено дополнить рассматриваемый электропривод еще одним контуром положения с интегральным регулятором, позволяющим скомпенсировать статическую ошибку позиционирования.*

Ключевые слова: *следящий электропривод, финитный регулятор, дискретная передаточная функция, синхронный двигатель.*

Стариков Александр Владимирович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика».

Кирдяшев Виктор Александрович, аспирант.

Быстродействие следящего электропривода при обработке управляющих и возмущающих воздействий является одной из важных характеристик следящего электропривода. Повышение быстродействия приводит к увеличению производительности и динамической точности оборудования, в котором применяются такие электроприводы. Поэтому увеличение быстродействия следящих электроприводов является актуальной задачей. Для ее решения применяют различные методы и подходы. Например, для повышения быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем, построенного по принципам систем подчиненного регулирования, используют статическую коррекцию характеристик двигателя [1–3]. При этом достижимое быстродействие определяется временем переходного процесса порядка 1 с. Другой подход в повышении быстродействия следящих электроприводов заключается в применении структурного построения многоконтурных систем с одной измеряемой координатой и соответствующей методики синтеза регуляторов, учитывающей дискретный характер передачи управляющих воздействий при цифровой технической реализации [4–12]. В этом случае достигается время переходного процесса, не превышающее 0,07 с. Однако давно известно так называемое финитное управление, позволяющее за определенное количество тактов периода дискретизации перевести объект цифровой системы из одного состояния в другое [13]. Причем следует отметить, что количество тактов определяется только порядком знаменателя дискретной передаточной функции системы. Очевидно, что при малых значениях периода дискретизации финитное управление должно привести к очень высокому быстродействию системы.

Целью исследования является синтез финитного регулятора для цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем и определение возможности и сферы его применения.

Для решения поставленной задачи прежде всего предположим, что в следящем электроприводе используется только отрицательная обратная связь по перемещению (положению) исполнительного механизма. Тогда линеаризованная структурная схема цифровой системы управления следящим электроприводом будет выглядеть следующим образом (рис. 1).

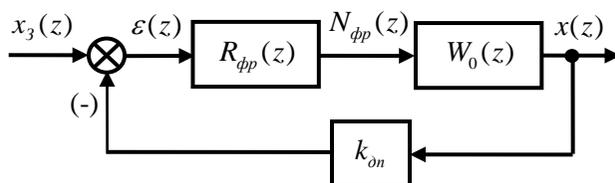


Рис. 1. Линеаризованная структурная схема цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем и финитным регулятором

На структурной схеме приняты следующие обозначения: $R_{\phi p}(z)$ – дискретная передаточная функция регулятора, обеспечивающего финитное управление; $W_0(z)$ – дискретная передаточная функция непрерывной части системы (силового преобразователя, синхронного двигателя и исполнительного механизма) с учетом экстраполятора нулевого порядка; k_{on} – коэффициент передачи датчика положения; $x_3(z)$ – изображение задающего воздействия; $x(z)$ – изображение

перемещения ротора; $\varepsilon(z)$ и $N_{\text{фп}}(z)$ – изображения сигналов на входе и выходе финитного регулятора; на $z = e^{pT}$; p – комплексная переменная; T – период дискретизации по времени.

Для синтеза финитного регулятора для рассматриваемого цифрового следящего электропривода необходимо знать дискретную передаточную функцию $W_0(z)$. Предположим, что силовой преобразователь в рассматриваемом следящем электроприводе будет одновременно выполнять функцию экстраполятора, то есть запоминать на такт периода дискретизации по времени выходной сигнал финитного регулятора $N_{\text{фп}}$. Тогда передаточную функцию непрерывной части цифрового электропривода можно представить следующим образом [14, 15]:

$$W_n(p) = \frac{k_{\text{cn}}k_{\text{oy}}}{(T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi_{\kappa} T_{\kappa} p + 1)p}, \quad (1)$$

где k_{cn} – коэффициент передачи силового преобразователя;

k_{oy} – коэффициент передачи объекта управления (синхронного двигателя совместно с исполнительным механизмом);

T_{κ} и ξ_{κ} – постоянная времени и коэффициент демпфирования колебательного звена, которым может быть представлена передаточная функция синхронного двигателя.

Непрерывной части, описываемой формулой (1), с учетом экстраполятора нулевого порядка соответствует дискретная передаточная функция [14, 15]

$$W_0(z) = \frac{x(z)}{N_{\text{фп}}(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^3 + a_1 z^2 + a_2 z + a_3}, \quad (2)$$

где $b_0 = k_{\text{cn}}k_{\text{oy}} \left[T - 2\xi_{\kappa} T_{\kappa} (1 - d \cos \beta T) - \frac{1 - 2\xi_{\kappa}^2}{\beta} d \sin \beta T \right]$; $d = e^{-\frac{\xi_{\kappa} T}{T_{\kappa}}}$; $\beta = \frac{\sqrt{1 - \xi_{\kappa}^2}}{T_{\kappa}}$;

$$b_1 = 2k_{\text{cn}}k_{\text{oy}} \left[\xi_{\kappa} T_{\kappa} (1 - d^2) + \frac{1 - 2\xi_{\kappa}^2}{\beta} d \sin \beta T - T d \cos \beta T \right];$$

$$b_2 = k_{\text{cn}}k_{\text{oy}} \left[T d^2 + 2\xi_{\kappa} T_{\kappa} (d^2 - d \cos \beta T) - \frac{1 - 2\xi_{\kappa}^2}{\beta} d \sin \beta T \right];$$

$$a_1 = -(1 + 2d \cos \beta T); a_2 = d^2 + 2d \cos \beta T; a_3 = -d^2.$$

Дискретную передаточную функцию цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление в рассматриваемом следящем электроприводе, будем искать в виде

$$R_{\text{фп}}(z) = \frac{N_{\text{фп}}(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{g_0 z^3 + g_1 z^2 + g_2 z + g_3}{z^3 + r_1 z^2 + r_2 z + r_3}. \quad (3)$$

Для определения неизвестных коэффициентов $g_0, g_1, g_2, g_3, r_1, r_2$ и r_3 найдем дискретную передаточную функцию замкнутого следящего электропривода. С учетом формул (2) и (3) и структурной схемы, приведенной на рис. 1, она будет выглядеть следующим образом:

$$W(z) = \frac{x(z)}{x_3(z)} = \frac{b_{01}z^5 + b_{11}z^4 + b_{21}z^3 + b_{31}z^2 + b_{41}z + b_{51}}{z^6 + a_{11}z^5 + a_{21}z^4 + a_{31}z^3 + a_{41}z^2 + a_{51}z + a_{61}}, \quad (4)$$

где $b_{01} = b_0g_0$; $b_{11} = b_1g_0 + b_0g_1$; $b_{21} = b_2g_0 + b_1g_1 + b_0g_2$; $b_{31} = b_2g_1 + b_1g_2 + b_0g_3$;
 $b_{41} = b_2g_2 + b_1g_3$; $b_{51} = b_2g_3$; $a_{11} = a_1 + r_1 + k_{on}b_0g_0$;
 $a_{21} = a_2 + a_1r_1 + r_2 + k_{on}(b_1g_0 + b_0g_1)$; $a_{31} = a_3 + a_2r_1 + a_1r_2 + k_{on}(b_2g_0 + b_1g_1 + b_0g_2)$;
 $a_{41} = a_3r_1 + a_2r_2 + a_1r_3 + k_{on}(b_2g_1 + b_1g_2 + b_0g_3)$; $a_{51} = a_3r_2 + a_2r_3 + k_{on}(b_2g_2 + b_1g_3)$;
 $a_{61} = a_3r_3 + k_{on}b_2g_3$.

Финитное управление требует, чтобы знаменатель передаточной функции (4) имел только нулевые корни, то есть необходимо, чтобы

$$W(z) = \frac{b_{01}z^5 + b_{11}z^4 + b_{21}z^3 + b_{31}z^2 + b_{41}z + b_{51}}{z^6}. \quad (5)$$

Для обеспечения выполнения этого условия приравняем нулю все коэффициенты знаменателя (4) при степенях z ниже шестой. В результате получим систему шести уравнений, связывающих между собой параметры регулятора с коэффициентами дискретной передаточной функции объекта управления:

$$\left. \begin{aligned} a_1 + r_1 + k_{on}b_0g_0 &= 0; \\ a_2 + a_1r_1 + r_2 + k_{on}(b_1g_0 + b_0g_1) &= 0; \\ a_3 + a_2r_1 + a_1r_2 + k_{on}(b_2g_0 + b_1g_1 + b_0g_2) &= 0; \\ a_3r_1 + a_2r_2 + a_1r_3 + k_{on}(b_2g_1 + b_1g_2 + b_0g_3) &= 0; \\ a_3r_2 + a_2r_3 + k_{on}(b_2g_2 + b_1g_3) &= 0 \\ a_3r_3 + k_{on}b_2g_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Система (6) имеет шесть уравнений и семь неизвестных $g_0, g_1, g_2, g_3, r_1, r_2$ и r_3 , что дает нам определенную свободу выбора одного из параметров синтезируемого регулятора. Именно поэтому сделан выбор передаточной функции финитного регулятора в виде формулы (3).

Приравняем коэффициент g_0 единице, в результате система уравнений (6) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} a_1 + r_1 + k_{on}b_0 &= 0; \\ a_2 + a_1r_1 + r_2 + k_{on}(b_1 + b_0g_1) &= 0; \\ a_3 + a_2r_1 + a_1r_2 + k_{on}(b_2 + b_1g_1 + b_0g_2) &= 0; \\ a_3r_1 + a_2r_2 + a_1r_3 + k_{on}(b_2g_1 + b_1g_2 + b_0g_3) &= 0; \\ a_3r_2 + a_2r_3 + k_{on}(b_2g_2 + b_1g_3) &= 0 \\ a_3r_3 + k_{on}b_2g_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) позволяет найти настройки цифрового регулятора, обеспечивающего финитное управление следящим электроприводом с синхронным исполнительным двигателем, причем параметры регулятора могут быть последовательно вычислены по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned}
d_1 &= a_3 + (a_1 + k_{on} b_0)(a_1^2 - a_2) - a_1 a_2 - k_{on}(a_1 b_1 - b_2); \quad d_2 = k_{on} \left[\frac{(b_2 - a_2 b_0) b_0}{a_1 b_0 - b_1} + b_1 \right]; \\
d_3 &= k_{on} \left[b_0 - \frac{a_1 b_2}{a_3} - \frac{(b_2 - a_2 b_0) b_2}{a_3 (a_1 b_0 - b_1)} \right]; \\
d_4 &= \frac{(b_2 - a_2 b_0) d_1}{a_1 b_0 - b_1} + (a_1 + k_{on} b_0)(a_1 a_2 - a_3) - a_2^2 - k_{on} a_2 b_1; \quad d_5 = k_{on} \left[b_2 - \frac{a_3 b_0 b_1}{a_1 b_0 - b_1} \right]; \\
d_6 &= k_{on} \left[b_1 - \frac{a_2 b_2}{a_3} - \frac{b_0 b_2}{a_1 b_0 - b_1} \right]; \quad d_7 = a_1 a_3 (a_1 + k_{on} b_0) - \frac{a_3 b_0 d_1}{a_1 b_0 - b_1} - a_2 a_3 - k_{on} a_3 b_1; \\
g_3 &= \frac{d_4 d_5 - d_2 d_7}{d_2 d_6 - d_3 d_5}; \quad g_2 = -\frac{d_3 g_3 + d_4}{d_2}; \quad g_1 = \frac{b_0 g_2}{a_1 b_0 - b_1} - \frac{b_2 g_3}{a_3 (a_1 b_0 - b_1)} + \frac{d_1}{k_{on} (a_1 b_0 - b_1)}; \\
g_0 &= 1; \quad r_3 = -\frac{k_{on} b_2}{a_3} g_3; \quad r_2 = a_1 (a_1 + k_{on} b_0) - a_2 - k_{on} (b_1 + b_0 g_1); \quad r_1 = -(a_1 + k_{on} b_0).
\end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для проверки адекватности полученных формул (3) – (8) найдем коэффициенты дискретных передаточных функций для конкретного вида следящего электропривода поворотного стола, оснащенного синхронным исполнительным двигателем 1FK7060-5AF71. Математическая модель двигателя может быть описана колебательным звеном с параметрами $T_\kappa = 9,859 \cdot 10^{-3}$ с и $\xi_\kappa = 0,4829$. Исполнительный механизм и двигатель имеют общий коэффициент передачи $k_{oy} = 1539,6$ дискрет/Вс. Для управления скоростью синхронного двигателя используется цифровой силовой преобразователь с коэффициентом передачи $k_{cn} = 0,0067$ В/дискрет. Расчет показывает, что при периоде дискретизации $T = 0,002$ с непрерывный объект с учетом экстраполятора нулевого порядка описывается дискретной передаточной функцией (2) с коэффициентами: $b_0 = 1,34835 \cdot 10^{-4}$; $b_1 = 5,128598 \cdot 10^{-4}$; $b_2 = 1,222467 \cdot 10^{-4}$; $a_1 = -2,784836$; $a_2 = 2,606915$; $a_3 = -0,822079$. Отсюда следует, что в соответствии с формулами (8) финитный регулятор должен иметь следующие параметры: $g_0 = 1$; $g_1 = 10149,47$; $g_2 = -14233,75$; $g_3 = 5382,084$; $r_1 = 2,784701$; $r_2 = 3,779004$; $r_3 = 0,800339$. Тогда дискретная передаточная функция (5) замкнутого следящего электропривода с финитным регулятором будет выглядеть следующим образом:

$$W(z) = \frac{1,34835 \cdot 10^{-4} z^5 + 1,36902 z^4 + 3,28617 z^3 - 5,33349 z^2 + 1,02023 z + 0,65794}{z^6}. \quad (9)$$

Моделирование в программе Matlab Simulink передаточной функции (9) показывает, что в следящем электроприводе с синхронным исполнительным двигателем действительно наблюдается финитное управление (рис. 2). Переходный процесс завершается за 0,012 с, то есть за 6 тактов периода дискретизации. Однако следует обратить внимание на очень большое перерегулирование, которое составляет 366 %. Аналогичный результат получается, если моделировать следящий электропривод в виде композиции дискретного финитного регулятора, экстраполятора нулевого порядка и синхронного двигателя с исполнительным механизмом, охваченных обратной связью по положению (рис. 3).

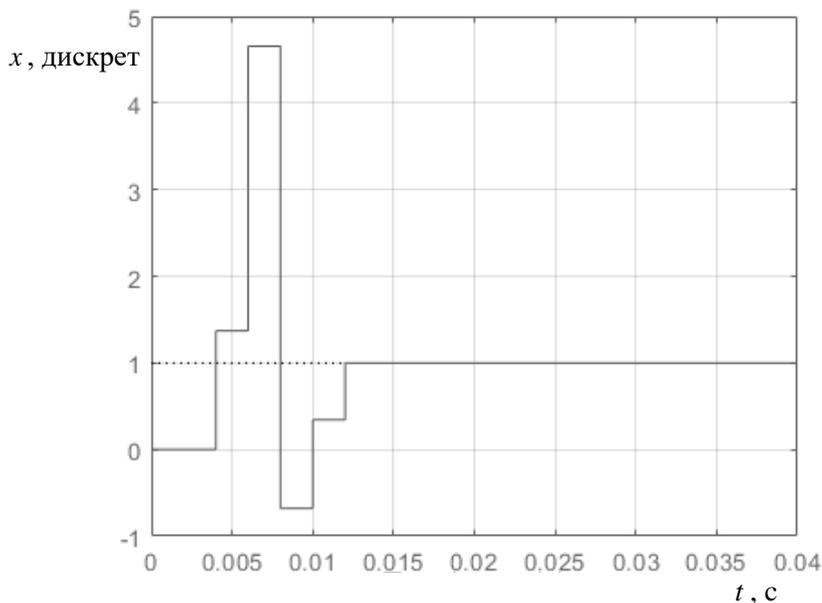


Рис. 2. Переходный процесс по управляющему воздействию в следящем электроприводе с финитным регулятором, построенный по передаточной функции (9)

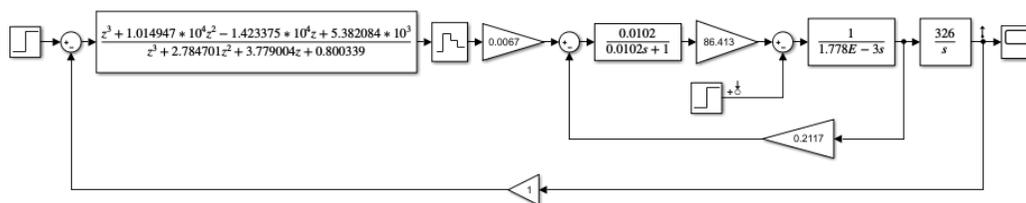


Рис. 3. Расчетная модель следящего электропривода в виде композиции дискретного финитного регулятора, экстраполятора нулевого порядка и синхронного двигателя с исполнительным механизмом, охваченных обратной связью по положению

В расчетной модели выделена цепь статора синхронного двигателя, которая представлена аperiodическим звеном с постоянной времени 0,0102 с, коэффициент передачи двигателя по моменту, равный 86,413 Нм/АГн, приведенный момент инерции ротора 0,001788 кгм² и коэффициент передачи исполнительного механизма 326 дискрет/рад. Такая расчетная модель позволяет также построить переходный процесс по отношению к возмущающему воздействию – моменту нагрузки двигателя (рис. 4). Анализ графика показывает, что переходный процесс по возмущению также заканчивается за 6 тактов периода дискретизации, при этом динамический провал составляет порядка 2,7 дискрет датчика положения. Отрицательным результатом следует считать появление статической ошиб-

ки позиционирования, равной 1,1 дискрет датчика при набросе момента нагрузки в 1 Нм (21 % от номинального значения).

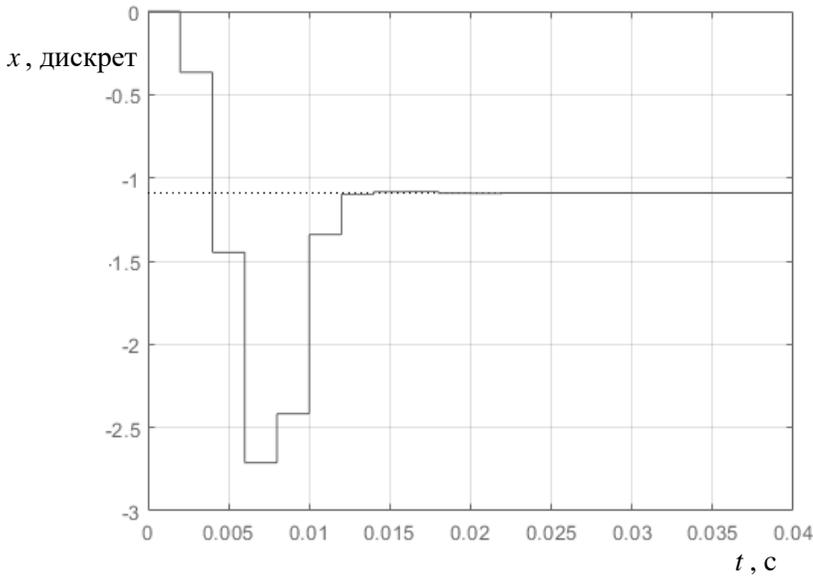


Рис. 4. Переходный процесс по возмущающему воздействию в следящем электроприводе с финитным регулятором

Техническую реализацию синтезированного финитного регулятора можно осуществить на программируемом микроконтроллере. При этом нужно определить алгоритм работы рассматриваемого регулятора. Для этого прежде всего из формулы (3) найдем уравнение, связывающее выходную переменную $N_{\text{фр}}(z)$ с рассогласованием $\varepsilon(z)$ на входе регулятора:

$$(z^3 + r_1 z^2 + r_2 z + r_3)N_{\text{фр}}(z) = (g_0 z^3 + g_1 z^2 + g_2 z + g_3)\varepsilon(z). \quad (10)$$

Разделив левую и правую часть уравнения (10) на z^3 , получим

$$\begin{aligned} N_{\text{фр}}(z) + r_1 z^{-1}N_{\text{фр}}(z) + r_2 z^{-2}N_{\text{фр}}(z) + r_3 z^{-3}N_{\text{фр}}(z) = \\ = g_0 \varepsilon(z) + g_1 z^{-1}\varepsilon(z) + g_2 z^{-2}\varepsilon(z) + g_3 z^{-3}\varepsilon(z). \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом того, что умножению на z^{-m} соответствует смещение решетчатой функции на m тактов периода дискретизации, из (11) следует алгоритм функционирования финитного регулятора, обеспечивающего отработку управляющих и возмущающих воздействий в следящем электроприводе за 6 тактов:

$$\begin{aligned} N_{\text{фр}}[n] + r_1 N_{\text{фр}}[n-1] + r_2 N_{\text{фр}}[n-2] + r_3 N_{\text{фр}}[n-3] = \\ = g_0 \varepsilon[n] + g_1 \varepsilon[n-1] + g_2 \varepsilon[n-2] + g_3 \varepsilon[n-3] \end{aligned} \quad (12)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ – текущий такт вычислений.

Выражение (12) позволяет сделать вывод, что выходной сигнал синтезированного финитного регулятора должен вычисляться по формуле

$$N_{\text{фп}}[n] = g_0 \varepsilon[n] + g_1 \varepsilon[n-1] + g_2 \varepsilon[n-2] + g_3 \varepsilon[n-3] - r_1 N_{\text{фп}}[n-1] - r_2 N_{\text{фп}}[n-2] - r_3 N_{\text{фп}}[n-3]. \quad (13)$$

Анализ (13) показывает, что для технической реализации финитного регулятора для следящего электропривода с синхронным двигателем необходимо хранить в памяти микроконтроллера значения рассогласования и выходного сигнала, взятые в моменты времени $[n-1]T$, $[n-2]T$ и $[n-3]T$.

Большой интерес представляет исследование влияния ограничений сигналов двигателя на работу следящего электропривода с финитным регулятором. Действительно, в силовом преобразователе имеется естественное ограничение максимальной величины напряжения. Кроме того, ни один электропривод не может функционировать без ограничения тока. Расчетная модель цифрового следящего электропривода с учетом дискретизации сигналов по уровню и ограничения напряжения силового преобразователя и упреждающего токоограничения представлена на рис. 5.

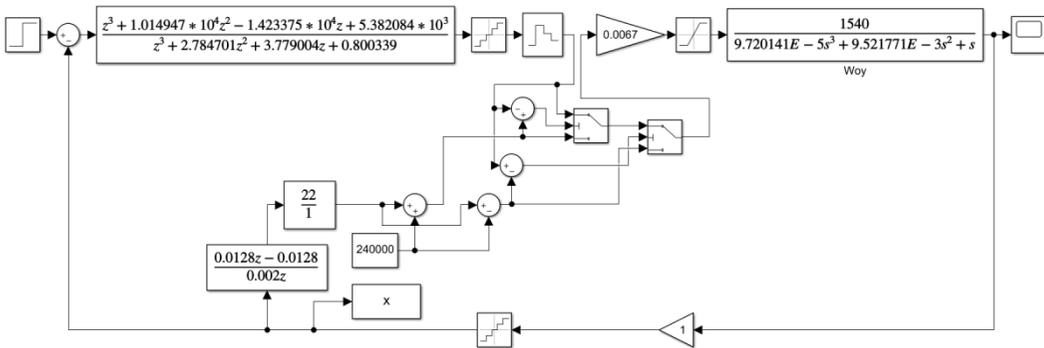


Рис. 5. Расчетная модель цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем с учетом ограничений тока и напряжения силового преобразователя при периоде дискретизации $T = 0,002$ с

С ее помощью построен график перемещения исполнительного механизма на 3 дискреты датчика положения (рис. 6).

Анализ графика показывает, что время входа в зону ± 1 дискрета от заданного значения составляет 0,0105 с. Однако результаты моделирования позволяют сделать вывод, что устойчивое движение наблюдается только при ограничении тока на уровне 16 номинальных значений и выше.

Анализ причин этих явлений показывает, что финитное управление требует больших коэффициентов передачи регулятора. И это совершенно логично, поскольку высокое быстродействие требует кратковременного применения больших энергетических затрат. Кроме того, потеря устойчивости электропривода при относительно малых значениях токов двигателя объясняется неустойчивостью собственно финитного регулятора. Действительно, анализ корней знаменателя дискретной передаточной функции (3) при $T = 0,002$ с показывает, что два корня имеют модуль больше 1. Устойчивым синтезированный финитный регулятор для рассматриваемого электропривода становится лишь при $T = 0,012$ с.

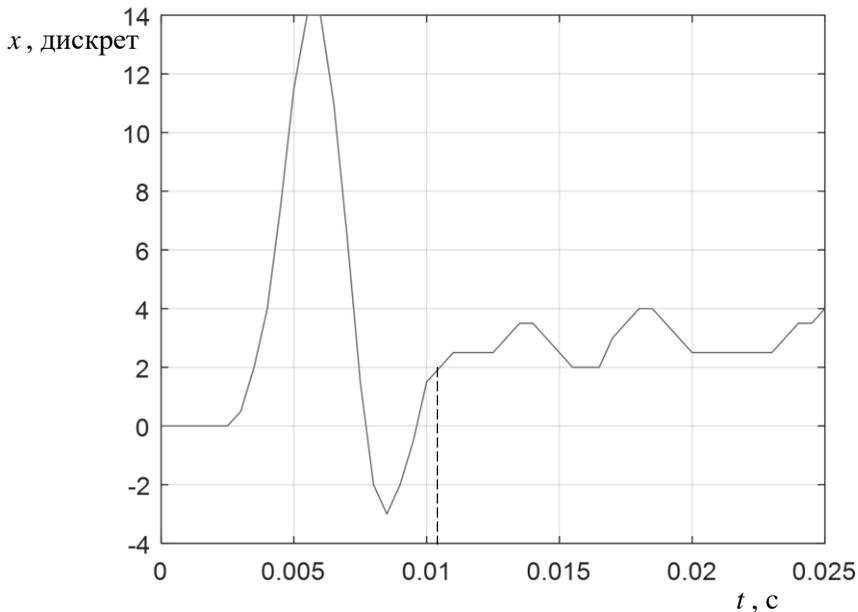


Рис. 6. График перемещения исполнительного механизма на 3 дискреты с учетом ограничений тока и напряжения силового преобразователя при $T = 0,002$ с

Следовательно, для решения возникшей проблемы можно предложить снижение быстродействия следящего электропривода до некоторого предела, когда при ограничении тока и напряжения на уровне номинальных значений будет наблюдаться устойчивое движение во всем диапазоне перемещений.

Поскольку при выбранном типе финитного регулятора переходные процессы в «малом» всегда заканчиваются за 6 тактов периода дискретизации, то для снижения быстродействия следящего электропривода увеличим период до величины $T = 0,01$ с. Тогда в соответствии с формулами (8) дискретная передаточная финитного регулятора примет следующие численные значения:

$$R_{fp}(z) = \frac{z^3 + 28,740136z^2 - 25,714578z + 12,0341}{z^3 + 1,759603z^2 + 1,543906z + 0,262633} \quad (14)$$

Расчетная модель следящего электропривода с регулятором (14) и ограничением тока синхронного двигателя на уровне 1,5 номинальных значений приведена на рис. 7.

Она позволяет построить графики переходных процессов при различных значениях и видах задающих воздействий. В частности, расчет показывает, что отработка управляющего воздействия в 3 дискреты датчика положения завершится за 0,022 с (рис. 8). Следовательно, и при периоде дискретизации $T = 0,01$ с наблюдается очень высокое быстродействие следящего электропривода. При этом значительно уменьшается перерегулирование выходной координаты, которое составляет 27 %. Однако отрицательным является тот факт, что при увеличении периода дискретизации значительно возрастает статическая ошибка слежения при действии моментов нагрузки двигателя. Этим ограничивается сфера применения рассматриваемого следящего электропривода с финитным регулято-

ром, например в станках по набивке печатных плат выводными элементами. Тем не менее если снабдить рассматриваемый следящий электропривод дополнительным контуром с интегральным регулятором, то проблема статической ошибки слежения исчезнет, позволяя расширить область применения привода в прецизионном оборудовании.

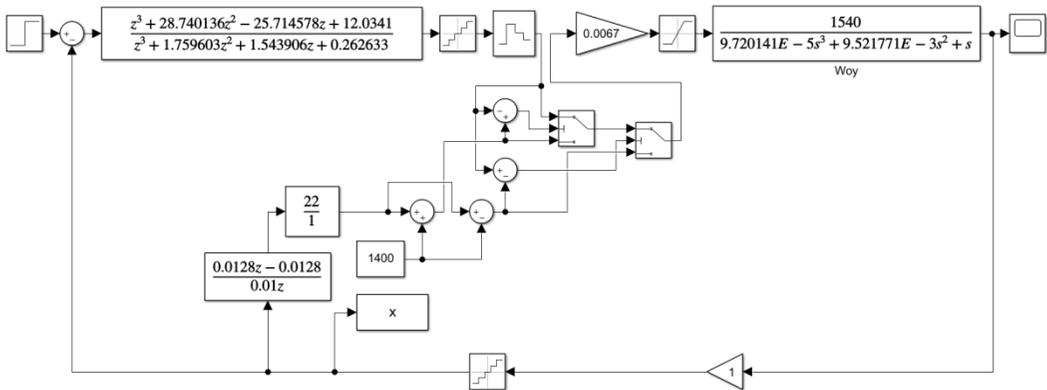


Рис. 7. Расчетная модель цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем с учетом ограничений тока и напряжения силового преобразователя при периоде дискретизации $T = 0,01$ с

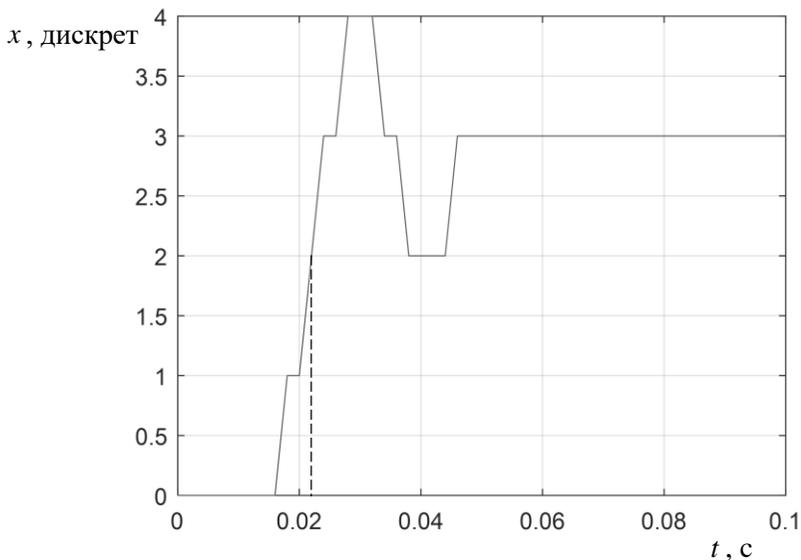


Рис. 8. График перемещения исполнительного механизма на 3 дискреты с учетом ограничений тока и напряжения силового преобразователя при $T = 0,01$ с

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение финитного управления в следящем электроприводе с синхронным исполнительным двигателем позволяет достичь высокого быстродействия.

2. Ограничением в применении финитного регулятора в следящих электроприводах является наличие статической ошибки и перерегулирование.

3. Для исключения статической ошибки позиционирования необходимо введение дополнительного контура с соответствующим регулятором, например интегральным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мустафа М.Н.* Исследование вентильных двигателей со статической коррекцией характеристик для электроприводов малой мощности: дис. ... канд. техн. наук / М.Н. Мустафа. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. – 201 с.
2. *Джанхотов В.В.* Исследование и разработка следящих электроприводов на базе вентильных двигателей с управлением от сигнального процессора для шагающего робота: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Джанхотов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 245 с.
3. *Самохвалов Д.В.* Коррекция статических характеристик электропривода с вентильным двигателем малой мощности и микропроцессорным устройством управления: дис. ... канд. техн. наук / Д.В. Самохвалов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 267 с.
4. *Галицков С.Я., Галицков К.С.* Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. – Самара: СГАСУ, 2004. – 140 с.
5. *Лисин С.Л.* Структурно-параметрический синтез быстродействующего следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем: дис. ... канд. техн. наук / С.Л. Лисин. – Самара: СамГТУ, 2016. – 179 с.
6. *Лисин С.Л.* Повышение быстродействия следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – С. 173–181.
7. *Стариков А.В.* Новые технические решения в современных следящих электроприводах: Учеб. пособие по дисциплине «Системы управления электроприводов» / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, В.А. Арефьев, Д.Н. Джабасов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2018. – 93 с.
8. Патент России № 2499351. Следящий электропривод / А.В. Стариков, С.Л. Лисин (Россия). – Опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32.
9. Патент России № 2605948. Следящий электропривод / А.В. Стариков, С.Л. Лисин (Россия) // Опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.
10. Патент России № 2695804. Следящий электропривод с синхронным исполнительным двигателем / С.Л. Лисин, А.В. Стариков (Россия) // Опубл. 29.07.2019, Бюл. № 22.
11. *Starikov A.V.* Increasing of the Response Speed of the Rotary Table Servo Drive / A.V. Starikov, S.L. Lisin, D.Yu. Rokalo // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE *Xplore*, 2019. Pp. 1–5.
12. *Starikov A.V.* Technical Implementation of the High-Speed Response Servo Drive at the Programmable Logic Device / A.V. Starikov, S.L. Lisin, D.Yu. Rokalo // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), IEEE *Xplore*, 2020. – P. 1–6.
13. *Цыпкин Я.З.* Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
14. *Лысов М.С.* Дискретная математическая модель цифровой системы управления поворотным столом // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. № 1 (23). С. 160–166.
15. *Лисин С.Л., Стариков А.В.* Дискретная математическая модель цифрового следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 1 (37). С. 203–208.

Статья поступила в редакцию 14 января 2021 г.

SYNTHESIS OF THE FINITE CONTROLLER FOR THE SERVO DRIVE WITH THE SYNCHRONOUS MOTOR

A.V. Starikov, V.A. Kirdyashev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper is devoted to the synthesis of a finite controller for a digital servo drive with a synchronous motor, as well as to the determination of the possibility and area of its application. A block diagram of the single-loop servo drive is considered, which contains a digital finite controller that ensures the completion of transient processes in a strictly defined number of clock cycles of the sampling period. The form of the discrete transfer function of the finite controller is proposed. The transfer function of the closed-loop electric drive with the proposed type of controller is found. The system of equations was compiled and solved, which makes it possible to determine the tuning parameters of the finite controller for the servo drive with the synchronous motor. The results of computer simulation are given, showing that the transient processes in the control and disturbing effects in the servo drive are completed in 6 clock cycles of the sampling period. A formula is obtained for calculating the output signal of a finite controller for digital technical implementation on a microcontroller. A computational model of the considered digital electric drive has been developed, taking into account the limitation of current and voltage in the power converter. At small sampling periods, a servo drive with the finite controller is shown to require current limitation at the level of 16 nominal values. At low limiting values, the drive becomes unstable. To ensure the operability of an electric drive with the finite controller, it is proposed to increase the sampling period. It is shown that, in this case the servo drive remains stable in the entire range of displacements even under current and voltage limitations at the level of nominal values. The simulation results made it possible to conclude that the developed electric drive has a high speed of response, since during the development of the control action, the entry into the zone of ± 1 discrete from the set value is 0.022 s. It is shown that the presence of a static positioning error, which increases with an increase in the sampling period, is a negative effect of the finite control application in the servo drive with the synchronous motor. The electric drive in question is proposed to be supplied with one more position loop with an integral controller, which allows to compensate for the static positioning error.*

Keywords: *servo drive, finite controller, discrete transfer function, synchronous motor.*

REFERENCES

1. *Mustafa M.N.* Research of self-controlled inverter-bed synchronous motors with static correction of characteristics for electric drives of low power: Dis. ... cand. tech. sciences / M.N. Mustafa. SPb.: SPbGETU "LETI", 2001. 201 p.
2. *Dzhankhotov V.V.* Research and development of servo electric drives based on self-controlled inverter-bed synchronous motors with control from a signal processor for a walking robot: Dis. ... cand. tech. sciences / V.V. Dzhankhotov. SPb.: SPbGETU "LETI", 2004. 245 p.
3. *Samokhvalov D.V.* Correction of static characteristics of an electric drive with a low-power brushless motor and a microprocessor control device: Dis. ... cand. tech. sciences / D.V. Samokhvalov. SPb.: SPbGETU "LETI", 2010. 267 p.
4. *Galitskov S.Ya., Galitskov K.S.* Multi-circuit control systems with one measured coordinate: Monograph. Samara: SGASU, 2004. 140 p.

Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head of the Department «Electric Drive and Industrial Automation».

Viktor A. Kirdyashev, Postgraduate Student.

5. *Lisin S.L.* Structural and parametric synthesis of a high-speed servo electric drive with a synchronous executive motor: Dis. ... cand. tech. sciences / S.L. Lisin. Samara: SamSTU, 2016. 179 p.
6. *Lisin S.L.* Increasing the speed of a servo drive with a synchronous executive motor // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Engineering Sciences". 2012. No. 4 (36). Pp. 173–181.
7. *Starikov A.V.* New technical solutions in modern servo drives: Textbook on the discipline "Control systems for electric drives" / A.V. Starikov, S.L. Lisin, V.A. Aref'yev, D.N. Dzhabasov. Samara: Samara State Technical University, 2018. 93 p.
8. Patent of Russia 2499351. Servo drive / A.V. Starikov, S.L. Lisin (Russia). Publ. 11.20.2013, Bul. 32.
9. Patent of Russia 2605948. Servo drive / A.V. Starikov, S.L. Lisin (Russia). Publ. 01.10.2017, Bul. 1.
10. Patent of Russia 2695804. Servo drive with the synchronous motor / S.L. Lisin, A.V. Starikov (Russia). Publ. 07.29.2019, Bul. 22.
11. *Starikov A.V.* Increasing of the Response Speed of the Rotary Table Servo Drive / A.V. Starikov, S.L. Lisin, D.Yu. Rokalo // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), IEEE Xplore, 2019. Pp. 1–5.
12. *Starikov A.V.* Technical Implementation of the High-Speed Response Servo Drive at the Programmable Logic Device / A.V. Starikov, S.L. Lisin, D.Yu. Rokalo // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), IEEE Xplore, 2020. Pp. 1–6.
13. *Tsytkin Ya.Z.* Fundamentals of the theory of automatic systems. Moscow: Nauka, 1977. 560 p.
14. *Lysov M.S.* Discrete mathematical model of a digital control system for a rotary table // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Engineering Sciences". 2009. No. 1 (23). Pp. 160–166.
15. *Lisin S.L., Starikov A.V.* Discrete mathematical model of a digital servo electric drive with a synchronous executive motor // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences". 2013. No. 1 (37). Pp. 203–208.