

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2310-7081 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993

г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021. Том 29. № 1

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. Ваакс (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. № 1)

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 16.03.21
Выход в свет 31.03.2021.

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. 18,04 п.л.
Уч.-изд. л. 17,54 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 14/21.
Заказ № 175

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 2310-7081 (Online)

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2021. Vol. 29. Issue 1

Founder – Samara State Technical University

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

Executive 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 . Z a g r e b i n a
Compiled and typeset by I . G . M i n a k o v a

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>Батаев В.В.</i> Разработка системно-методических основ для повышения эффективности внешнеэкономической деятельности промышленных предприятий.....	6
<i>Деревянов М.Ю., Плешивецца Ю.Э., Афиногентов А.А.</i> Многофакторный анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса.....	19
<i>Колодин А.А., Ёлишин В.В.</i> Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели.....	36
<i>Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Яковлева А.Е.</i> Виртуальные испытания агрегатов для виртуального ввода в производство роботизированного автомобиля.....	46
<i>Тычинин А.В., Тычинина Ю.А., Д.А. Рагазин Д.А.</i> Структурно-параметрический синтез системы управления ненаблюдаемым выходом объекта с распределенными параметрами.....	58
<i>Шевелев В.В.</i> Интегральная формулировка решений краевых задач тепломассопереноса в областях с движущимися границами.....	73

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

<i>Лихтциндер Б.Я., Бакай Ю.О.</i> Технологии передачи данных в беспроводных информационно-измерительных сетях.....	92
---	----

Электротехника

<i>Абакумов А.М., Кузнецов П.К., Курган В.П., Горячкин А.А.</i> Исследование системы стабилизации уровня жидкости в резервуарах.....	104
<i>Стариков А.В., Лисин С.Л., Беляева О.С., Кирдяшев В.А.</i> Способ уменьшения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя.....	120

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 51-74

РАЗРАБОТКА СИСТЕМНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В.В. Батаев

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

Аннотация. *Предлагается методика анализа системы взаимодействия промышленного предприятия с таможенными органами в процессе осуществления внешнеторговой деятельности, основанная на классификации и оценке функций элементов системы по совершению таможенных операций и проведению таможенного контроля. Внешнеэкономическая деятельность, являющаяся совокупностью функций организаций, ориентированных на внешний рынок с учетом выбранной внешнеэкономической стратегии, а также форм и методов работы на зарубежных рынках, рассмотрена в качестве одного из ключевых факторов эффективности функционирования промышленного предприятия. Анализ внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия с помощью разработанной методики позволит определить оптимальные и экономически эффективные варианты совершения таможенных операций, связанных с декларированием и выпуском товаров в соответствии с заявленной таможенной процедурой. Ориентированность на крупных участников внешнеэкономической деятельности, являющихся промышленными предприятиями, позволит использовать результаты исследования для снижения непроизводственных издержек, связанных с осуществлением этими предприятиями внешнеторговой деятельности. В качестве объекта системного анализа в настоящей статье выбрано предприятие металлургической отрасли промышленности, осуществляющее внешнеэкономическую деятельность во взаимодействии с таможенными органами Российской Федерации. При этом объект анализа рассмотрен как единая система, обладающая основными системными свойствами: целостностью и делимостью, наличием существенных устойчивых связей между элементами системы, организацией и иерархической структурой системы, интегративными качествами. Объектом исследования является сложно-структурированная система взаимодействий промышленных предприятий, являющихся участниками внешнеэкономической деятельности, и таможенных органов Российской Федерации. Проиллюстрированы схемы взаимодействий всех элементов четырехуровневой иерархической структуры анализируемой системы.*

Батаев Вячеслав Викторович, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Ключевые слова: внешнеэкономическая деятельность, системный анализ, промышленное предприятие, взаимодействие элементов системы, повышение эффективности ВЭД.

Введение

Анализ типовых вариантов совершения таможенных операций выявляет системные проблемы осуществления внешнеторговой деятельности промышленными предприятиями.

Обзор научных работ таких известных авторов, как П.Н. Афонин, В.В. Макрусов, А.Ф. Андреев, Д.Ю. Сулейманова, М.Ф. Гумеров, И.С. Алексеев, В.Г. Киселёв, Д.В. Сухоедов [1–11], показал, что практически все они посвящены системному анализу как таможенного дела в целом, так и деятельности таможенных органов, в частности. Обзор существующих методов и подходов [12–16] выявил отсутствие системного анализа в области внешнеэкономической деятельности, осуществляемой промышленными предприятиями, при отсутствии информации по отраслям промышленности.

Для качественного проведения анализа и эффективного управления внешне-торговой деятельностью практически на любом крупном промышленном предприятии существует иерархическая структура управления. В цепочках взаимодействий как с иностранными партнерами, так и с государственными контролирующими органами, включая таможенные органы, задействован персонал предприятия – от генерального директора до специалиста по таможенному оформлению. Однако наличие на предприятии даже единой сквозной вертикали управления, затрагивающей все иерархические ступени организации, не гарантирует высокую эффективность проведения внешнеторговых операций, если такое управление не построено на системной основе.

Ведение внешней торговли товарами, особенно при импорте, сопряжено с большим количеством административных барьеров, сдерживающих темпы товарооборота. Наличие многих из них продиктовано необходимостью осуществления отдельных видов государственного регулирования, к которым относятся: нетарифное, таможенно-тарифное и техническое регулирование, экспортный и валютный контроль, государственные меры санитарно-карантинного и радиационного контроля и некоторые другие. При этом государственное регулирование влечет за собой для участников ВЭД неудобства при совершении таможенных операций и незапланированные непроизводственные издержки.

В то же время анализ права Евразийского экономического союза (далее – Союз) и нормативных актов национального уровня свидетельствует о наличии возможностей снижения непроизводственных издержек, связанных с необходимостью соблюдения установленных запретов и ограничений, при системном подходе к осуществлению внешнеэкономической деятельности. При этом основной акцент целесообразно делать именно на оптимизации соблюдения запретов и ограничений, к которым относятся меры экспортного контроля, нетарифного и технического регулирования. Объясняется это тем, что на меры таможенно-тарифного регулирования, являющегося одним из методов государственного регулирования внешней торговли и осуществляемого посредством применения вывозных и ввозных таможенных пошлин, на уровне отдельно взятого участника ВЭД повлиять практически невозможно. В то же время взвешенный и рациональный подход к соблюдению установленных запретов и ограничений может существенно сократить расходы на оформление и получение разрешительных документов, выдаваемых как уполномоченными федеральными органами исполнительной власти, так

и аккредитованными организациями, и лабораториями, осуществляющими свою деятельность на возмездной основе.

В качестве объекта системного анализа в настоящей статье выбрано предприятие металлургической отрасли промышленности, осуществляющее внешнеэкономическую деятельность во взаимодействии с таможенными органами Российской Федерации.

1. Внешнеэкономическая деятельность как ключевой фактор эффективности функционирования промышленного предприятия

Объектом исследования в данной статье является сложно-структурированная система взаимодействий промышленных предприятий, являющихся участниками внешнеэкономической деятельности (ВЭД), и таможенных органов Российской Федерации.

Целью исследования является разработка системно-методических основ для решения актуальных проблем повышения эффективности предприятий металлургической и машиностроительной отраслей промышленности за счет использования инструментов таможенной политики как управляющих факторов.

Основной задачей исследования является разработка методик и алгоритмов системного анализа внешнеторговой деятельности промышленного предприятия с учетом управления инструментами таможенной политики, что должно обеспечить максимальную эффективность производственной деятельности предприятия в целом.

Анализ внешнеторговой деятельности некоторых крупнейших промышленных предприятий, связанной с перемещением через таможенную границу Евразийского экономического союза товаров (оборудования, сырья, материалов, комплектующих, агрегатов, запасных частей, а также готовой продукции собственного производства) и последующим ее таможенным декларированием, показывает, что ВЭД составляет значительную часть оборота этих предприятий. Соответственно, экономическая эффективность осуществляемой внешнеторговой деятельности существенно влияет на общую экономическую эффективность всего промышленного предприятия в целом.

В соответствии с таможенным кодексом Союза все совершаемые таможенные операции можно сгруппировать в пять основных блоков: прибытие на таможенную территорию Союза, убытие с таможенной территории Союза, декларирование товаров в соответствии с выбранной таможенной процедурой, выпуск товаров (помещение под заявленную таможенную процедуру), а также временное хранение иностранных товаров до их выпуска.

Все вышеперечисленные таможенные операции осуществляются в тесном взаимодействии с таможенными органами либо при ввозе товаров (с момента пересечения товарами таможенной границы Союза), либо при вывозе товаров (с момента подачи таможенной декларации или совершения иных действий, направленных на вывоз товаров с таможенной территории Союза).

Однако для самого предприятия – участника ВЭД внешнеторговая сделка начинается с момента выражения намерения о ее совершении. Уже на этом предварительном этапе еще до подписания внешнеторгового контракта с иностранным партнером глубокий анализ всех предстоящих этапов реализации сделки позволит не только минимизировать неизбежные при осуществлении ВЭД расходы, но и избежать непредвиденных непроизводственных издержек.

2. Анализ взаимодействий элементов системы

Объект анализа рассмотрен как единая система, так как он обладает основными системными свойствами: целостностью и делимостью, наличием существенных устойчивых связей между элементами системы, организацией и иерархической структурой системы, интегративными качествами.

Рассмотренная система состоит из двух подсистем: системы промышленного предприятия и системы таможенных органов.

Структура типового промышленного предприятия может быть представлена в виде элементов, расположенных на четырех иерархических уровнях (рис. 1).



Рис. 1. Иерархическая структура промышленного предприятия

Система таможенных органов Российской Федерации во главе с Центральным аппаратом Федеральной таможенной службы (ФТС), представленная на рис. 2, также представляет собой четырехуровневую иерархическую структуру, внутри которой существует устойчивая упорядоченность ее элементов и связей.

Система взаимодействия промышленного предприятия и таможенных органов при осуществлении ВЭД также имеет четырехуровневую иерархическую структуру, схематично представленную на рис. 3. В качестве примера промышленного предприятия выбрано акционерное общество «Арконик СМЗ», осуществляющее внешнеэкономическую деятельность во взаимодействии с таможенными органами Российской Федерации.

Благодаря качествам, присущим анализируемой системе в целом, но не свойственным ее элементам в отдельности, данная система обладает интегративными качествами. Прежде всего к таким качествам относится возможность осуществления внешнеэкономической деятельности, которую ни один из элементов системы самостоятельно и независимо от других элементов осуществлять не в состоянии. В то же время каждый из элементов анализируемой системы, осуществляя свои функции и взаимодействуя друг с другом в рамках полномочий, вносит значительный вклад в осуществление внешнеэкономической деятельности всего предприятия.

Руководитель предприятия, являясь высшим звеном иерархической системы, осуществляет общее руководство всеми направлениями деятельности, включая

внешнеэкономическую. При этом он не декларирует товары таможенному органу, что является необходимым условием помещения под таможенную процедуру.

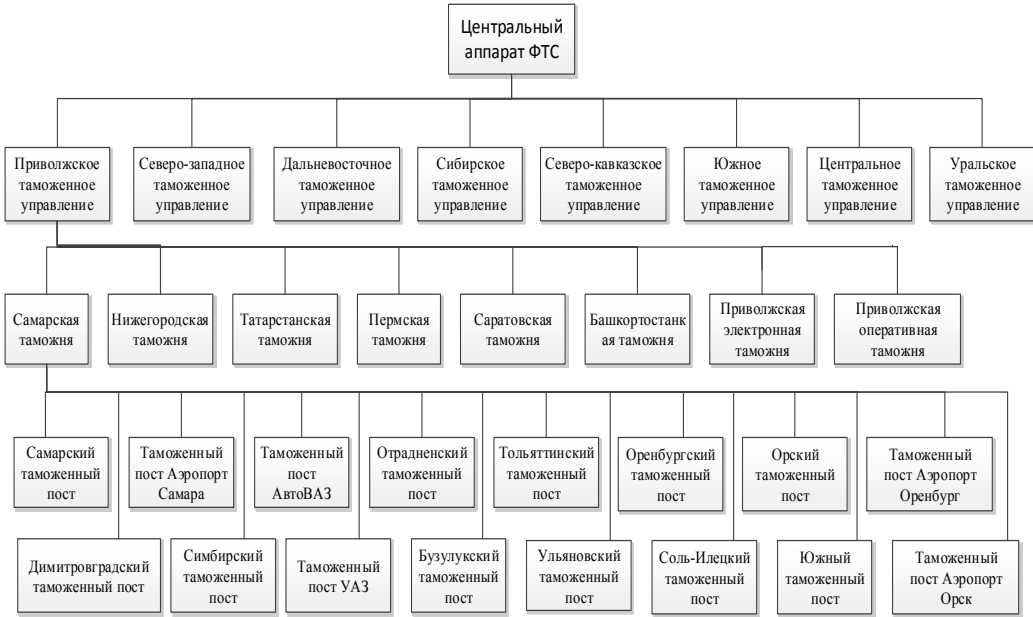


Рис. 2. Структура таможенных органов Российской Федерации

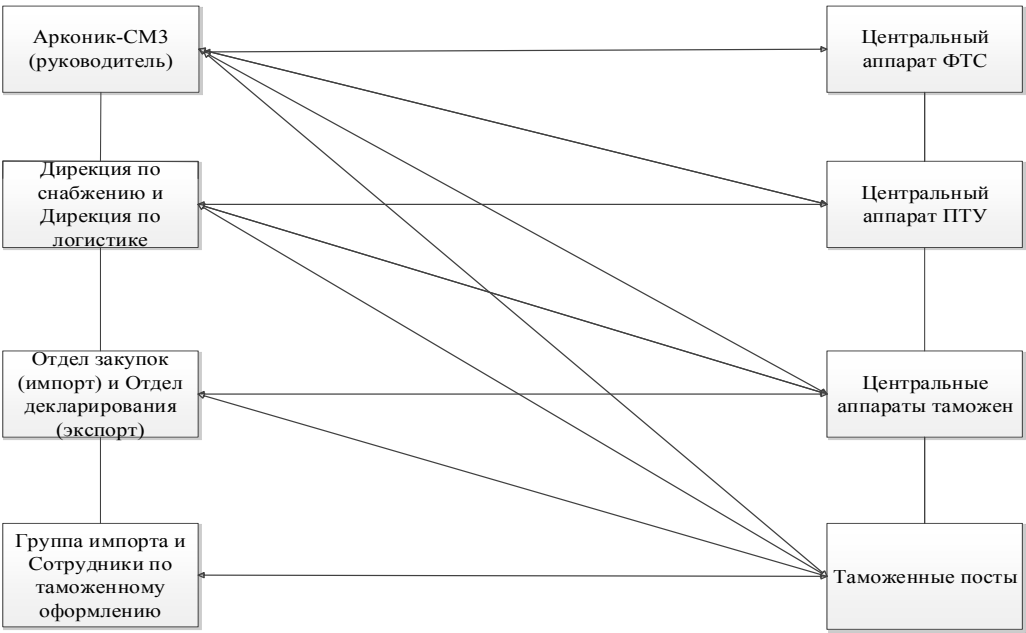


Рис. 3. Схема взаимодействия промышленного предприятия и таможенных органов

В свою очередь, должностные лица группы импорта и отдела декларирования совершают таможенные операции, связанные непосредственно с декларированием ввозимых и вывозимых товаров, но основную часть документов для этого готовят иные сотрудники дирекций по снабжению и по логистике. Денежные средства для оплаты таможенных пошлин, налогов и иных таможенных платежей, в том числе вносимых в качестве обеспечения, выделяет дирекция по снабжению. Получение необходимых лицензий, выдаваемых Федеральной службой по техническому и экспортному контролю и необходимых для осуществления экспорта продукции двойного назначения собственного производства, является зоной ответственности дирекции по логистике.

Акт внутренней программы экспортного контроля подготавливается ведущими инженерами и технологами предприятия, а подписывается генеральным директором или уполномоченным им лицом. В производственных цехах запрашивается техническая документация на товары, технологии, оборудование и его части, являющиеся объектами внешнеэкономических сделок, в целях правильной классификации в соответствии с товарной номенклатурой внешнеэкономической деятельности Евразийского экономического союза (ТН ВЭД ЕАЭС), снижения административных барьеров, связанных с соблюдением запретов и ограничений, корректного заполнения декларации на товары.

Таким образом, осуществление внешнеэкономической деятельности – это исключительно прерогатива лишь предприятия в целом, а никак не отдельных его элементов.

В рассматриваемой системе структура является наиболее консервативной характеристикой, поскольку даже при изменении состояния системы ее структура сохраняется неизменной на протяжении весьма длительного времени. Подтверждением тому служат проведенные в 2018–2020 гг. в целях реализации основных стратегических документов ФТС России и в соответствии со Стратегией развития таможенной службы организационно-структурные преобразования, направленные на оптимизацию штатной численности таможенных органов. Созданные в рамках этих преобразований новые таможенные органы (электронные таможни и подчиненные им центры электронного декларирования) являются элементами соответственно третьего и четвертого иерархических уровней подсистемы таможенных органов.

Схема взаимодействий элементов всех уровней подсистем промышленного предприятия и таможенных органов с учетом вновь образованных элементов приведена на рис. 4. Как видно из схемы, на третьем и четвертом иерархических уровнях произошли изменения, принципиально повлиявшие на взаимодействия между элементами системы. Образование в таможенной среде такого нового института, как электронные таможни и центры электронного декларирования, вынудило остальные таможни и таможенные посты реформатировать свою деятельность и реформироваться в таможни и таможенные посты фактического контроля. При этом и таможни, и таможенные посты фактического контроля сохранили свои места на третьем и четвертом иерархических уровнях подсистемы таможенных органов соответственно.

Создание Приволжской электронной таможни (ПЭТ) обеспечило концентрацию таможенного декларирования в электронной форме товаров в центре электронного декларирования, подчиненного ПЭТ и являющегося единственным та-

моженным постом в ее структуре. В свою очередь, остальные таможи и таможенные посты региона после преобразования обрели статус таможен и таможенных постов фактического контроля.

Реализация технологии удаленного выпуска позволяет доставлять прибывающие транспортные средства в зоны таможенного контроля по месту нахождения декларантов, а поступающие грузы декларировать в центр электронного декларирования. Соответственно, взаимодействие заинтересованных подразделений промышленного предприятия осуществляется в двух направлениях: таможенное декларирование и фактический контроль.

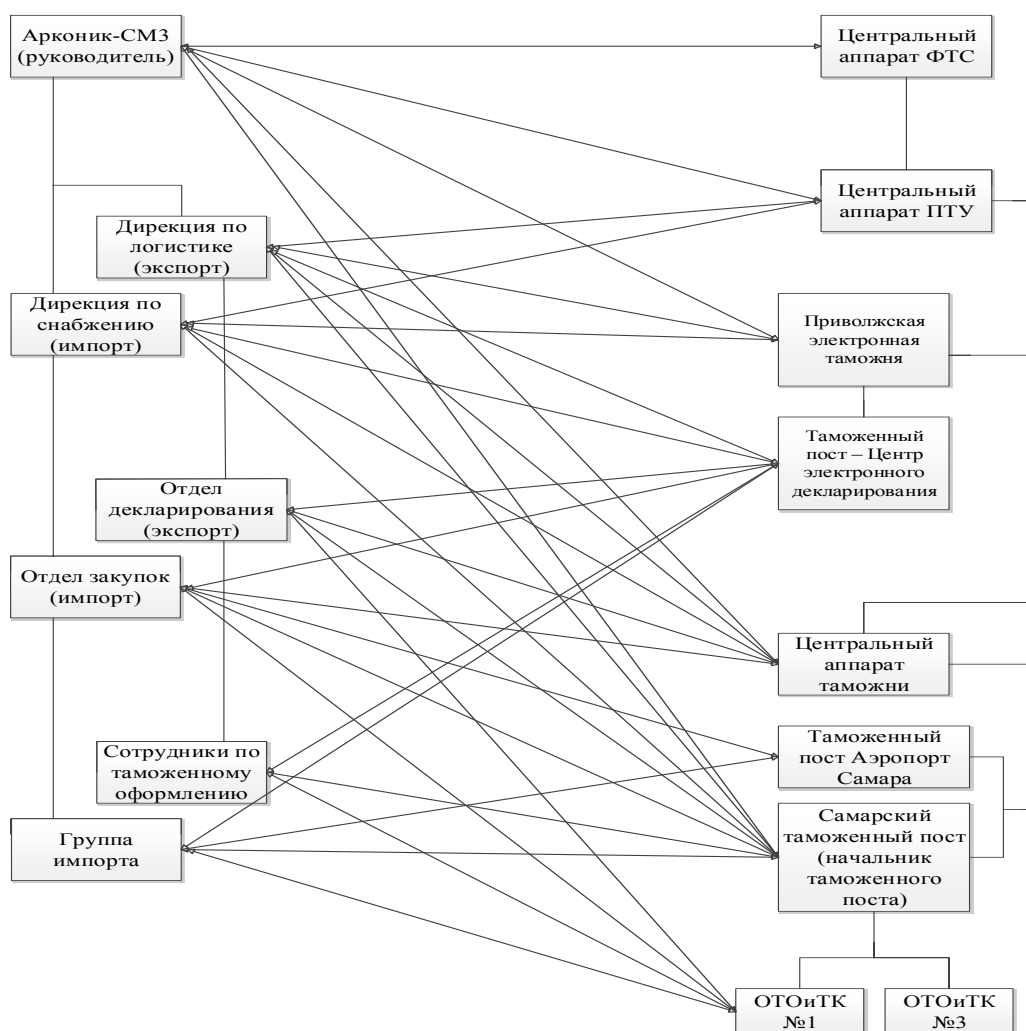


Рис. 4. Схема взаимодействий элементов анализируемой системы

3. Разработка методики системного анализа ВЭД промышленного предприятия

Для характеристики и анализа связей между элементами системы были перечислены и подробно проанализированы все функции, выполняемые элементами подсистемы, указаны направления связей, проведена классификация связей по физическому наполнению и роли в осуществлении ВЭД, проставлены оценки, характеризующие длительность и стоимость совершения операций, обязательность осуществления операций.

Для выработки практических рекомендаций по использованию результатов системного анализа внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия предлагается методика, применение которой позволит существенно снизить непроизводственные издержки, связанные с соблюдением запретов и ограничений, и повысить экономическую эффективность ВЭД предприятия.

Представленная на рис. 5 методика системного анализа ВЭД промышленного предприятия заключается в реализации нижеперечисленных этапов.

1. Анализ структуры таможенных органов и промышленных предприятий.

Данный анализ представляет собой сбор исходных данных для исследования свойств анализируемой системы. На данном этапе выявляются системные свойства с целью рассмотрения объекта анализа как единой системы.

2. Системный анализ функций элементов системы.

Включает в себя исследование функций каждого из взаимодействующих элементов системы в процессе осуществления внешнеэкономической деятельности и проведения таможенного контроля. Отдельно анализируются функции элементов всех иерархических уровней промышленного предприятия и таможенных органов. Выявляются дублирующие и излишние неэффективные функции.

3. Классификация взаимодействий элементов анализируемой системы.

Даются характеристики всем существующим между элементами подсистем связям.

По физическому наполнению связи подразделяются на вещественные (материальные), информационные и смешанные.

По направлению связи различаются на однонаправленные и двунаправленные (контрсвязи).

Под мощностью связи в рассматриваемой системе понимается сила ее влияния на процесс ВЭД предприятия. Рассматриваемая система существует как целостное образование только тогда, когда мощность существующих связей между элементами рассматриваемой системы на интервале времени, равном времени осуществления предприятием процесса внешнеэкономической деятельности, больше, чем мощность связей этих же элементов с окружающей средой.

Роль связи в рассматриваемой системе определяется характером ее влияния на эффективность процесса внешнеэкономической деятельности предприятия. С этой точки зрения выделяются следующие связи: соединительные (обязательные), необязательные, ограничивающие, усиливающие (ослабляющие), ускоряющие (тормозящие), преобразующие, согласующие, координирующие, разрешительные (запрещающие).

4. Построение математической модели многофакторной оценки эффективности функционирования предприятия в процессе реализации ВЭД.

Разрабатывается и апробируется математическая модель, используемая в дальнейшем для исследования эффективности ВЭД предприятия. Для оценки

эффективности осуществления ВЭД промышленным предприятием применяются базовая CCR-модель и модель Super-efficiency метода DEA, являющегося математическим методом, позволяющим производить оценку и сравнение деятельности или эффективности различных объектов между собой по разнородным показателям.

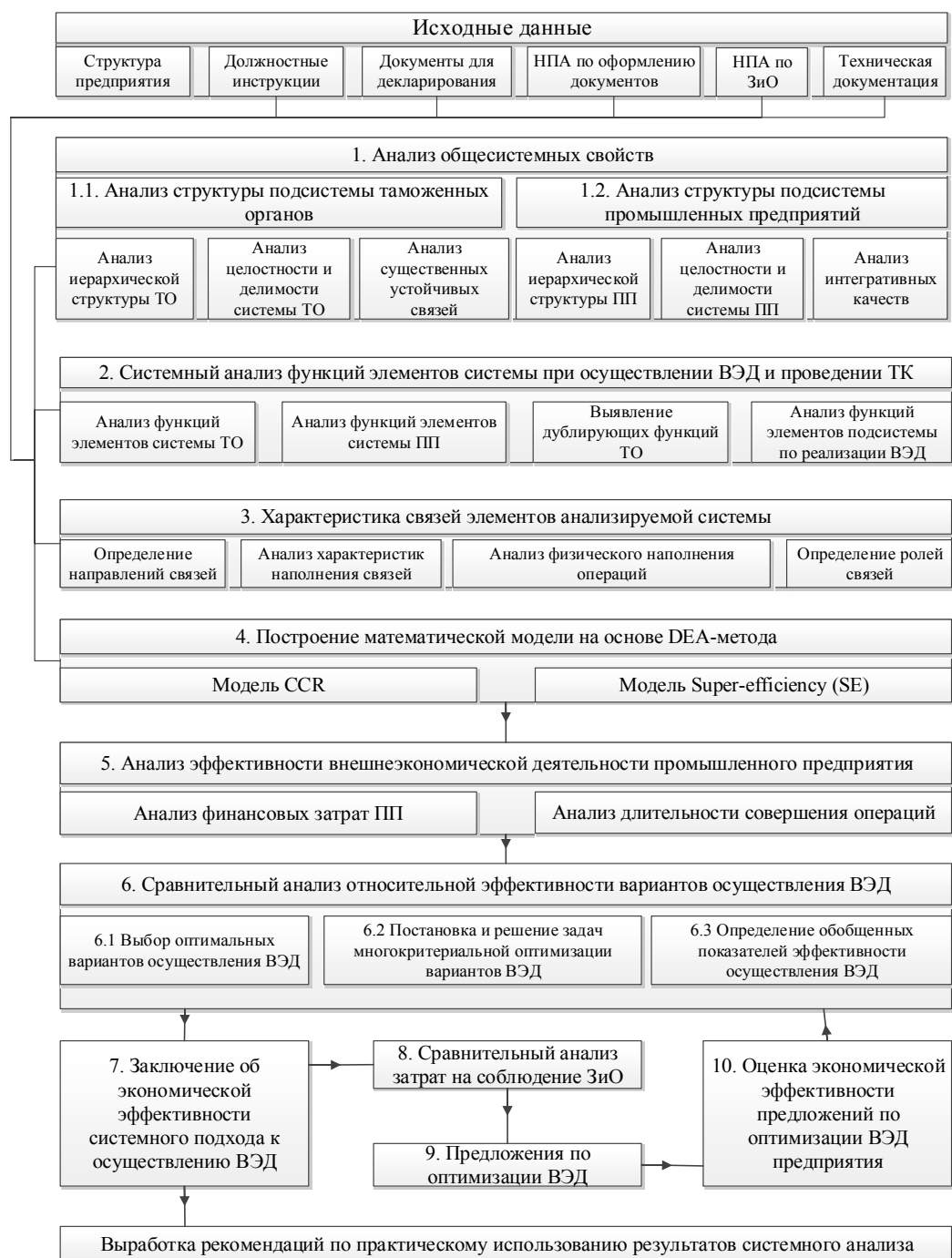


Рис. 5. Методика системного анализа внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия как структурированного объекта управления и оптимизации

5. Анализ эффективности ВЭД промышленного предприятия.

Анализ осуществляется по ряду показателей, характеризующих эффективность ВЭД предприятия. Оцениваются сроки совершения таможенных операций, рассчитываются трудозатраты предприятия, исследуются финансовые издержки, связанные с получением разрешительных документов и простоем транспортных средств.

6. Сравнительный анализ относительной эффективности вариантов осуществления операций ВЭД.

Формулируются ЗМП, решение которых позволяет определить относительные значения оценок эффективности таможенных операций на основе базовой ССР-модели и модели Super-efficiency DEA-метода. Анализ полученных данных выявляет наиболее эффективные варианты совершения таможенных операций в анализируемой группе.

7. Формирование заключения об экономической эффективности системного подхода к осуществлению ВЭД.

В случае соответствия вариантов таможенных операций предъявляемым внешнеторговым контрактом требованиям, касающимся сроков выпуска декларируемых товаров и понесенных финансовых затрат на получение дополнительных разрешительных документов, вырабатываются рекомендации по практическому использованию результатов системного анализа. При этом поставленная задача может считаться решенной.

В случае несоответствия таможенных операций требованиям внешнеторгового контракта осуществляется переход к последующим этапам.

8. Анализ финансовых затрат, связанных с соблюдением запретов и ограничений.

По результатам выявленных на предыдущем этапе несоответствий осуществляется детальный анализ финансовых издержек, связанных с получением разрешительных документов и простоем транспортных средств в период времени, необходимого для оформления разрешительных документов.

9. Разработка предложений по оптимизации ВЭД промышленного предприятия.

По результатам проведенного анализа разрабатываются и внедряются мероприятия, позволяющие исключить неэффективные варианты совершения таможенных операций, сопровождающиеся непроизводительными финансовыми издержками. Разрабатываются предложения по минимизации расходов на получение разрешительной документации и недопущению простоев транспортных средств, предназначенных для перевозки экспортируемой продукции.

10. Оценка абсолютных показателей качества взаимодействия элементов системы при совершении таможенных операций после их оптимизации.

Реализация всех перечисленных этапов позволяет осуществить выбор и обоснование оптимальных вариантов совершения таможенных операций. Построение методики системного анализа внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия требует формулирования следующих новых методологических принципов, на которых эта методика должна основываться:

- системный подход к осуществлению внешнеторговой деятельности предприятия;

- многоаспектность применяемой методики, позволяющая учитывать разнородные факторы (экономические, временные);
- масштабируемость методики, то есть способность учета возрастающего числа критериев по мере ужесточения предъявляемых требований без снижения точности и надежности оценки.

Заключение

Разработанная методика может быть применена для анализа ВЭД промышленного предприятия и определения оптимальных и экономически эффективных вариантов совершения таможенных операций, связанных с декларированием и выпуском товаров в соответствии с заявленной таможенной процедурой.

Ориентированность на крупных участников ВЭД, являющихся промышленными предприятиями, позволит использовать результаты исследования для снижения непроизводственных издержек, связанных с осуществлением этими предприятиями внешнеэкономической деятельности.

Полученные в работе теоретические положения и практические результаты позволят предприятиям в различных отраслях промышленности оптимизировать операции экспорта и импорта продукции в процессе осуществления внешнеэкономической деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Афонин П.Н.* Системный анализ и управление в таможенном деле. – СПб.: Интермедиа, 2015. – 370 с.
2. *Афонин П.Н., Афонин Д.Н., Мютте Г.Е., Кондрашова В.А.* Системный анализ рисков в пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации при реализации таможенных услуг // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2012. – № 18.
3. *Афонин П.Н.* Системный анализ и управление в таможенном деле: Учеб. пособие. – СПб.: Интермедиа, 2017. – 372 с.
4. *Макрусов В.В.* Основы системного анализа таможенного дела: направления, проблемы, методология: монография. – М.: Российская таможенная академия, 2001. – 299 с.
5. *Макрусов В.В., Андреев А.Ф.* Основы системного анализа в таможенном деле. – М.: Российская таможенная академия, 2009. – 331 с.
6. *Макрусов В.В.* Системный анализ в таможенном деле: Учеб. пособие. – М.–Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 471 с.
7. *Макрусов В.В.* Системный анализ и управление в таможенном деле. – М.: Флинта, 2021. – 512 с.
8. *Сулейманова Д.Ю., Гумеров М.Ф.* О вопросах применения системного анализа и моделирования в решении проблем таможенного дела // Научное обозрение. – М.: Наука образования, 2014. – С. 933–935.
9. *Макрусов В.В.* Теоретические положения и задачи системного анализа в таможенном деле // Заметки ученого. – Ростов-на-Дону: Южный университет, 2015. – С. 88–93.
10. *Алексеев И.С.* Управление внешнеэкономической деятельностью. – М.: Дашков и К°, 2002.
11. *Киселев В.Г., Сухоедов Д.В.* Основы системного анализа и управления в таможенном деле: Учеб.-метод. пособие. – Н. Новгород, 2013.
12. *Баландина Г.В., Пономарев Ю.Ю., Синельников-Мурылев С.Г.* Таможенное администрирование в России. Какими должны быть современные процедуры. – М.: Дело, 2019.
13. *Андреев А.Ф.* Развитие теории управления. – М.: РТА, 2013. – 120 с.
14. *Андреев А.Ф.* Основы теории управления. – СПб.: Интермедиа, 2012. – 288 с.
15. *Беннет Р.М.* Секреты эффективного управления. – М.: Лори, 2007. – 216 с.
16. *Блинов Н.М., Иванов В.Н., Кухаренко В.Б., Пашинский А.Г.* Проектирование таможенной политики. – М.: Книга и бизнес, 2001. – 327 с.

Статья поступила в редакцию 14 января 2021 г.

DEVELOPMENT OF SYSTEM-METHODOLOGICAL BASES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF FOREIGN ECONOMIC ACTIVITIES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

V.V. Bataev

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

Abstract. *The paper proposes a methodology for analyzing the system of interaction between an industrial enterprise and customs authorities in the process of carrying out foreign trade activities based on the classification and assessment of the system elements functions for performing customs operations and customs control. Foreign economic activity, which is a set of functions of organizations focused on the foreign market in terms of the chosen foreign economic strategy, as well as the forms and methods of work in foreign markets is considered as one of the key factors in the efficiency of an industrial enterprise. Analysis of the foreign economic activity of an industrial enterprise using the developed methodology will make it possible to determine the optimal and cost-effective options for performing customs operations related to the declaration and release of goods in accordance with the declared customs procedure. The focus on large participants of foreign economic activity, which are industrial enterprises, will allow using the results of the study to reduce non-production costs associated with the implementation of foreign trade activities by these enterprises. We have chosen an enterprise of the metallurgical industry that carries out foreign economic activity in cooperation with the customs authorities of the Russian Federation as the object of the system analysis in this research. At the same time the object of analysis is considered as a unified system that has the main system properties: integrity and divisibility, the presence of significant stable links between the elements of the system, the organization and the hierarchical structure of the system, integrative qualities. The object of the research is a complex-structured system of interactions between industrial enterprises that are participants of foreign economic activity and the customs authorities of the Russian Federation. The schemes of interactions of all elements of the four-level hierarchical structure of the analyzed system are illustrated.*

Keywords: *foreign economic activity, system analysis, industrial enterprise, interaction of system elements, increasing the efficiency of foreign economic activity.*

REFERENCES

1. *Afonin P.N.* System analysis and management in customs. St.-Petersburg: Intermedia, 2015. 370 p.
2. *Afonin P.N., Afonin D.N., Mutte G.E., Kondrashova V.A.* System analysis of risks at checkpoints across the state border of the Russian Federation in the implementation of customs services. National Interests: Priorities and Security. 2012. № 18.
3. *Afonin P.N.* System analysis and management in customs: A textbook for university students studying in the specialty Customs. St.-Petersburg: Intermedia, 2017. 372 p.
4. *Makrusev V.V.* Fundamentals of system analysis of customs business: directions, problems, methodology: monograph. M.: Russian Customs Academy, 2001. 299 p.
5. *Makrusev V.V., Andreev A.F.* Fundamentals of system analysis in customs. Moscow: Russian Customs Academy, 2009. 331 p.
6. *Makrusev V.V.* System analysis in customs: a textbook. M.–Berlin: DirectMedia, 2015. 471 p.
7. *Makrusev V.V.* System analysis and management in customs. Publishing house Flint, 2021. 512 p.
8. *Suleymanova D.Y., Gumerov M.F.* On the issues of applying system analysis and modeling in solving problems of customs affairs: a scientific paper. M.: Publishing House "Science of Education". Scientific Review (journal). 2014. Pp. 933–935.

9. *Makrusev V.V.* Theoretical provisions and problems of system analysis in customs: a scientific paper. Rostov-on-Don: Southern Federal University, Rostov-on-Don, Notes of a scientist (journal), 2015. Pp. 88–93.
10. *Alekseev I.S.* Management of foreign economic activity. M.: Dashkov&K, 2002. 303 p.
11. *Kiselev V.G., Sukhoedov D.V.* Fundamentals of system analysis and management in customs (Training manual); N. Novgorod, 2013.
12. *Balandina G.V., Ponomarev Y.Y., Sinelnikov-Murylev S.G.* Customs administration in Russia. What should modern procedures be, RANEPa, DELO Publishing House, Moscow, 2019. 100 p.
13. *Andreev A.F.* Development of the theory of management. Moscow: RIO RTA, 2013. 120 p.
14. *Andreev A.F.* Fundamentals of the theory of management. St. Petersburg: IC Intermedia, 2012. 288 p.
15. *Bennet R.M.* Secrets of effective management. Moscow: Lori, 2007. 216 p.
16. *Blinov N.M., Ivanov V.N., Kukharensky V.B., Pashinsky A.G.* Designing customs policy. Moscow: Books and business, 2001. 327 p.

УДК 665.6/.7:502.171

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА*

М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивецца, А.А. Афиногентов

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

E-mail: mder2007@mail.ru

Аннотация. *Предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). DEA-метод распространяется авторами на совершенно новую предметную область чрезвычайно актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти и нефтесодержащих отходов.*

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки ТО является новая методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих задач математического программирования.

Разработанный алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки позволяет: осуществить сбор, классификацию и обработку информации об объектах системы; оценить и проанализировать ресурсную ценность отходов в хранилищах, которая определяет степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов в технологиях переработки, связанных с их рециклингом, рекуперацией и регенерацией; оценить и проанализировать ресурсный потенциал хранилищ и технологий, определяющий эффективность вторичного использования техногенных отходов с учетом их ресурсной ценности; оценить и проанализировать ресурсо- и энергосбережение в системе.

Полученные в результате решения взаимосвязанных задач математического программирования частные и обобщенные показатели эффективности функционирования системы переработки отходов анализируются в системе поддержки принятия решений и позволяют сформировать локальные управляющие воздействия на систему или обосновать стратегии управления системой переработки отходов.

Предложенный подход может в дальнейшем получить множественные применения в нефтеносных регионах РФ, где рост образования техногенных отходов имеет серьезные и часто необратимые экологические последствия.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00353.

Деревянов Максим Юрьевич (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Плешивецца Юлия Эдгаровна (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Афиногентов Александр Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Трубопроводный транспорт».

Ключевые слова: техногенные отходы, *Data Envelopment Analysis*, ресурсосбережение, энергосбережение, ресурсная ценность, ресурсный потенциал, многофакторный анализ, нефтегазовый комплекс.

Введение

Нефтегазовый комплекс (НГК) занимает ключевую позицию по степени влияния на экономику Российской Федерации. Потери нефти и нефтепродуктов, образующиеся в процессе добычи, транспортировки и переработки углеводородов, по разным оценкам ежегодно достигают от 7 до 10 млн т [1, 2]. При этом в РФ собираются и перерабатываются менее 10 % техногенных отходов (ТО), тогда как в развитых странах Европы доля перерабатываемых ТО составляет около 90 %. В большинстве нефтеносных регионов России (Западная Сибирь, Башкортостан, Татарстан, Самарская и Оренбургская области) главными способами утилизации ТО, к которым относятся нефтесодержащие отходы, буровые шламы, нефтесодержащие воды и почвы и т. п., являются их захоронение или сжигание, а не переработка с целью извлечения полезных продуктов рециклинга для последующего вторичного использования. Поскольку количество ТО удваивается каждые 5–7 лет, стремительно возрастают экологические проблемы, которые принимают критические масштабы и требуют срочного решения [3]. Неэффективное использование полезных ресурсов, содержащихся в ТО, объясняется отсутствием комплексного подхода к организации системы переработки ТО в стране и низкой эффективностью технологических процессов переработки по сравнению с аналогичными технологиями, используемыми в зарубежных странах.

Необходимость анализа эффективности систем переработки ТО обусловлена переходом от концепции управления отходами к концепции управления ресурсами в рамках «экономики замкнутого цикла» [4, 5]. Эффективность обращения с ТО в рамках такой концепции определяется максимальным ресурсосбережением и высокой энергоэффективностью систем переработки ТО на предприятиях НГК. Конечной целью использования ТО в рамках указанной концепции является получение энергии, а одной из основных проблем – научно обоснованное принятие решений по использованию конкретных технологий переработки ТО с учетом заданных критериев эффективности.

Проблема анализа сложно-структурированных систем переработки ТО заключается в необходимости учета множества разнородных факторов, влияющих на конечную оценку эффективности. В качестве таких факторов могут выступать конструктивные характеристики объектов хранения ТО, физические и химические параметры, характеризующие компонентный состав отходов, а также характеристики режимов функционирования технологических процессов переработки, логистические и др. факторы. Указанная проблема решается с помощью методов многофакторного анализа, позволяющих проводить сравнительную оценку технологий с учетом указанных факторов, влияющих на оценку эффективности.

Проблемы принятия решений в области использования отходов как энергетических ресурсов рассматриваются в [6], где приведен обзор 153 статей по многокритериальному анализу стратегий принятия решений относительно применения различных технологий переработки к различным видам отходов, в том числе ТО. В большинстве из представленных исследований описываются технологии сжигания и анаэробного сбраживания ТО с целью получения энергии, что может свидетельствовать о недостаточной оценке ресурсного потенциала ТО и технологий для их переработки и негативном влиянии на окружающую среду из-за вредных выбросов при подобном подходе. В представленном обзоре для анализа возможных

альтернатив при принятии решений используется метод анализа иерархий Т. Сати [7] и аналогичные методы (ELECTRE [8], PROMETHEE [9], TOPSIS [10] и т. д.), которые имеют существенный недостаток, заключающийся в субъективности определения сравнительных оценок и весовых коэффициентов, назначаемых экспертами.

Другой подход к принятию решений в области эффективного управления ресурсами при переработке нефтесодержащих отходов [11] заключается в определении ресурсного потенциала объектов хранения и технологий переработки отходов на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [12], который, в отличие от экспертных методов [7–10], свободен от субъективных экспертных мнений и позволяет определить оценки эффективности сравниваемых объектов и весовые коэффициенты решения соответствующей задачи математического программирования (ЗМП) [13]. Ресурсный потенциал ТО предлагается определять в [11] как комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования отходов с учетом их ресурсной ценности, оригинальный подход к оценке которой на основе метода DEA представлен в [14]. Ресурсная ценность, представляющая количественную оценку физико-химического состава и свойств ТО, определяет степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов в технологиях переработки нефтесодержащих отходов, связанных с их рециклингом, рекуперацией и регенерацией.

В работе предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA). Взаимосвязанная структура объектов хранения, технологий переработки ТО и соответствующей инфраструктуры предприятий НГК рассматривается как единая система переработки отходов.

Общий подход к сравнительному анализу на основе DEA-метода

Предлагаемый в статье алгоритм многофакторного анализа базируется на подходе к сравнительному анализу эффективности группы объектов, представленном в [15] и основанном на формулировке и решении ЗМП, в которых целевая функция и ограничения формируются согласно моделям CCR и Super-efficiency метода DEA [16].

Сравнение Z объектов по некоторому показателю эффективности F_z на основе базовой CCR-модели метода DEA приводит к формулировке задачи поиска максимума целевой функции:

$$F_z(X_z, Y_z) = \frac{\sum_{j=1}^J u_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H v_{iz} x_{iz}} \rightarrow \max_{U, V \in G} \quad (1)$$

при условии принадлежности относительного численного значения оценки F_z интервалу $(0; 1]$, которое записывается в виде ограничения:

$$\frac{\sum_{j=1}^J u_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H v_{iz} x_{iz}} \leq 1, \quad \forall \left(z = \overline{1, Z}; j = \overline{1, J}; i = \overline{1, H}; \right. \\ \left. u_{jz} > 0; v_{iz} > 0 \right), \quad (2)$$

где $u_{jz}, j = \overline{1, J}, z = \overline{1, Z}$ и $v_{iz}, i = \overline{1, H}, z = \overline{1, Z}$ – весовые коэффициенты, которые характеризуют относительный вклад в оценку F_z каждого из выходов $y_{jz}, j = \overline{1, J}$, положительно влияющих на оценку F_z , и каждого из входов $x_{iz}, i = \overline{1, H}$, отрицательно влияющих на оценку F_z , соответственно. Размерность векторов входных и выходных параметров определяется числом учитываемых в сравнительном анализе факторов и потенциальной возможностью определения их численных значений для всех объектов сравнения.

Решение сформулированной ЗМП (1) в условиях ограничений (2) стандартными оптимизационными методами [13] позволяет определить относительные значения оценок $F_z, z = \overline{1, Z}$ для каждого из Z объектов анализируемой группы, а также весовые коэффициенты $u_{jz} \in G, j = \overline{1, J}, z = \overline{1, Z}$ и $v_{iz} \in G, i = \overline{1, H}, z = \overline{1, Z}$, доставляющие максимум соответствующему функционалу (1).

Результатом решения Z ЗМП является совокупность оценок $F_z, z = \overline{1, Z}$; при этом несколько из Z объектов в анализируемой системе могут одновременно получить максимально возможную оценку $F_z = 1$, что не позволяет выявить наилучшие объекты в группе. Объекты с оценками $0 < F_z < 1$ считаются тем менее эффективными относительно рассматриваемого показателя, чем ближе относительное значение оценки F_z к нулю.

Связанная с результатами решения ЗМП (1)–(2) модель Super-efficiency DEA-метода применяется в тех случаях, когда необходимо определить наилучший объект в анализируемой группе при наличии нескольких объектов со значениями оценок эффективности, равными 1 [16]. Аналогично (1)–(2), ЗМП на основе модели Super-efficiency DEA-метода может быть представлена в виде:

$$S_z(X_z, Y_z) = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \rightarrow \max_{\bar{U}, \bar{V} \in \bar{G}}, \quad (3)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \leq 1 \quad \forall \left(\begin{array}{l} z = \overline{1, Z}; z \neq k; j = \overline{1, J}; \\ i = \overline{1, H}; \bar{u}_{jz} > 0; \bar{v}_{iz} > 0 \end{array} \right), \quad (4)$$

где $\bar{U} = (\bar{u}_{jz}), j = \overline{1, J}; \bar{V} = (\bar{v}_{iz}), i = \overline{1, H}$ – векторы весовых коэффициентов для каждого z -го объекта сравнения, $z = \overline{1, Z}$, которые за исключением весовых коэффициентов $\bar{u}_{jk}$ и $\bar{v}_{ik}$ являются неизвестными; $\bar{u}_{jk}, j = \overline{1, J}$ и $\bar{v}_{ik}, i = \overline{1, H}$ – весовые коэффициенты, полученные для выходных и входных параметров k -го объекта сравнения со значением оценки эффективности $F_k = 1$, соответственно, рассчитанной на основе решения ЗМП в форме (1)–(2); k – порядковый номер объекта сравнения со значением оценки $F_k = 1$ в анализируемой группе, которые исключаются из решения ЗМП в форме (3)–(4); $k = \overline{1, P}$, где P – число объектов со значением оценки эффективности $F_k = 1$.

Получаемые в результате решения ЗМП (3)–(4) сравнительные оценки S_z , $z = \overline{1, Z}$ распределены на интервале $(0, \infty)$. Максимальная оценка S_z соответствует наилучшему объекту сравнения относительно целевой функции (3) в анализируемой группе.

Алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО

Описанный выше подход, основанный на DEA-методе, получил свою дальнейшую разработку и был распространен авторами на совершенно новую предметную область чрезвычайно актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти и нефтесодержащих отходов [11, 14, 15].

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки ТО является разработанная авторами методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих задач математического программирования. В качестве объектов сравнения рассматриваются хранилища ТО и технологии их переработки.

Представленный на рис. 1 алгоритм базируется на последовательном решении трех взаимосвязанных задач сравнительного анализа объектов системы переработки отходов, позволяющих ранжировать данные объекты по их ресурсной ценности, ресурсному потенциалу, а также по критериям ресурсосбережения и энергетической эффективности.

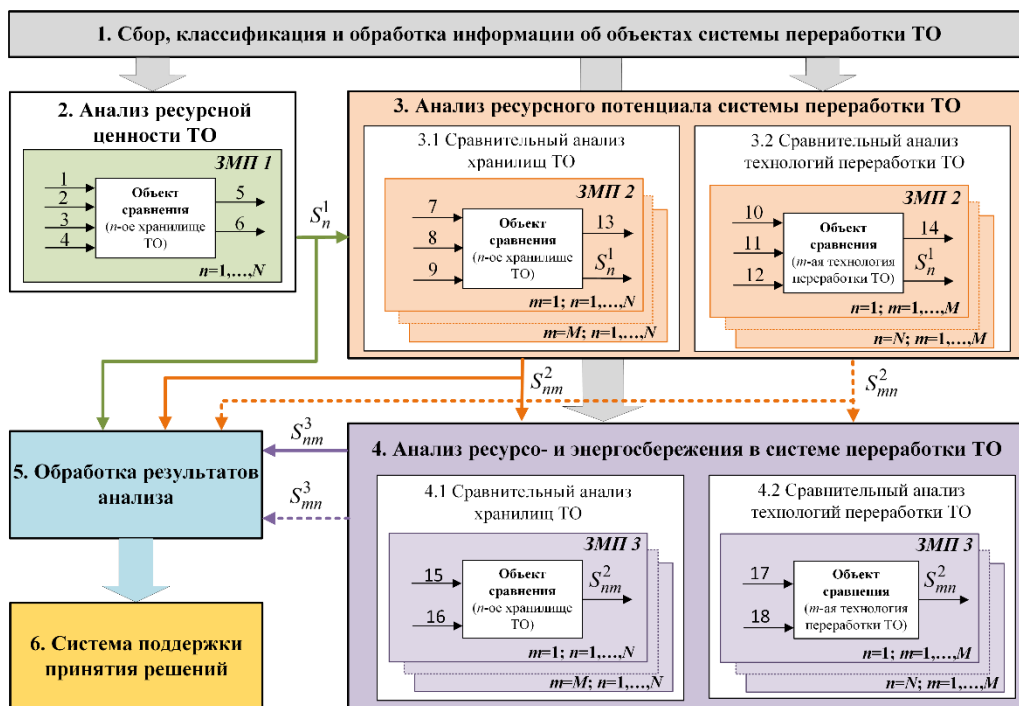


Рис. 1. Алгоритм многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО

Представленный на рис. 1 алгоритм включает 6 этапов.

Сбор и обработка информации проводятся на первом этапе на основе разработанных принципов классификации, систематизации и анализа информации, которые позволяют не только обеспечить систематизированный сбор информации о хранилищах и технологиях переработки отходов, но и оценить ее качество (полноту, точность, достоверность, актуальность, согласованность). В процессе классификации и систематизации информации определяются основные характеристики объектов системы переработки ТО, являющиеся исходными данными для решения ЗМП 1–3 (см. рис. 1).

На втором этапе решается задача анализа ресурсной ценности [11] отходов в N хранилищах системы (ЗМП 1), сформулированная в виде (1)–(2) на основе CCR-модели и в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. Основными выходными параметрами, характеризующими ресурсную ценность ТО в хранилищах, являются средневзвешенное содержание светлых углеводородов и отношение массы светлых углеводородов к суммарной массе вредных примесей и воды (выходы 5–6, см. рис. 1). Входными параметрами, уменьшающими ресурсную ценность ТО в хранилищах, являются удельные содержания воды, асфальтенов и смол, механических и минеральных примесей, серы (входы 1–4 на рис. 1). Результатом решения ЗМП 1 в виде (1)–(2) и (3)–(4) являются относительные оценки F_n^1 и S_n^1 , $n = \overline{1, N}$ ресурсной ценности ТО соответственно. Наибольшую ресурсную ценность в анализируемой группе из N хранилищ имеют отходы, содержащиеся в n -ом хранилище и имеющие максимальную оценку S_n^1 , которая показывает степень пригодности отходов для использования в качестве материальных ресурсов для дальнейшей переработки.

На третьем этапе определяется ресурсный потенциал для двух видов объектов анализируемой системы переработки ТО: хранилищ и технологий переработки ТО [11].

Ресурсный потенциал n -го хранилища характеризует комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования содержащихся в нем отходов при их переработке посредством конкретной технологии. Ресурсный потенциал m -ой технологии характеризует степень эффективности ее применения для вторичной переработки отходов в определенном хранилище.

Задача анализа ресурсного потенциала системы переработки ТО (ЗМП 2) также формулируется в виде (1)–(2) и (3)–(4) на основе моделей CCR и Super-efficiency DEA-метода соответственно. Входными параметрами ЗМП 2 являются длительность переработки ТО, масса реагентов и расход энергии (топлива) (входы 7–9 и 10–12 на рис. 1). Выходными параметрами ЗМП 2 являются масса полезных продуктов рециклинга (выходы 13 и 14, см. рис. 1) и оценка S_n^1 , $n = \overline{1, N}$ ресурсной ценности хранилища ТО, полученная на основе решения ЗМП 1 в виде (3)–(4).

Решение ЗМП 2 позволяет определить относительные оценки F_{nm}^2 и S_{nm}^2 , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$ ресурсного потенциала n -го хранилища при переработке находящихся в нем отходов с помощью m -ой технологии. Анализ оценок S_{nm}^2 , $n = \overline{1, N}$ по модели Super-efficiency DEA-метода позволяет выявить, какое из N хранилищ в анализируемой системе обладает наибольшим ресурсным потенциалом относительно каждой m -ой из M технологий переработки в анализируемой системе. Аналогично в результате решения ЗМП 2 определяются относительные оценки F_{nm}^2 и S_{nm}^2 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсного потенциала m -ой технологии для переработки

ТО в n -ом хранилище. Анализ оценок $S_{nm}^2, m=\overline{1, M}$ ресурсного потенциала позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки отходов в каждом n -ом из N анализируемых хранилищ в рассматриваемой системе переработки ТО.

На четвертом этапе решается комплексная задача многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО (ЗМП 3 на рис. 1). Ресурсосбережение в системе переработки ТО заключается в эффективном и экономном использовании ресурсов при переработке с учетом ресурсного потенциала отходов и технологий их переработки. При фиксированном расходе энергии непосредственно в процессе переработки, зависящем от технологических особенностей этого процесса, цель энергосбережения достигается путем минимизации энергетических затрат на транспортировку отходов, мобильных технологических установок, реагентов и продуктов переработки с учетом длительности и стоимости транспортировки.

ЗМП 3, так же, как и ЗМП 2, решается для двух типов объектов анализируемой системы переработки ТО: хранилищ и технологий переработки ТО. Входными параметрами ЗМП 3 являются: удельные энергетические затраты на транспортировку (входы 15 и 17 на рис. 1), включающие затраты на транспортировку ТО от хранилищ к местам расположения стационарных установок переработки или затраты на транспортировку мобильных установок переработки к хранилищам ТО; затраты на транспортировку реагентов к хранилищу ТО с учетом характеристик вида транспорта и стоимости проезда по дорогам федерального значения (система «ПЛАТОН» [17]); длительности доставки (входы 16 и 18 на рис. 1) с учетом времени на транспортировку и длительности погрузочно-разгрузочных операций. Выходными параметрами являются оценки S_{nm}^2 и $S_{nm}^3, m=\overline{1, M}, n=\overline{1, N}$ ресурсного потенциала, полученные в результате решения ЗМП 2.

В результате решения ЗМП 3, сформулированных в виде (1)–(2) и (3)–(4) на основе CCR-модели и модели Super-efficiency DEA-метода соответственно, определяются относительные комплексные многофакторные оценки F_{nm}^3 и $S_{nm}^3, m=\overline{1, M}, n=\overline{1, N}$ ресурсо- и энергосбережения при переработке отходов в анализируемых хранилищах системы. Анализ комплексных оценок $S_{nm}^3, n=\overline{1, N}$ позволяет выявить наилучшее n -ое хранилище, переработка ТО в котором с помощью каждой m -ой из анализируемой группы M технологий осуществляется с наибольшим ресурсо- и энергосбережением в системе.

Аналогично в результате решения ЗМП 3 определяются относительные комплексные многофакторные оценки F_{nm}^3 и $S_{nm}^3, m=\overline{1, M}, n=\overline{1, N}$ ресурсо- и энергосбережения при использовании m -ой технологии для переработки ТО в каждом n -ом хранилище. Анализ комплексных оценок $S_{nm}^3, m=\overline{1, M}$ позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки ТО в каждом n -ом из N хранилищ с наибольшим ресурсо- и энергосбережением в системе переработки в целом.

На пятом этапе алгоритма происходит обработка полученных результатов многофакторного анализа ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО и передача информации в систему поддержки принятия решений (шестой этап).

Предполагается, что в системе поддержки принятия решений будут анализироваться два типа оценок эффективности: частные и обобщенные.

Частные оценки используются для локальной оптимизации системы переработки ТО, когда с помощью разработанного алгоритма выбирается оптимальная

пара «хранилище – технология переработки» по соответствующим критериям эффективности в отношении анализируемых групп хранилищ или технологий переработки ТО. Таким образом, частные оценки соответствуют максимальным оценкам $S_n^1, S_{nm}^2, S_{nn}^2, S_{nm}^3, S_{nn}^3, m=\overline{1, M}, n=\overline{1, N}$, полученным путем решения ЗМП 1–3 (см. рис. 1) соответственно, и позволяют принимать локальные управленческие решения:

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, отходы в котором обладают наибольшей ресурсной ценностью, согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^1 = \max(S_n^1), n = \overline{1, N}; \quad (5)$$

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, отходы в котором обладают максимальным ресурсным потенциалом при применении m -ой технологии, согласно соответствующей оценке:

$$IN_m^2 = \max(S_{nm}^2), n = \overline{1, N}; \quad (6)$$

– по выбору из M технологий, применяемых в системе для вторичной переработки отходов в n -ом хранилище, такой технологии, которая имеет максимальный ресурсный потенциал согласно соответствующей оценке:

$$IM_n^2 = \max(S_{nm}^2), m = \overline{1, M}; \quad (7)$$

– по выбору такой пары «хранилище – технология переработки», которая обеспечивает наиболее эффективное использование ресурсного потенциала системы согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^2 = \max(S_{nm}^2) = \max(S_{nn}^2), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}; \quad (8)$$

– по выбору из N объектов хранения в системе для вторичной переработки такого хранилища, в котором переработка отходов осуществляется с максимальным ресурсо- и энергосбережением, согласно соответствующей комплексной оценке:

$$IN_m^3 = \max(S_{nm}^3), n = \overline{1, N}; \quad (9)$$

– по выбору из M технологий, применяемых в системе для вторичной переработки отходов в n -ом хранилище, такой технологии, которая обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО согласно соответствующей комплексной оценке:

$$IM_n^3 = \max(S_{nm}^3), m = \overline{1, M}; \quad (10)$$

– по выбору такой пары «хранилище – технология переработки», которая обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО согласно соответствующей оценке:

$$I_{\max}^3 = \max(S_{nm}^3) = \max(S_{nn}^3), n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}. \quad (11)$$

Обобщенные оценки используются в случаях принятия стратегических решений по управлению в системе переработки отходов, когда определяются либо

наилучшие технологии для всей группы из N хранилищ, либо наилучшие для переработки хранилища ТО относительно всей группы из M технологий в составе системы.

В качестве обобщенных оценок при проведении анализа результатов решения ЗМП 2–3 (см. рис. 1), предлагается использовать:

– комплексную оценку SN_m^2 ресурсного потенциала m -ой технологии при ее применении для переработки ТО в N хранилищах анализируемой системы, определяемую в виде:

$$SN_m^2 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^2, m = \overline{1, M}; \quad (12)$$

– комплексную оценку SN_m^3 относительной эффективности использования ресурсов и энергии при применении m -ой технологии для переработки ТО в N хранилищах системы:

$$SN_m^3 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^3, m = \overline{1, M}. \quad (13)$$

Применение разработанного алгоритма и анализ результатов

Для апробации разработанного алгоритма был проведен многофакторный анализ системы переработки ТО, включающей $N=90$ хранилищ нефтесодержащих жидких отходов ($n=\overline{1,8}$ – нефтешламовые амбары; $n=\overline{9,23}$ – илонакопители; $n=\overline{24,59}$ – нефтеловушки; $n=\overline{60,84}$ – шламонакопители; $n=\overline{85,90}$ – обвалование свечей аварийного сброса) и $M=14$ потенциально возможных технологий их переработки (см. таблицу), расположенных в пределах одного региона Российской Федерации.

Анализ ресурсной ценности ТО. На рис. 2 представлены ранжированные оценки S_n^1 , $n=\overline{1,90}$ ресурсной ценности ТО в хранилищах системы, полученные в результате решения ЗМП 1, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. На рис. 2 показаны 10 хранилищ, получивших максимальные оценки ресурсной ценности хранящихся в них отходов, и 10 хранилищ, имеющих минимальные значения данных оценок.

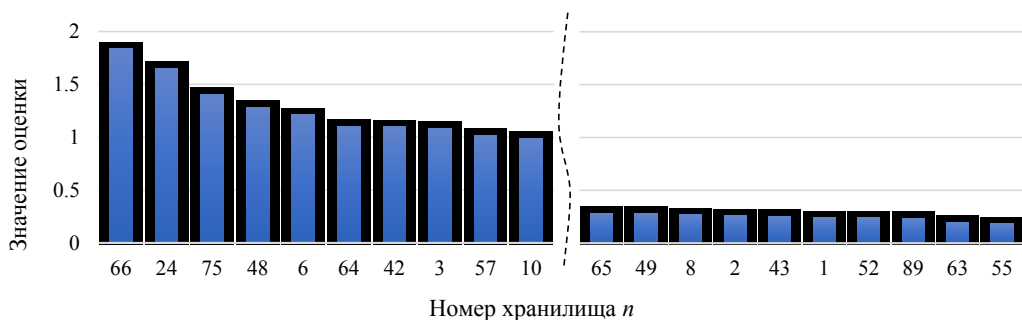


Рис. 2. Оценки S_n^1 ресурсной ценности ТО

Характеристики технологий переработки ТО

<i>m</i>	Название технологии (установки)	Метод/способ переработки	Производительность (по паспорту)	Наименование продукта вторичной переработки
1	МераМакс	Физико-химический метод/рекуперация	7–15 м³/ч	Нефть
2	Минералоль	Пиролиз с рекуперацией	2 м³/ч	Нефть, сухой остаток
3	COMPEX НТР 2,2	Пиролиз	0,2 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
4	COMPEX НТР 20	Пиролиз	2–2,3 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
5	Holo-Scru 10	Термический метод/рекуперация	0,1–20 м³/ч	Нефть
6	Electric-Scru 10	Термический метод/рекуперация	0,1–20 м³/ч	Нефть
7	Установка пиролиза Фортан-4	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,1–0,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
8	Установка пиролиза Фортан-20	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,5–2,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
9	Фортан ТМ 200	Термический метод/рекуперация	5,2–36 м³/ч	Жидкое печное топливо, технический углерод, газ
10	ПУ-01	Технология обезвреживания нефтесодержащих отходов методом реагентного капсулирования	2 м³/ч	Зола, горячая вода, пар, электроэнергия
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физико-химический метод/рекуперация	10–15 м³/ч	Грунтово-шламовая смесь для отсыпки дорог 3-й категории
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физико-химический метод/рекуперация	15–20 м³/ч	Нефть
13	Еco-TechRecOil Oy	Физико-химический метод	30–50 м³/ч	Товарный нефтепродукт
14	ИнноТек	Физико-химический метод/рекуперация	0,3–0,35 т/ч	Жидкое печное топливо, зола

Анализ представленных на рис. 2 результатов показывает, что максимальной ресурсной ценностью в рассматриваемой системе переработки обладают отходы в шламонакопителе (хранилище № 66) с оценкой $I_{\max}^1 = S_{66}^1 = 1.84$. Очевидно, что для наиболее рационального использования отходов, имеющих наибольшую ре-

сурсную ценность, в первую очередь имеет смысл перерабатывать ТО в хранилищах $n = 66, 24, 75, 48, 6, 64, 42, 3, 57$, имеющих оценки ресурсной ценности $S_n^1 \geq 1$ (см. рис. 2). ТО в хранилищах $n = 65, 49, 8, 2, 43, 1, 52, 89, 63, 55$, имеющих минимальные оценки ресурсной ценности $S_n^1 < 0.3$, нецелесообразно перерабатывать (см. рис. 2).

Анализ ресурсного потенциала системы переработки ТО

На рис. 3 и 4 представлены результаты решения ЗМП 2, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода. На рис. 3 показаны ранжированные оценки $S_{n13}^2, n = \overline{1, 90}$ и $S_{m90}^2, m = \overline{1, 14}$ ресурсного потенциала хранилищ системы при применении технологии № 13 для переработки отходов в них; представлены 10 хранилищ с максимальными и 10 с минимальными оценками. На рис. 4 представлены оценки ресурсного потенциала технологий с учетом переработки ТО в хранилище № 90.

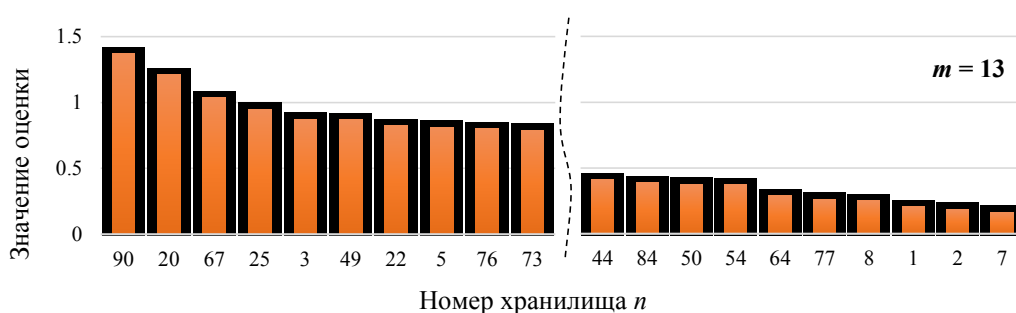


Рис. 3. Оценки S_{n13}^2 ресурсного потенциала хранилищ при применении технологии № 13 для переработки ТО

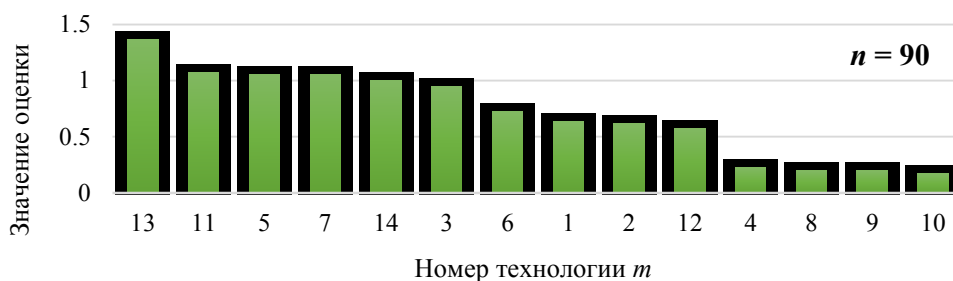


Рис. 4. Оценки S_{m90}^2 ресурсного потенциала технологий при их применении для переработки ТО в хранилище № 90

Анализ представленных на рис. 3 и 4 результатов показывает, что наилучшей по ресурсному потенциалу в системе переработки ТО является пара «обвалование свечи аварийного сброса (хранилище № 90) – технология Eco-TechRecOil Oy (технология № 13)» с оценкой $I_{\max}^2 = S_{90\ 13}^2 = S_{13\ 90}^2 = 1.37$, определяемой согласно (8).

На рис. 5 представлены ранжированные результаты анализа по выбору в системе наилучших по ресурсному потенциалу хранилищ в виде оценок IM_n^2 (на рис. 5а показаны 10 хранилищ с максимальными и 10 с минимальными оценками), определяемых согласно (7), и технологий переработки ТО в виде ранжированных оценок IN_m^2 (рис. 5б), определяемых согласно (6).

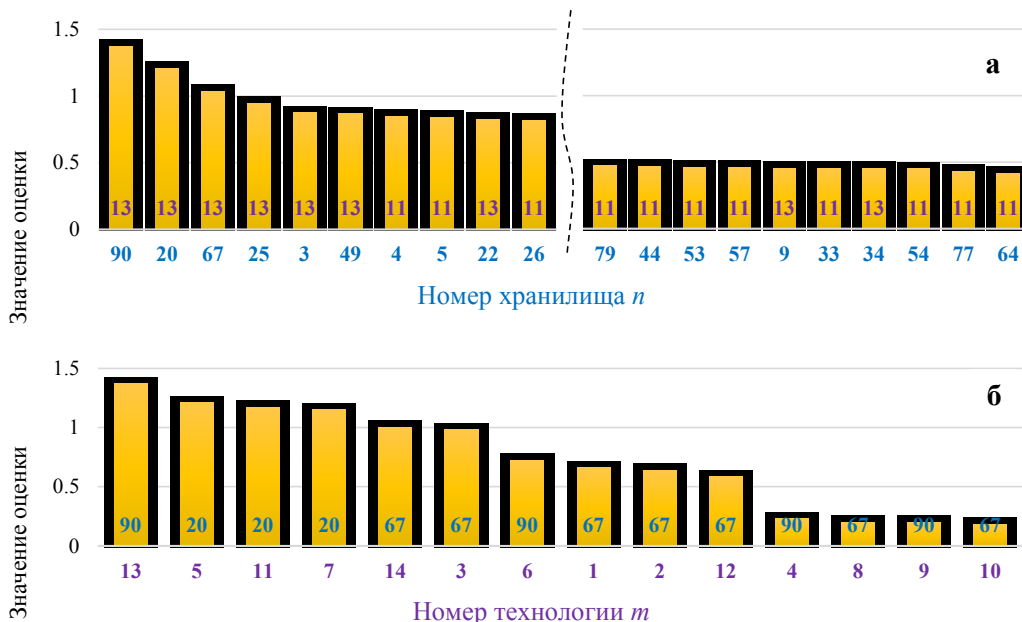


Рис. 5. Наилучшие относительные оценки ресурсного потенциала (решение ЗМП 2):

a – для хранилищ (IM_n^2); b – для технологий (IN_m^2)

Каждая из представленных на рис. 5 оценок IM_n^2 и IN_m^2 является максимальной в своей группе. Это означает, что наилучшей для переработки ТО в хранилище № 90 является технология № 13 с оценкой $IM_{90}^2 = IN_{13}^2 = 1.37$. В свою очередь, при применении технологии Holo-Scru 10 (№ 5) наилучшим по ресурсному потенциалу для переработки является ТО в илонакопителе (хранилище № 20) с оценкой $IN_5^2 = 1.209$ (рис. 5б). При этом для переработки отходов в хранилище № 20 наилучшей по ресурсному потенциалу является технология Eco-TechRecOil Oy (№ 13) с оценкой $IM_{20}^2 = 1.21$ (рис. 5а).

На рис. 6 представлены результаты анализа ресурсного потенциала системы переработки хранилищ ТО в виде ранжированных комплексных оценок SN_m^2 , полученных по формуле (12).

Наилучшей по ресурсному потенциалу для всех хранилищ в составе системы является технология Eco-TechRecOil Oy (№ 13) с максимальной суммарной оценкой $SN_{13}^2 = 53.5$ (рис. 6). Очевидно, что для наиболее эффективного использования ресурсного потенциала хранилищ в системе переработки ТО необходимо применять технологии $m=13, 11, 5, 7, 14$ для их переработки.



Рис. 6. Комплексные оценки SN_m^2 ресурсного потенциала технологий в системе переработки ТО

Анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО. Аналогично рассмотренной выше процедуре анализа ресурсного потенциала (см. рис. 3–6) проводится анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки ТО путем решения соответствующих ЗМП 3, сформулированной в виде (3)–(4) на основе модели Super-efficiency DEA-метода, в результате чего определяются оценки эффективности для каждой группы объектов системы переработки ТО. На рис. 7 представлены результаты анализа ресурсосбережения и энергетической эффективности системы переработки хранилищ ТО в виде ранжированных комплексных оценок SN_m^3 , полученных по формуле (13).



Рис. 7. Комплексные оценки SN_m^3 относительной эффективности использования ресурсов и энергии технологиями в системе переработки ТО

Технология УПБШ-10С/УПБШ-10СД (№ 11) обеспечивает наиболее энергоэффективную и наименее ресурсозатратную переработку ТО во всех хранилищах системы с максимальной суммарной оценкой $SN_{11}^3 = 16.77$ (рис. 7). Использование технологий $m = 3, 1, 4, 2, 8, 14, 9, 7, 5, 6, 10$ для переработки ТО в системе является практически нецелесообразным из-за низкого уровня оценок ресурсосбережения и энергетической эффективности. Изменение актуальных значений оценок системы возможно при изменении мест географического расположения установок переработки или их замене на мобильные аналоги, однако в этом случае потребуются учесть дополнительные затраты и оценить экономическую эффективность планируемых преобразований.

Выводы

В работе предложен новый подход к многофакторному анализу ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса на основе метода DEA. Подробно описаны этапы разработанного алгоритма многофакторного анализа системы переработки техногенных отходов.

Полученные результаты подтверждают возможность использования предлагаемого подхода на основе метода DEA и позволяют выбрать наилучшее решение по управлению объектами в рассматриваемой системе переработки ТО, учитывая ресурсную ценность ТО, ресурсный потенциал, ресурсо- и энергосбережение процессов переработки отходов в системе.

Известный DEA-метод анализа данных, приобретающий широкое распространение в мировой практике использования математического аппарата производственных функций для решения задач оценивания эффективности технических систем, распространен на задачи оптимизации систем переработки техногенных отходов, что можно рассматривать как теоретическую основу создания не имеющих аналогов подходов к многокритериальной оптимизации производственных систем.

Предложенный подход и разработанный алгоритм могут в дальнейшем получить множественные применения в нефтеносных регионах, где рост образования техногенных отходов имеет серьезные и часто необратимые экологические последствия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мазлова Е.А., Мецержков С.В. Проблемы утилизации нефтешламов и способы их переработки. – М: Ноосфера. 2001. – С. 54.
2. Гарабаджю А.В. Кластер технологических установок переработки многотоннажных накоплений кислых гудронов и нефтешламов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2012. – Вып. 9. – С. 37–48.
3. Косулина Т.П., Кононенко Е.А. Повышение экологической безопасности продукта утилизации нефтяных шламов // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – № 78. – С. 84–93.
4. Ashby M.F. Chapter 14-the vision: a circular materials economy. In: Ashby, M.F. (Ed.), *Materials and Sustainable Development*. Butterworth-Heinemann, Boston. 2016. Pp. 211–239.
5. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *J. Clean. Prod.* 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
6. Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achillas Ch. Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. paper № 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>.
7. Saati T. *Decision-making. Analytic hierarchy process*. М.: Radio and communication, 1993. 278 p.
8. Morrissey A.J., Browne J. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*. 2004. Vol. 24. Pp. 297–308.
9. Brans J.P., Mareschal B. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. In: Figueira J, Greco S and Ehrgott M (eds). 2005. New York, USA: Springer Science + Business Media, Inc. Pp. 163–196.
10. Hwang C.L., Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State of the Art Survey*. 1981. Berlin; New York: Springer-Verlag.
11. Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil and Gas Industry. *Proceedings – 2019 21st International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP-2019)*. 2019. paper № 8976783. Pp. 429–434.

12. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operation Research*. 1978. Vol. 6 (2). Pp. 429–444.
13. Michael J. Todd. The many facets of linear programming. *Mathematical Programming*. 2002. Vol. 91 (3). Pp. 417–436.
14. Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018. Vol. 11. Pp. 139–144.
15. Деревянов М.Ю., Пleshивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г., Пименов А.А. Многокритериальная оценка сложно-структурированной системы комплексной переработки техногенных отходов нефтеперерабатывающей промышленности // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. – 2020. – Т. 4. – С. 37–44.
16. Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: Zhu J. (eds). *Data Envelopment Analysis*. International Series in Operations Research & Management Science. 2015. Vol. 221. Springer, Boston, MA.
17. Постановление Правительства РФ от 14 июня 2013 г. № 504 «О взимании платы в счет возмещения вреда, причиняемого автомобильным дорогам общего пользования федерального значения транспортными средствами, имеющими разрешенную максимальную массу свыше 12 тонн».

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2020 г.

MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF RESOURCE SAVING AND ENERGY EFFICIENCY IN THE TECHNOGENIC WASTE PROCESSING SYSTEM OF THE OIL AND GAS INDUSTRY

M.Yu. Derevyanov, Yu.E. Pleshivtseva, A.A. Afinogentov¹

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

Abstract. *The paper proposes a new approach to multi-criteria analysis of resource and energy saving in the system of processing industrial waste of oil and gas enterprises based on the Data Envelopment Analysis (DEA) method. The DEA method is being extended by the authors to a completely new subject area of extremely important engineering applications related to the problems of processing oil and oily waste.*

The basis of the algorithm for analyzing objects of the wastes processing system considered in the article is a new methodology for sequentially solving interrelated problems of multi-factorial comparison of objects according to heterogeneous quality criteria, which differ in new formulations of related problems of mathematical programming.

The developed algorithm for multi-criteria analysis of resource and energy saving in the processing system allows: collecting, classifying and processing information about the objects of the system; assessment and analysis of the resource value of waste in storage, which determines the degree of suitability of waste for use as material resources in processing technologies associated with their recycling and recovery; assessment and analysis of the resource potential of storage facilities and technologies, which determines the efficiency of

Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Aleksandr A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

the secondary use of industrial waste, taking into account their resource value; evaluation and analysis of the resource and energy saving in the system in general.

The partial and generalized indicators of the efficiency of the waste processing system obtained as a result of solving interrelated problems of mathematical programming are analyzed in the decision support system and make it possible to form local control actions on the system or to justify the strategies for managing the waste processing system.

The proposed approach can in the future receive multiple applications in the oil-bearing regions of the Russian Federation, where the growth in the formation of the technogenic waste has serious and often irreversible environmental consequences.

Keywords: *technogenic waste, data envelopment analysis, resource saving, energy saving, resource value, resource potential, multivariate analysis, oil and gas complex.*

REFERENCES

1. *Mazlova E.A., Mesheryakov S.V.* Problemy utilizatsii nefteshlamov i sposoby ih pererabotki. Moscow, Noosfera. 2001. P. 54. (In Russian).
2. *Garabadzhiu A.B.* Klaster tehnologicheskikh ustanovok pererabotki mnogoton-nazhnykh nakopleniy kislykh gudronov i nefteshlamov. Neftepererabotka I neftehimiya. Nauchno-tehnicheskie dostozheniya I peredovoy opyt. 2012. Vol. 9. Pp. 37–48. (In Russian).
3. *Kosulina T.P., Kononenko E.A.* Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti utilizatsii neftyanykh shlamov. Nauchnyy zhurnal KubGAU. 2012. Vol. 78. Pp. 84–93. (In Russian).
4. *Ashby M.F.* Chapter 14-the vision: a circular materials economy. In: Ashby, M.F. (Ed.), Materials and Sustainable Development. Butterworth-Heinemann, Boston. 2016. Pp. 211–239.
5. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, J. Clean. Prod. 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
6. *Vlachokostas Ch., Michailidou A.V., Achillas Ch.* Multi-Criteria Decision Analysis towards promoting Waste-to-Energy Management Strategies: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. paper № 110563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110563>
7. *Saati T.* Decision-making. Analytic hierarchy process. M.: Radio and communication. 1993. 278 p.
8. *Morrissey A.J., Browne J.* Waste management models and their application to sustainable waste management. Waste Management. 2004. Vol. 24. Pp. 297–308.
9. *Brans J.P., Mareschal B.* Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. In: Figueira J, Greco S and Ehrgott M (eds). 2005. New York, USA: Springer Science + Business Media, Inc. Pp. 163–196.
10. *Hwang C.L., Yoon K.* Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State of the Art Survey. 1981. Berlin; New York: Springer-Verlag.
11. *Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A.* Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil and Gas Industry. Proceedings – 2019 21st International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP-2019). 2019. paper № 8976783. Pp. 429–434.
12. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision-making units. European Journal of Operation Research. 1978. Vol. 6 (2). Pp. 429–444.
13. *Michael J. Todd.* The many facets of linear programming. Mathematical Programming. 2002. Vol. 91 (3). Pp. 417–436.
14. *Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K.* Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method. Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2018. Vol. 11. Pp. 139–144.
15. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Mandra A.G., Pimenov A.A.* Mnogokriterial'naya ocenka slozhno-strukturirovannoj sistemy kompleksnoj pererabotki tekhnogennykh othodov neftepererabatyvayushchej promyshlennosti. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf. 2020. Vol. 4. Pp. 37–44.

16. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis. In: Zhu J. (eds). Data Envelopment Analysis. International Series in Operations Research & Management Science. 2015. Vol. 221. Springer, Boston, MA.
17. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 14 June 2013 N 504 "O vzimanii platy v schet vozmeshcheniya vreda, prichinyaemogo avtomobil'nym dorogam obshchego pol'zovaniya federal'nogo znacheniya transportnymi sredstvami, imeyushchimi razreshennuyu maksimal'nuyu massu svyshe 12 tonn". (In Russian).

УДК 62-503.56; 681.5.015.24

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

А.А. Колодин, В.В. Ёлишин

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: kolodin@istu.edu, dean_zvf@istu.edu

Аннотация. Рассматривается принцип управления на основе прогнозирующей модели (Model Predictive Control – MPC). MPC является фундаментальной частью систем усовершенствованного управления технологическими процессами, в основе которого лежат прогнозирующие модели объектов управления. Управление на основе прогнозирующей модели чаще всего применяется на верхнем уровне автоматизации, в системе управления производственными процессами (Manufacturing Execution System – MES). В статье данный подход применяется в качестве локального регулятора на нижнем уровне автоматизации, в программируемом логическом контроллере (ПЛК), как альтернатива классическому пропорциональному интегро-дифференциальному (ПИД) регулятору. Использование принципа управления с прогнозирующей моделью позволяет реализовать оперативное управление в реальном времени в оптимальных режимах. Но для применения MPC в системах реального времени имеется ряд ограничений, в частности, производительность центрального процессора, время цикла ПЛК и время срабатывания сторожевого таймера. Настроечные параметры регулятора, основанного на принципе управления с прогнозирующей модели, – это горизонт прогнозирования, горизонт управления и время цикла пересчета. В качестве примера приводится реальный объект, обладающий нелинейными свойствами и большим временем запаздывания, которым выступил эмулятор печи. Приведена модель объекта управления и реализован регулятор на основе управления с прогнозирующей моделью в виде программного модуля для ПЛК (MPC-регулятор). Проведен ряд экспериментов и получены качественно-количественные показатели регулирования. В результате сравнения показателей MPC-регулятора и ПИД-регулятора определено, что первый обладает наилучшим быстродействием, точностью и качеством регулирования. Эти результаты достижимы при соблюдении ограничений применения MPC-регулятора в системах реального управления.

Ключевые слова: управление, прогнозирование, моделирование, модель, оптимизация, регулятор, MPC, ПИД-регулятор.

В современных системах автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП) с применением программируемых логических контроллеров (ПЛК) наибольшее распространение получили программные регуляторы на основе пропорционального интегрально-дифференциального (ПИД) за-

Колодин Алексей Александрович, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление».

Ёлишин Виктор Владимирович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление».

кона управления, или просто ПИД-регуляторы, на долю которых приходится более 80 % всех задач управления с обратной связью [1]. Их применяют как самостоятельно, так и в каскадных и комбинированных схемах управления. В большинстве случаев этого регулятора достаточно для ведения технологического процесса. Он обладает высоким быстродействием с настраиваемым и достаточным качеством регулирования. Однако применение ПИД-регулятора к нелинейным, слабо определенным, многосвязным объектам с большим временем запаздывания может приводить к нестабильным показателям качества управления, накоплению ошибок и в конечном итоге к ухудшению качества продукции. Даже принципы автоматической настройки или самонастройки, появившиеся за долгую историю применения ПИД-регуляторов [2, 3], эти недостатки не устранили.

В принципах систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП), или Advanced process control (APC), основой управления является так называемое управление на основе прогнозирующей модели (Model Predictive Control – MPC) [4, 5, 6]. В сути метода лежат прогнозирующие модели объектов управления (рис. 1). В нем используется ряд методов управления, использующих явную динамическую модель процесса для прогнозирования влияния будущих реакций, управляемых (регулируемых) переменных на входе и управляющих сигналов, полученных путем минимизации целевой функции управления [7, 8]. В MPC используется численная оптимизация для нахождения оптимального управления на некотором временном горизонте в будущем на основе модели процесса. Качество управления регулятора зависит от того, насколько хорошо динамика системы описывается моделью, используемой для проектирования регулятора [9, 10].



Рис. 1. Принцип работы управления на основе прогнозирующей модели

Алгоритм управления с прогнозирующей моделью можно представить в следующем виде [2]:

1. Измерить текущее состояние $\tilde{x}[k]$, где k – текущий такт времени.

2. Найти последовательность оптимальных управляющих величин $u[i]$ для горизонта управления $N_c = k + C$, $k \leq N_c$, на всем горизонте прогнозирования $N_p = k + P$, минимизирующую целевую функцию
3. Применить для управления только первую управляющую величину $u[1]$, остальные отбросить.
4. Перейти на шаг 1 и повторить процедуру в момент времени $k+1$.

В большинстве случаев управление на основе MPC применяется для решения задач оптимального управления на верхнем уровне автоматизации, в системе управления производственными процессами (Manufacturing Execution System — MES), без участия управляющих устройств нижнего уровня. Это обуславливается тем, что вычислительные мощности ПЛК не располагают достаточным быстродействием и объемом памяти для обработки и хранения информации при работе алгоритма. Это утверждение было справедливо для ПЛК прошлого века, современные же устройства снабжаются достаточно производительными процессорами и объемами памяти. Благодаря этому становится возможным применить принципы управления с прогнозирующей моделью на более низком уровне и осуществлять оперативное управление в реальном времени в оптимальных режимах [11].

В общем случае структура MPC-регулятора может быть представлена в следующем виде (рис. 2).

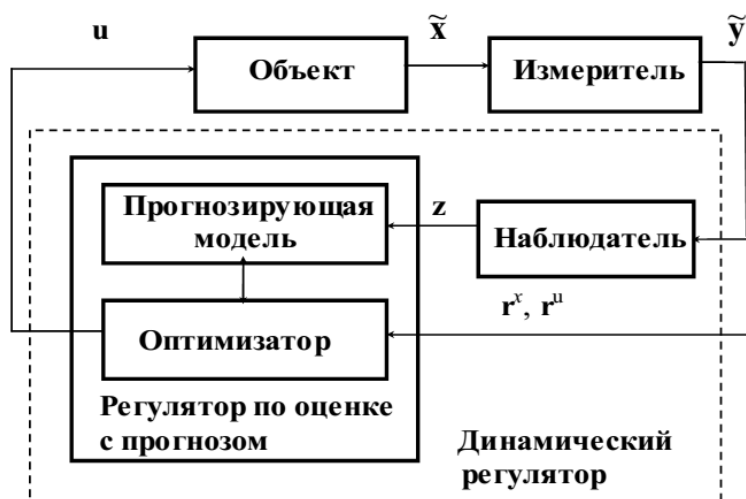


Рис. 2. Структура MPC-регулятора

По аналогии с ПИД-регулятором MPC-регулятор также может работать в контуре один вход – один выход (SISO).

Согласно вышеприведенному алгоритму, основными настроечными параметрами регулятора будут являться:

N_p – горизонт прогноза;

N_c – горизонт управления;

T_t – время одного такта перерасчета алгоритма и нахождения оптимальных управляющих величин, т. е. время, через которое будет происходить выполнение алгоритма работы регулятора.

При использовании МРС-регулятора необходимо учитывать различного рода ограничения. В приведенном выше алгоритме выбор горизонта прогноза влияет на время вычисления последовательности управляющих воздействий вкупе с алгоритмами численной оптимизации. Слишком далекий прогноз и сложность вычисления оптимальных значений ведут к увеличению расчетов на каждом такте и могут потребовать большого процессорного времени. Зачастую в системах реального времени, которыми являются ПЛК, имеется аппаратно-программный сторожевой таймер (Watchdog), который отслеживает время выполнения цикла ПЛК. Если время выполнения превышает заданный порог, то в лучшем случае выполнение программы прерывается и цикл ПЛК перезапускается, а в худшем это приводит к остановке работы контроллера. Поэтому нахождение настроечных параметров регулятора является важной задачей для успешного применения алгоритма.

Каждый параметр N_p , N_c , T_t оказывает влияние на качество регулирования, скорость расчета оптимальных управлений и на чувствительность управляющей системы. Критериями выбора являются минимизация квадратичной ошибки и скорость расчета поиска оптимального варианта управления. При прочих равных условиях предпочтение необходимо отдавать комбинации параметров с наименьшим временем пересчета алгоритма.

Для проведения эксперимента был выбран учебный лабораторный стенд с объектом управления эмулятором печи ОВЕН ЭП10 [12], программируемым логическим контроллером ОВЕН ПЛК-154, исполнительным устройством твердотельным реле (управляющий входом 0–10 В). Регулируемая величина – температура печи ЭП10. Управляющая величина – напряжение на нагревателе, управляемое через твердотельное реле.

Статическая характеристика печи имеет нелинейность в области управления от 0 до 1,9 В [13]. Это обусловлено наличием зоны нечувствительности твердотельного реле. Свыше 1,9 В наблюдается зона квадратичной зависимости вплоть до температуры 120 °С, свыше которой нагревать печь не рекомендуется.

После серии проведенных экспериментов была получена математическая модель объекта управления в статике и динамике. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 7000 \frac{d^2 y}{dt^2} + 360 \frac{dy}{dt} + (y - et_0) = 0.01055 \times (0.88u + 21)^2, u < 1.9; \\ 7000 \frac{d^2 y}{dt^2} + 360 \frac{dy}{dt} + (y - et_0) = 0.01055 \times (45u - 85.5)^2, u \geq 1.9, \end{cases}$$

где y – выходная величина, температура печи;
 u – управляющее воздействие, напряжение твердотельного реле;
 e – поправочный коэффициент при температуре окружающей среды t_0 .

Полученная нелинейная математическая модель легла в основу прогнозирующей модели для МРС-регулятора.

Дальнейшее исследование продолжилось в направлении получения набора оптимальных настроечных параметров МРС-регулятора. Для этой цели в программе математического моделирования была собрана схема объекта управления и реализован алгоритм работы МРС-регулятора, период дискретизации составлял 1 сек. Для каждого набора параметров вычислялось время пересчета алгоритма и качество регулирования.

Из всего многообразия полученных результатов лучшее сочетание расчет – качество имеет набор со следующими параметрами $N_p = 40$, $N_c = 10$, $T_t = 5$. При этих значениях параметров регулятора и проводились дальнейшие исследования.

Программа для ПЛК-154 написана на стандартных языках стандарта IEC 61131-3 в среде разработки CodeSys v.2.3 (рис. 3). В алгоритме программы было организовано два цикла – основной цикл для «главной программы» и цикл по временному прерыванию в 1 сек, что соответствует времени пересчета модели в моделирующей программе. Первый цикл выполнял функцию контроля и управления оборудованием, расчета значений прогнозируемой модели и управляющих воздействий. Во втором цикле рассчитывались текущие состояния объекта и номер такта пересчета (k). Сторожевой таймер в ПЛК устанавливался в 200 мс. Общая блок-схема алгоритма работы программы ПЛК представлена на рис. 4.

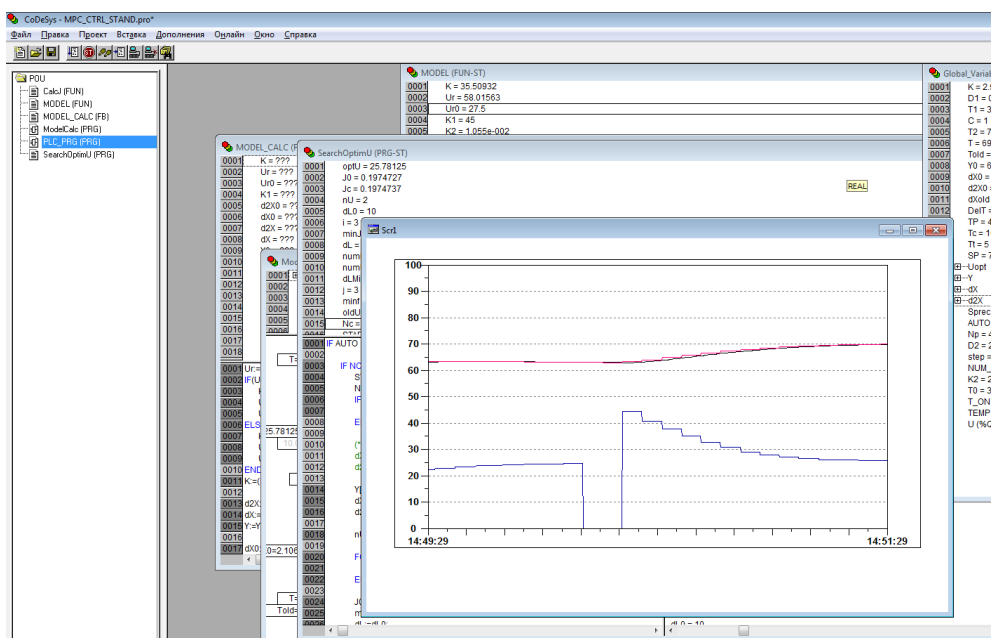


Рис. 3. Среда разработки CodeSys и набор программных модулей для решения задачи управления на основе MPC-регулятора

В такте пересчета, соответствующего параметру T_t , осуществляется нахождение оптимальной последовательности U в подпрограмме «Нахождение оптимальных U », алгоритм которой приведен ранее, на основании прогнозирующей модели с параметрами N_p и N_c .

Отлаженная программа была загружена в контроллер и проведены испытания работы MPC-регулятора в режиме выхода температуры печи на заданное значение температуры 63 °С (рис. 5). Из рисунка видно, что значения, смоделированные в программе (кривая 2), и измеренные значения (кривая 1) значительно отличаются друг от друга. Это говорит о том, что в прогнозирующей модели имеются ошибки моделирования. Тем не менее, как видно из графика, работа регулятора не была нарушена вследствие этих ошибок, он справился со своей задачей, выведя значение температуры печи до заданного величины, хотя и не в оптимальном режиме.

Таким образом, здесь наблюдается еще одно положительное свойство МРС-регулятора – это его робастность, которая обеспечит высокую надежность и устойчивость регулятора на основе МРС с обратной связью [14, 15].

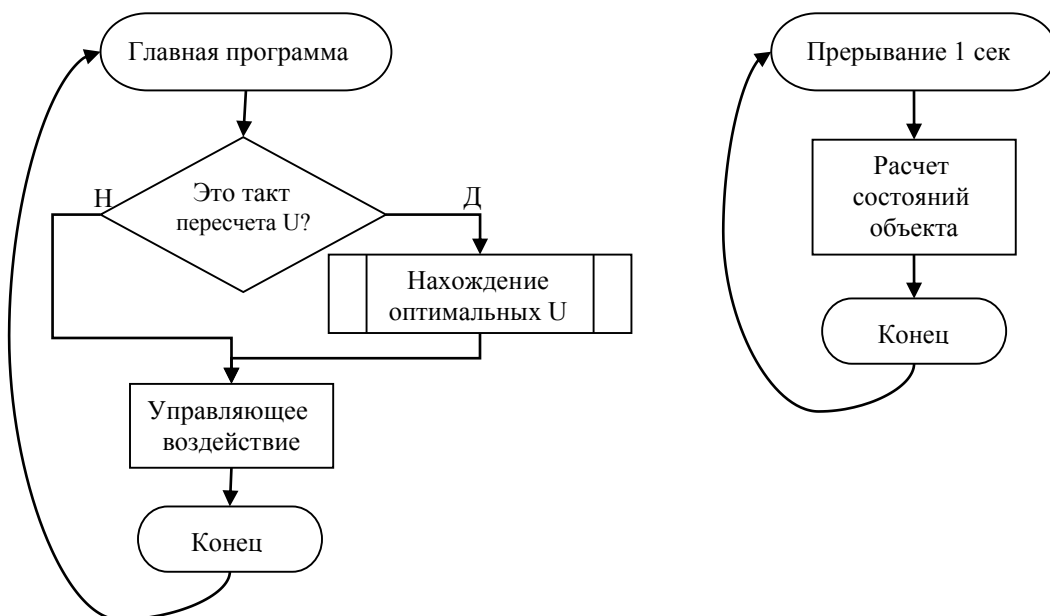


Рис. 4. Алгоритм ПЛК программы регулятора на основе МРС

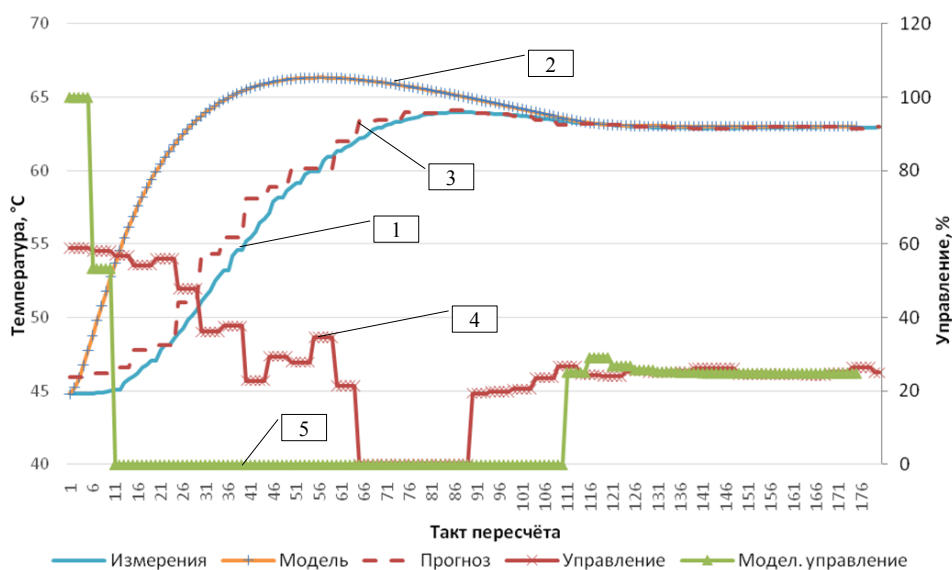


Рис. 5. Работа МРС-регулятора в режиме выхода температуры печи на задание:
 1 – измеренное значение температуры; 2 – смоделированное значение температуры;
 3 – расчетное прогнозное значение температуры; 4 – управляющий сигнал;
 5 – смоделированный управляющий сигнал

На рис. 6 показаны переходные процессы работы регулятора при изменении задания с 63 до 72, 57, 65 °С соответственно.

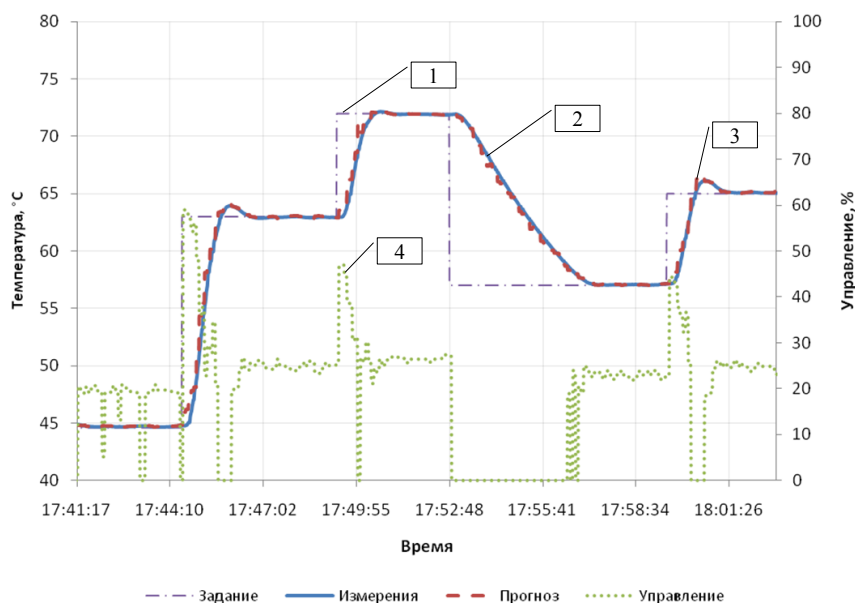


Рис. 6. Переходные процессы работы МРС-регулятора при изменении задания:
1 – значение задания температуры; 2 – измеренное значение температуры;
3 – расчетное прогнозное значение температуры; 4 – управляющий сигнал

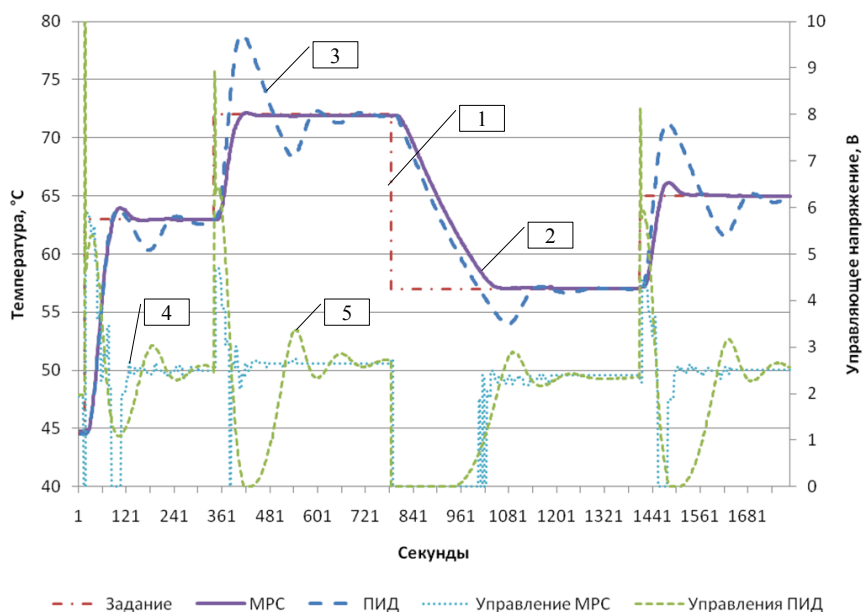


Рис. 7. Переходные процессы работы МРС и ПИД-регуляторов при изменении задания:
1 – значение задания температуры; 2 – измеренное значение температуры для МРС-регулятора;
3 – измеренное значение температуры для ПИД-регулятора; 4 – управляющий сигнал для МРС-регулятора; 5 – управляющий сигнал для ПИД-регулятора

Основная цель разработки МРС-регулятора для систем реального времени – это замена классического ПИД-регулятора. Для этого на том же стенде был реализован и испытан ПИ-регулятор стандартной поставки в составе CodeSys библиотеки *util.lib*. После нахождения оптимальных параметров регулятора (процесс нахождения выходит за рамки данной статьи) были сняты аналогичные переходные характеристики, приведенные выше для МРС-регулятора. На рис. 7 показаны сравнительные графики переходных процессов для МРС- и ПИД-регуляторов.

При анализе графика видно преимущество применения МРС-регулятора. Визуально наблюдается, что он обладает лучшим быстродействием, точностью и качеством регулирования. Качественно-количественные показатели регулирования следующие:

- квадратичная ошибка МРС-регулятора меньше на 27,96 %, чем ПИД;
- время выхода на задание (в диапазон 1 % при изменении задания на 10 %) среднее для МРС – 45 сек, ПИД – 132 сек;
- среднее перерегулирование МРС-регулятора – 0,65 %, ПИД-регулятора – 7,13 %.

Использование принципа управления с прогнозирующей моделью для регулирования технологических параметров наравне с ПИД-регулятором – достаточно перспективное направление. Как показали исследования для нелинейных процессов с существенным временем запаздывания, при правильном выборе параметров регулятора качество регулирования может вырасти более чем на 20 % при одностороннем сокращении времени выхода на заданное значение и практически исключением перерегулирования. Но необходимо при этом учитывать ряд ограничений, накладываемых на ПЛК при применении МРС-регуляторов, в частности, по количеству применяемых регуляторов, так как в некоторых случаях реализовать в одном контроллере более 4–5 таких регуляторов – достаточно сложная задача. Все эти ограничения обуславливаются все той же недостаточной производительностью процессора и памятью ПЛК, хотя часть ограничений снимаются при разработке более производительного и оптимального алгоритма работы МРС-регулятора. Тем не менее его наиболее эффективное применение видится в процессах с длительными переходными процессами и процессах с значительным временем запаздывания, когда расчет прогнозирующей модели можно растянуть во временном интервале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation*. 2010. Vol. 3, No. 4. P. 47–63.
2. Колодин А.А., Мельник С.А. Управление на основе прогнозирующей модели (model predictive control) // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. – С. 9–14.
3. Martín-Sánchez Juan M., Rodellar José. *Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization*. Prentice-Hall. 1996. P. 352.
4. Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba. *Model Predictive Control*. Springer publication, London. 2007. P. 405.
5. Rawlings J.B. Tutorial: Model Predictive Control Technology. *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, California. 1999. Pp. 662–676.
6. Carlos E. Garcia, David M. Prett and Manfred Morari, *Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey*. Automatica. 1989. Vol. 25, No. 3. Pp. 335–348.
7. Tao Zheng. *Advanced Model Predictive Control*. InTech, Croatia. 2011. P. 418.
8. Holkar K.S., Waghmare L.M. Discrete Model Predictive Control for DC drive Using Orthonormal Basis function. *UKACC International Conference on CONTROL*. Coventry, UK. 2010. Pp. 435–440.

9. Mohanty, Swati. Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column. *Journal of Process Control*. 2009. Vol. 19. Pp. 991–999.
10. Richalet J. Industrial applications of model based predictive control. *Automatica*. 1993. Vol. 29. P. 1251–1274.
11. Abu-Ayyad M., Dubay R. Real-time comparison of a number of predictive controllers. *ISA Transactions*. 2007. Vol. 46. Pp. 411–418.
12. ЭП10 эмулятор печи. <https://owen.ru/product/ep10> (дата обращения 10 ноября 2020 г.)
13. Тарасов Д.Е., Колодин А.А. Построение математической модели печи учебного стенда // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2020. – С. 238–242.
14. Kothare M., Balakrishnan V., Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*. 1996. Vol. 32(10). Pp. 1361–1379.
15. Draeger S. Engel H. Ranke. Model predictive control using neural networks. *IEEE Control System Magazine*. 1995. Vol. 15, No. 5. Pp. 61–66.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2020 г.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE CONTROLLER BASED ON THE MODEL PREDICTIVE CONTROL

A.A. Kolodin, V.V. Elshin

Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract. *Modern automated process control systems that use programmable logic controllers use software controllers based on the proportional integral-differential control law, the PID controller. In most cases, this regulator is sufficient for conducting the technological process. It has high performance with configurable and sufficient quality of regulation. However, using a PID controller for non-linear, poorly defined, multi-connected objects with a long delay time can lead to unstable control quality indicators, accumulation of errors, and ultimately to a deterioration in product quality. One of the most promising methods of control is Model Predictive Control - MPC. The method base on predictive models of control objects. The quality of the controller's control depends on how well the system dynamics described by the model used to design the controller. In most cases, MPC-based control use to handle optimal control problems on the Manufacturing Execution System-MES. However, thanks to the development of microprocessors and increased CPU performance, it becomes possible to apply the principles of control with a predictive model at a lower level, and perform real-time operational control in optimal modes. The work presents the algorithm of MPC controller. The control object is a SISO object with a nonlinear characteristic and a long transition process. Studies of the developed MPC regulator showed that the quality of regulation, compared to the PID regulator, increased by more than 20%, the time to get to set point decreased, and there was almost no over-regulation. The most effective application of the MPC controller is seen in processes with long transitions and with a significant delay time.*

Keywords: *control, prediction, modelling, model, optimization, Model Predictive Control, MPC, PID controller.*

*Aleksey A. Kolodin, Senior Lecture.
Viktor V. Elshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

REFERENCES

1. *Holkar K.S., Waghmare L.M.* An Overview of Model Predictive Control. *International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation*. 2010. Vol. 3, No. 4. P. 47–63.
2. *Kolodin A.A., Melnik S.A.* Upravlenie na osnove prognoziryushhej modeli (model predictive control). *Pererabotka prirodnogo i texnogennogo sy'r'ya: sbornik nauchny'x trudov studentov, magistrantov, aspirantov i molody'x ucheny'x Instituta vy'sokix texnologij*. Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2018. Pp. 9–14. (In Russian).
3. *Martín-Sánchez Juan M., Rodellar José.* Adaptive Predictive Control: From the Concepts to Plant Optimization. Prentice-Hall. 1996. P. 352.
4. *Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons Alba.* Model Predictive Control. Springer publication, London. 2007. P. 405.
5. *Rawlings J.B.* Tutorial: Model Predictive Control Technology. *Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California*. 1999. Pp. 662–676.
6. *Carlos E. Garcia, David M. Prett and Manfred Morari,* Model Predictive Control: Theory and Practice a Survey. *Automatica*. 1989. Vol. 25, No. 3. Pp. 335–348.
7. *Tao Zheng.* Advanced Model Predictive Control. InTech, Croatia. 2011. P. 418.
8. *Holkar K.S., Waghmare L.M.* Discrete Model Predictive Control for DC drive Using Orthonormal Basis function. *UKACC International Conference on CONTROL*. Coventry, UK. 2010. Pp. 435–440.
9. *Mohanty, Swati.* Artificial neural network based system identification and model predictive control of a flotation column. *Journal of Process Control*. 2009. Vol. 19. Pp. 991–999.
10. *Richalet J.* Industrial applications of model based predictive control. *Automatica*. 1993. Vol. 29. P. 1251–1274.
11. *Abu-Ayyad M., Dubay R.* Real-time comparison of a number of predictive controllers. *ISA Transactions*. 2007. Vol. 46. Pp. 411–418.
12. E'P10 e'mulyator pechi. <https://owen.ru/product/ep10> (accessed November 10, 2020) (In Russian).
13. *Tarasov D.E., Kolodin A.A.* Postroenie matematicheskoy modeli pechi uchebnogo stenda. *Perspektivy razvitiya texnologii pererabotki uglevodorodny'x i mineral'ny'x resursov. Materialy X Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem*. 2020. Pp. 238–242. (In Russian).
14. *Kothare M., Balakrishnan V., Morari M.* Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*. 1996. Vol. 32(10). Pp. 1361–1379.
15. *Draeger S. Engel H. Ranke.* Model predictive control using neural networks. *IEEE Control System Magazine*. 1995. Vol. 15, No. 5. Pp. 61–66.

УДК 004.942

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО ВВОДА В ПРОИЗВОДСТВО РОБОТИЗИРОВАННОГО АВТОМОБИЛЯ

С.П. Орлов, Е.Е. Бизюкова, А.Е. Яковлева

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

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Аннотация. Создание роботизированных автомобилей сельскохозяйственного назначения является перспективным направлением в автомобилестроении. Сложность конструкции беспилотного грузового автомобиля, работа в тяжелых условиях эксплуатации, наличие большого числа измерительных устройств и подсистем обработки данных делают актуальным создание системы виртуальных испытаний. Данные испытания являются частью общего процесса виртуального ввода в эксплуатацию роботизированного автомобиля. В статье рассматривается комплекс подсистем, которые обеспечивают проведение виртуальных испытаний на основе модели-ориентированного подхода: подсистема математического моделирования, подсистема имитации измерений, информационная подсистема с базами данных. Разработаны метрологические модели измерительных каналов для виртуальных испытаний, которые позволяют имитировать случайные изменения параметров автомобиля и погрешности измерения. Процесс тестирования охватывает все важнейшие агрегаты роботизированного автомобиля. В качестве примера рассматривается динамическая модель тормозной системы шасси КАМАЗ и приведены результаты виртуальных испытаний режимов торможения. Разработанная система виртуальных испытаний используется при создании грузового автомобиля КАМАЗ в составе роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей.

Ключевые слова: системный анализ, беспилотные автомобили, виртуальный ввод в эксплуатацию, виртуальные испытания, моделирование, информационные системы, автоматическое управление.

Введение

Создание роботизированных транспортных средств охватывает новые области применения. Одно из перспективных направлений, активно развиваемое в настоящее время, – разработка роботизированных автомобилей (РА) сельскохозяйственного назначения [1–6]. Фирма ПАО «КАМАЗ» в кооперации с Самарским государственным техническим университетом реализует проект создания роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства КАМАЗ с автономным и дистанционным режимами управления [7, 8].

Орлов Сергей Павлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Вычислительная техника».

Бизюкова Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Яковлева Анастасия Евгеньевна, аспирант кафедры «Вычислительная техника».

Такая система обуславливает повышенные требования к надежности агрегатов роботизированных автомобилей, которые следует обеспечивать уже на стадии проектирования отдельных агрегатов.

Решение этой задачи сталкивается с рядом проблем, вызванных сложными условиями эксплуатации автомобилей при работе на некачественном покрытии полевых дорог. Современный подход к управлению жизненным циклом (PLM) включает в себя базовую компоненту – виртуальный ввод изделия в эксплуатацию (Virtual Commissioning) [9–12]. Виртуальный ввод в эксплуатацию охватывает широкий спектр задач: от создания концепции и конструкции роботизированного автомобиля до проектирования производственных линий и цехов.

При разработке роботизированного автомобиля КАМАЗ было предложено использовать модели-ориентированный подход к проектированию кибер-физических систем, базирующийся на широком использовании математических и имитационных моделей [13–16]. В то же время из-за невозможности получения полностью адекватных моделей агрегатов автомобиля необходимая информация выявляется с помощью натурных испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла.

В настоящей статье рассматривается подход, связанный с использованием виртуальных моделей агрегатов автомобиля и виртуальных испытаний. Виртуальные испытания [17, 18] являются составной частью более общего процесса – виртуального ввода в эксплуатацию сложных технических объектов. С одной стороны, виртуальная модель агрегата позволяет на ранних этапах проектирования выявить несоответствие требованиям к основным эксплуатационным характеристикам. С другой стороны, виртуальные испытания автомобиля также позволяют выполнить отладку производственных процессов и проектирование производственных линий.

Управление виртуальными испытаниями агрегатов автомобиля

Проведение физических экспериментов по испытаниям агрегатов, систем и всего автомобиля – достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс, занимающий значительное время. Это обстоятельство ограничивало число проводимых испытаний с уже изготовленными агрегатами автомобиля. Цифровизация производства и развитие информационных технологий позволяют сочетать натурные испытания агрегатов и подсистем автомобиля с имитацией их испытаний на компьютере. Такой подход сокращает объем физических испытаний и затраты на эксплуатацию комплекса испытательного оборудования. Кроме того, появляется возможность исследования таких режимов и сценариев работы автомобиля, которые не были охвачены ранее.

В состав системы виртуальных испытаний входят следующие основные компоненты:

- подсистема математического моделирования агрегатов;
- подсистема планирования эксперимента;
- подсистема имитации погрешностей установки параметров и измерений;
- подсистема визуализации процесса испытаний и документирования.

Общая структура системы виртуальных испытаний представлена на рис. 1. Методологической основой является экспертная система, содержащая базу знаний математических моделей агрегатов и интерфейс специалиста-аналитика. В базе знаний реализована онтология предметной области автомобильных агрегатов

с ориентацией на шасси КАМАЗ, которая используется в сочетании с методом поиска моделей. Экспертная система обеспечивает вывод решений на основе новых фактов, получаемых при виртуальных испытаниях.

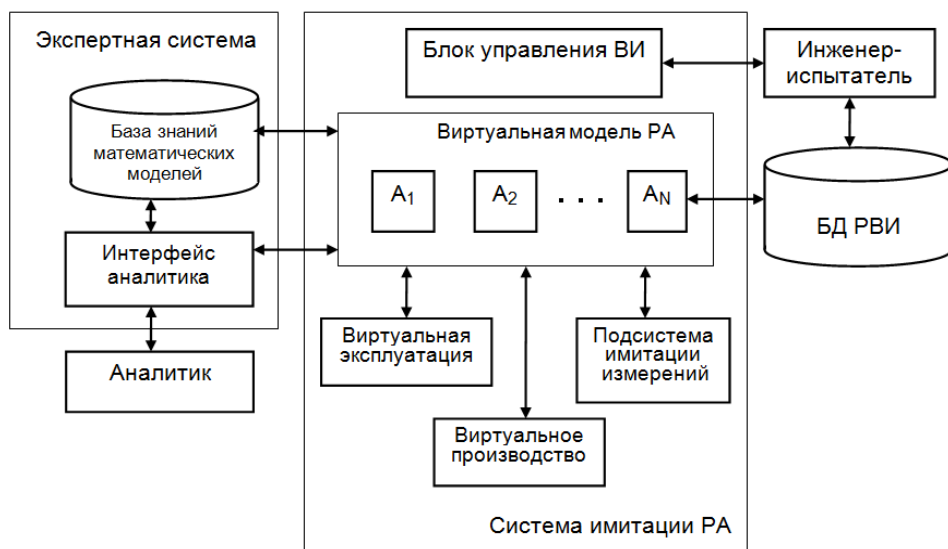


Рис. 1. Общая структура системы виртуальных испытаний агрегатов:
 $A_1, A_2, \dots, A_N$ – модели агрегатов; БД РВИ – база данных результатов виртуальных испытаний;
 РА – роботизированный автомобиль

Одна из важных задач – идентификация математической модели по результатам виртуальных испытаний. Идентификация математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов по значениям измеряемых величин в процессе. В результате формируется математическая модель исследуемого экземпляра агрегата, согласованная с экспериментальными данными. Эта информация передается в базу знаний экспертной системы.

Подсистема планирования эксперимента предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: например, полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента.

Набор виртуальных моделей $A_1, A_2, \dots, A_N$ агрегатов роботизированного автомобиля РА выбирается в подсистеме планирования эксперимента и может модифицироваться в процессе испытаний.

База данных результатов виртуальных испытаний (БД РВИ) обеспечивает запись, хранение и визуализацию информации о проведенных испытаниях.

Система имитации ориентирована на работу в двух режимах:

1. Виртуальная эксплуатация – имитация воздействий на агрегат условий движения: дорожного покрытия, внешней среды (температуры, влажности, осадков), а также режимов работы автомобиля: перевоз груза, порожний пробег, буксировка и т. п.

2. Виртуальное производство – имитация производственных процессов изготовления агрегатов с учетом изменений проектных параметров по результатам виртуальных испытаний.

Роль инженера-испытателя заключается в задании режимов работы системы имитации в целом, контроле над ходом виртуальных испытаний, формировании отчетной документации. Аналитик обеспечивает функционирование экспертной системы, проводит изменение математических моделей, модифицирует правила вывода по результатам испытаний.

Структура информационной подсистемы и алгоритм виртуальных испытаний

Информационная подсистема представляет собой совокупность баз данных: базы знаний математических моделей агрегата и базы данных результатов виртуальных испытаний.

База знаний математических моделей является составной частью подсистемы математического моделирования агрегата и хранит информацию о математических моделях узлов, агрегатов и систем автомобиля. На основе этих моделей проводятся имитационные испытания, проектный расчет агрегата и расчет его эксплуатационных характеристик.

База данных результатов виртуальных испытаний БД РВИ содержит следующую информацию:

- название модели и типа агрегата автомобиля;
- серийный номер;
- конструктивные особенности агрегата;
- год производства и сертификации;
- производитель агрегата;
- основные технические характеристики;
- история виртуальных и натурных испытаний, проводившихся с данным экземпляром агрегата.

Алгоритм виртуальных испытаний представляет собой последовательность этапов:

1. Осуществляется выбор типа и модели i -го агрегата и передача соответствующей математической модели из базы знаний в систему имитации РА.

2. Исходные параметры агрегата и данные об условиях эксплуатации передаются в подсистему математического моделирования, где совместно с математической моделью они составляют виртуальную модель агрегата A_j .

3. В подсистеме планирования эксперимента выбирается задача испытаний, проводится расчет характеристик агрегата и выполняется виртуальный эксперимент с имитацией случайных девиаций значений определенного набора параметров.

4. Выполняется имитация измерений параметров агрегата со случайными погрешностями в измерительных каналах, соответствующих реальным измерительным устройствам роботизированного автомобиля.

5. На основании полученных результатов имитационного эксперимента выполняется идентификация математической модели агрегата.

6. В случае значительного расхождения аналитик принимает решение о модификации исходной математической модели. После этого возможно повторение п. 2.

7. После проведения виртуального эксперимента данные заносятся в БД РВИ и формируется протокол испытаний. На основе этих данных строятся различные диаграммы, иллюстрирующие различные взаимозависимости параметров агрегата.

Имитация измерительных процессов при виртуальных испытаниях

Качество и адекватность моделей во многом определяются возможностью имитировать факторы, имеющие случайный характер: внешние воздействия окружающей среды, отклонения параметров агрегата от проектных значений. В результате появляется возможность учета индивидуальных особенностей каждого конкретного экземпляра агрегата, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления блока цилиндров, сборки кривошипно-шатунного механизма, коленчатого вала и т. п.). Значительное влияние оказывает и неточность измерения параметров испытываемого агрегата. В разработанной системе виртуальных испытаний используется подсистема имитации погрешностей установки параметров и измерений, которая служит для приближения модели к реальным условиям эксплуатации (рис. 2).

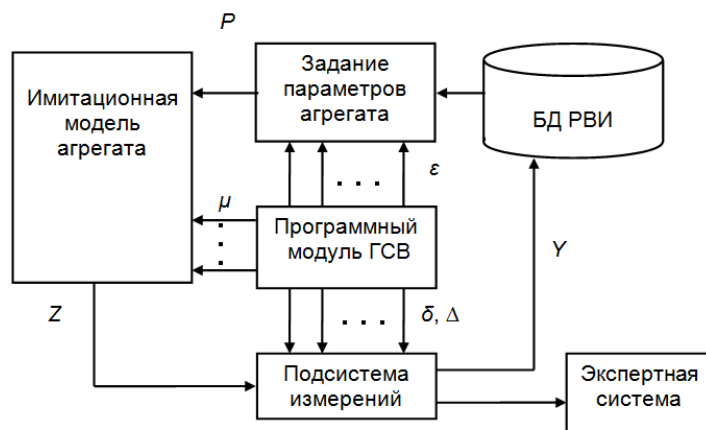


Рис. 2. Имитация погрешностей установки и измерения параметров агрегата:

БД РВИ – база данных результатов виртуальных испытаний;

ГСВ – генерация случайных величин

Номинальный вектор результатов виртуальных испытаний

$$Y_D = F(X, P, W),$$

где P – вектор параметров режимов работы агрегата;

X – вектор измеряемых характеристик;

W – множество внутренних состояний агрегата.

Вектор результатов при имитации случайных воздействий на агрегат:

$$Y_{IM} = F(Z(\delta, \Delta), P(\varepsilon), W(\mu)),$$

где ε – отклонения параметров P агрегата от номинальных значений;

μ – отклонения внутренних состояний агрегатов от номинальных значений;

δ, Δ – мультипликативные и аддитивные погрешности измерительных каналов.

Анализ метрологических характеристик измерительных каналов подсистемы имитации измерений проводится с использованием метрологической модели, связывающей функции преобразования, мультипликативные погрешности δ и аддитивные погрешности Δ по методике, представленной в работах [19, 20]. На рис. 3

приведена структурная схема метрологической модели линейного измерительного канала.

Номинальная функция преобразования некоторого параметра X определяется выражением

$$X^{\text{НОМ}} = X \prod_{i=1}^K S_i,$$

где S_i – функции преобразования (коэффициенты чувствительности) измерительных устройств;

X – входной сигнал.

Тогда общая случайная погрешность измерения ε равна разности между номинальной величиной и реально измеренным значением:

$$\varepsilon = X^{\text{НОМ}} - X_{\text{ИЗМ}}.$$

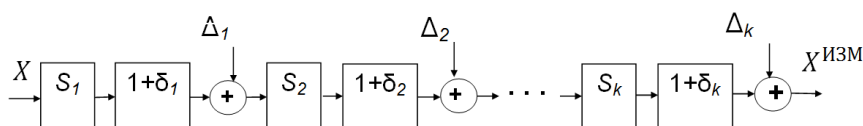


Рис. 3. Структурная схема измерительного канала для метрологической модели

Реально измеряемое значение $X_{\text{ИЗМ}}$ зависит от величины мультипликативных δ_i и аддитивных Δ_i составляющих погрешностей:

$$X_{\text{ИЗМ}} = (S_1(1 + \delta_1) + \Delta_1)(S_2(1 + \delta_2) + \Delta_2) \dots (S_k(1 + \delta_k) + \Delta_k). \quad (1)$$

Предполагая, что произведения погрешностей δ_i и Δ_i имеют пренебрежимо малые значения, получим следующие выражения для общей мультипликативной погрешности δ и общей аддитивной погрешности Δ :

$$\delta = \sum_{i=1}^K \delta_i, \quad (2)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^K \left(\Delta_i \prod_{j=1}^K S_j \right). \quad (3)$$

Случайный закон распределения общей погрешности задается путем генерации вероятностных характеристик величин δ_i и Δ_i в формулах (2) и (3). Более сложные измерительные каналы, имеющие параллельно-последовательную структуру, описываются суперпозицией выражений вида (2) и (3).

Подсистема имитации измерений соответствует физической измерительной системе роботизированного шасси на базе модифицированной модели КАМАЗ 65119.

Полный набор контролируемых параметров включает:

- скорость (м/с);
- переключение передач (-1 (R), 0 (N), 1...7 (D));
- обороты двигателя (об/мин);
- температуру охлаждающей жидкости (°C);

- давление масла ($^{\circ}\text{C}$);
- давление в первом и втором контурах (кПа);
- напряжение бортовой сети (В);
- предупреждения об ошибках, поступающие от двигателя, трансмиссии и EBS;
- направление движения (градус);
- угол поворота колес (градус);
- состояние (system ready – готовность к запуску двигателя);
- координаты нахождения автомобиля: *lat* (широта); *lon* (долгота).

Моделирование тормозной системы роботизированного шасси КАМАЗ

Виртуальные испытания проводились с большим числом видов агрегатов автомобиля, поэтому в данной статье для примера приводятся результаты моделирования тормозной системы. Моделирование агрегатов выполнялось в среде MATLAB/Simulink.

В роботизированном шасси КАМАЗ установлена тормозная система Wabco Standard. Виртуальные испытания проводились с учетом работы подсистем тормозной системы:

- ABS – антиблокировочная система;
- ASR – антипробуксовочная система;
- EBD – система распределения тормозных усилий;
- EBA – система экстренного торможения.

Функциональная динамическая модель тормозной системы приведена на рис. 4. Результаты моделирования приведены на рис. 5, где показан коэффициент проскальзывания $\rho(t)$ колеса при торможении с использованием ABS и без ABS.

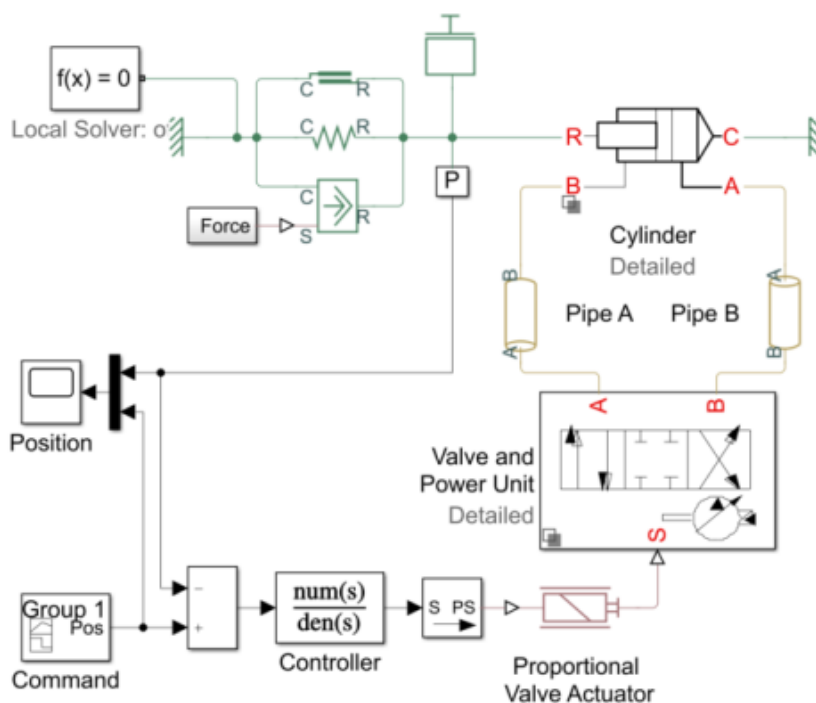


Рис. 4. Модель тормозной системы

На рис. 6 представлены графики угловой скорости вращения $R(t)$ колеса и линейной скорости автомобиля $V(t)$ в двух режимах.

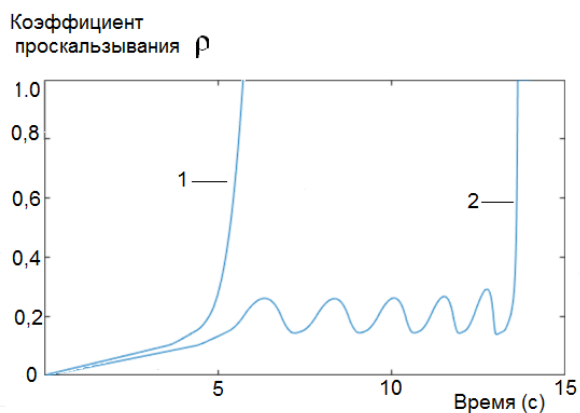


Рис. 5. Коэффициент проскальзывания колеса $\rho(t)$:
1 – без ABS; 2 – с ABS

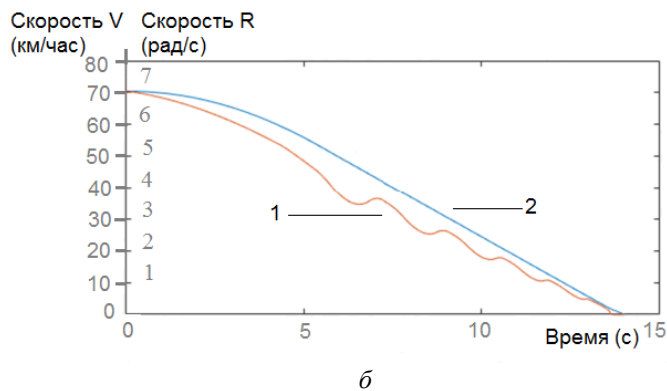
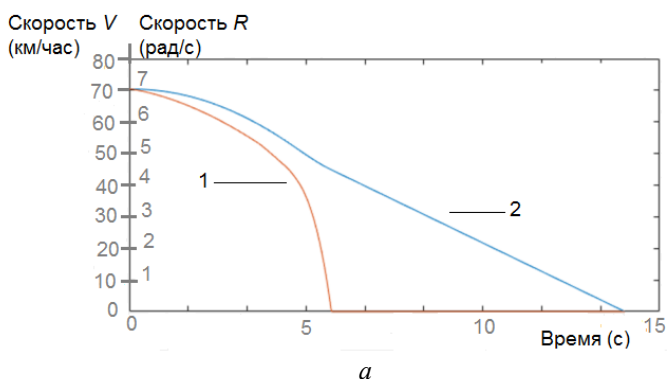


Рис. 6. Скорость автомобиля V и угловая скорость вращения колеса R :
 a – без ABS; $б$ – с ABS;
1 – скорость колеса; 2 – скорость автомобиля

С целью определения параметров настройки модели проводились натурные эксперименты для режимов торможения на различных поверхностях. Контроль дорожной поверхности на экспериментальном автомобильном шасси выполнялся с помощью ультразвукового датчика, установленного под днищем автомобиля [21]. За счет определения времени и фазы отраженного сигнала была получена информация о степени шероховатости профиля покрытия, которая в дальнейшем использовалась для расчета коэффициентов модели.

В результате анализа модельных экспериментов было выявлено, что при работе ABS время скольжения с заблокированными колесами уменьшается в 2,4 раза. При этом время движения автомобиля до остановки практически совпадает для обоих режимов и равно 14 с. Важно отметить, что в режиме с ABS сохраняется степень управляемости рулем, что имеет особое значение для беспилотного автомобиля.

Полученные результаты моделирования движения при торможении обеспечивают проектирование «электронной педали», управляющей роботизированным автомобилем при перемещении по полевым дорогам.

Заключение

Разработка комплекса моделей агрегатов роботизированного автомобиля и проведение виртуальных испытаний значительно сокращают период от концептуального проектирования до создания экспериментального образца автомобиля. Виртуальные испытания агрегатов выявили некорректные проектные решения и неучтенные факторы, влияющих на процесс эксплуатации.

Дальнейшее развитие системы виртуальных испытаний связано с разработкой методов и алгоритмов виртуальных сценариев эксплуатации роботизированного автомобиля в различных условиях. Полученная информация будет обрабатываться с использованием метода оценки эффективности Data Envelopment Analysis (DEA) [22]. Это позволит на ранних этапах определять планируемые остаточные ресурсы агрегатов и прогнозировать их надежность. В рамках виртуального ввода в эксплуатацию полученные результаты будут положены в основу организации системы технического обслуживания и ремонта роботизированных сельскохозяйственных автомобилей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B. Agricultural robotics: The Future of robotic agriculture. UK-RAS Network White papers. London. 2018. 36 p.
2. Tsiropoulos Z., Spyro F., Liakos V., Tekin A.V., Aygun T., Blackmore S. Web-based Farm Management Information System for Agricultural Robots. Proceedings of EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation." Turin. 2013. Pp. 1–8.
3. Thomasson J.A., Antille D.J., Baillie C.P., Lobsey C.R., Maccarthy C.L. Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art. Proceedings of the 2019 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA. 2019. Vol. 40. Pp. 1–17.
4. Behere S., Torngren M. A functional architecture for autonomous driving. Information and Software Technology. 2015. Vol. 73. Pp. 1–8.
5. Emmi L., Gonzalez-de-Soto M., Pajares G., Gonzalez-de-Santos P. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots. The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 404059. 21 p.
6. Billingsley J., Visala A., Dunn M. Robotics in Agriculture and Forestry. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1065–1077.
7. Сусарев С.В., Сидоренко К.В., Морев А.С., Гашенко Ю.В. Принципы построения систем управления роботизированных транспортных средств с автономным и дистанционным режимом

- управления // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XXI Международной конференции. – Т. 2. – Самара: Офорт, 2019. – С. 107–110.
8. Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399 (033020). Pp. 1–5.
 9. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.
 10. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Kłodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
 11. Siemens. Virtually commission your automation systems prior to launch <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/virtual-commissioning.html> (accessed December 8, 2020).
 12. SIMIT – Simulation Platform for Virtual Commissioning. <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10166253/info/> (accessed December 10, 2020).
 13. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Gubanov N.G., Sidorenko K.V. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System. *Proceedings of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019)*. Tomsk: Polytechnic University Publishing House. 2019. Pp. 469–474.
 14. Daigle M. Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (accessed February 15, 2009).
 15. Schulte P.Z., Spenser D.A. On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations. *Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC)*, Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
 16. Berrada J. Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
 17. Шмелев А.В., Лисовский Э.В., Короткий В.С. Основы методики виртуального моделирования испытаний кабин грузовых автомобилей по требованиям пассивной безопасности // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2015. – № 3 (32). – С. 64–72.
 18. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2011. – № 3(27). – С. 326–331.
 19. Шлыков Г.П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности. – Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2008. – 100 с.
 20. Орлов С.П., Ахполова Е.А., Уютова О.Ю. Метрологическая модель измерительных каналов ИИС контроля оптико-электронного преобразователя // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): Труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова*. – Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2017. – С. 142–146.
 21. Kavitha C., Ashok B., Nanthagopal K., Desai R., Rastogi N., Shetty S. Braking distance algorithm for autonomous cars using road surface recognition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 263 (062034). Pp. 1–15.
 22. Susarev S.V., Orlov S.P. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 919 (052056). Pp. 1–7.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

VIRTUAL TESTS OF ROBOTIC VEHICLE UNITS FOR VIRTUAL COMMISSIONING

S.P. Orlov, E.E. Bizyukova, A.E. Iakovleva

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

E-mail: orlovsp1946@gmail.com

Abstract. *The creation of robotic vehicles for agricultural purposes is a promising direction in the automotive industry. The complexity of the self-driving truck's design, work in difficult operating conditions, and a large number of measuring devices and processing subsystems determine the relevance of creating a virtual test system. These tests are part of the overall virtual commissioning process for a robotic vehicle. The article discusses a set of basic subsystems that provide virtual tests based on a model-based approach: mathematical modeling, measurement modeling, information subsystem with databases, visualization and documentation subsystem. Metrological models of measuring channels for virtual tests have been developed, allowing simulating random vehicle parameter changes. The testing process covers all the most essential components of a robotic vehicle. For example, the article presents a dynamic model of the braking system of a robotic chassis and shows the results of braking modes' virtual tests. The developed virtual test system is used to create a KAMAZ truck as part of a robotic system for agricultural vehicles.*

Keywords: *system analysis, self-driving vehicle, virtual commissioning, virtual tests, simulation, information systems, automatic control.*

REFERENCES

1. Duckett T., Pearson S., Blackmore S., Grieve B. Agricultural robotics: The Future of robotic agriculture. UK-RAS Network White papers. London. 2018. 36 p.
2. Tsiropoulos Z., Spyro F., Liakos V., Tekin A.V., Aygun T., Blackmore S. Web-based Farm Management Information System for Agricultural Robots. Proceedings of EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation." Turin. 2013. Pp. 1–8.
3. Thomasson J.A., Antille D.J., Baillie C.P., Lobsey C.R., Maccarthy C.L. Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art. Proceedings of the 2019 Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, Kentucky, USA. 2019. Vol. 40. Pp. 1–17.
4. Behere S., Torngren M. A functional architecture for autonomous driving. Information and Software Technology. 2015. Vol. 73. Pp. 1–8.
5. Emmi L., Gonzalez-de-Soto M., Pajares G., Gonzalez-de-Santos P. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots. The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. Article ID 404059. 21 p.
6. Billingsley J., Visala A., Dunn M. Robotics in Agriculture and Forestry. Springer Handbook of Robotics. Berlin: Springer, 2008. Pp. 1065–1077.
7. Susarev S.V., Sidorenko K.V., Morev A.S., Gashenko Iu.V. Principles of building control systems for robotic vehicles with autonomous and remote control modes. Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh: Trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. Samara: Ofort, 2019. Vol. 2. Pp. 107–110.
8. Orlov S.P., Susarev S.V., Kravets O.Ya., Morev A.S. Information system of agricultural robotic KAMAZ cars. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399 (033020). Pp. 1–5.
9. Novak P., Kadera P., Wimmer M. Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol. 2017. Pp. 1–4.

Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Elizaveta E. Bizyukova, Younger Scientific Researcher.
Anastasia E. Iakovleva, Postgraduate Student.

10. Süß S., Magnus S., Thron M., Zipper H., Odefey U., Fäßler V., Strahilov A., Klodowski A., Bär T., Diedrich C. Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Berlin. 2016. Pp. 1–9.
11. Siemens. Virtually commission your automation systems prior to launch <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/tecnomatix/virtual-commissioning.html> (accessed December 8, 2020).
12. SIMIT – Simulation Platform for Virtual Commissioning. <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10166253/info/> (accessed December 10, 2020).
13. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S., Gubanov N.G., Sidorenko K.V. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System. Proceedings of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019). Tomsk: Polytechnic University Publishing House. 2019. Pp. 469–474.
14. Daigle M. Model-based prognostics. Prognostics Center of Excellence, Intelligent Systems Division, NASA Ames Research Center. 2014. <https://pdfs.semanticscholar.org/da58/cbbf188590845e9bf3caf0e3d2bd3f3f6723.pdf> (accessed February 15, 2009).
15. Schulte P.Z., Spenser D.A. On-Board model-based fault diagnosis for autonomous proximity operations. Proceedings of the 69th International Astronautically Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018, IAC-18-C1.5.11x45016. 2018. Pp. 1–15.
16. Berrada J. Modeling Transportation Systems involving Autonomous Vehicle: A State of the Art. Transportation Research Procedia. 2017. Vol. 27. Pp. 215–221.
17. Shmelev A.V., Lisovskii E.V., Korotkii V.S. Fundamentals of the virtual simulation technique for testing truck cabins in accordance with passive safety requirements. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2015. № 3 (32). Pp. 64–72.
18. Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Yu. The concept of building a virtual laboratory for testing a gas turbine engine. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2011. № 3(27). C. 326–331.
19. Shlykov G.P. Measurement theory: equations, models, accuracy estimation. Penza: Publisher PGU, 2008. 100 p.
20. Orlov S.P., Akhpolova E.A., Uiutova O.Yu. Metrological model of measuring channels of IMS control of an optical-electronic converter. Perspektivnye informatsionnye tekhnologii “PIT 2017”: Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Samara: Publishing House of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017. Pp. 142–146.
21. Kavitha C., Ashok B., Nanthagopal K., Desai R., Rastogi N., Shetty S. Braking distance algorithm for autonomous cars using road surface recognition. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 263 (062034). Pp. 1–15.
22. Susarev S.V., Orlov S.P. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919 (052056). Pp. 1–7.

УДК 517.977.5

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕНАБЛЮДАЕМЫМ ВЫХОДОМ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.В. Тычинин¹, Ю.А. Тычинина², Д.А. Рагазин²

¹ ЗАО «ТМ-Сервис»

Россия, 443029, г. Самара, 6-я просека, 157

² Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассматривается синтез системы управления объектом с распределенными параметрами. Обозначены проблемы существующих методов описания таких объектов и разработки систем управления ими. Предложен подход для нивелирования недостатков существующих методов, связанных с допущениями о постоянстве физических характеристик объекта и с необходимостью управления ненаблюдаемой пространственной координатой объекта. В качестве примера рассматривается нагрев массивной заготовки в конвекционной печи. Управление по ненаблюдаемой координате объекта реализовано путем синтеза цепной структуры, реализующей передаточную функцию, близкую к обратной передаточной функции объекта. Слабая чувствительность к параметрической неустойчивости обеспечивается решением обратной задачи динамики. В результате получена система, обладающая слабой чувствительностью к параметрическим возмущениям объекта и обеспечивающая требуемое поведение ненаблюдаемой координаты пространственной области распределенного объекта.

Ключевые слова: объект с распределенными параметрами, граничные условия 1-го рода, граничные условия 3-го рода, компенсация динамических свойств, обратная передаточная функция объекта, периодические структуры, устройство компенсации, параметрическая неустойчивость, параметрические возмущения, обратная задача динамики, эталонная модель, ненаблюдаемая координата, конвекционный нагрев, температура в центре заготовки, изменение теплофизических характеристик объекта.

Введение

Современная наука имеет мощный математический аппарат для описания объектов с распределенными параметрами. Существуют различные подходы к задачам синтеза систем управления такими объектами.

Большинство подходов обладает общим недостатком – в них не учитывается параметрическая неустойчивость объектов. Все модели объектов и алгоритмы управления рассчитываются с учетом допущений о постоянных или кусочно-постоянных физических параметрах объекта. Например, в задаче нагрева массивных заготовок объект рассматривается как распределенный и необходимо учитывать

Тычинин Александр Викторович (к.т.н.), начальник отдела разработки АСУ ТП.

Тычинина Юлия Александровна (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Рагазин Дмитрий Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

распределение температуры по его толщине. Подобные допущения о постоянстве теплофизических параметров вносят погрешность в математическое описание объекта управления.

При разработке систем управления таким объектом прибегают, как правило, к аналитическим методам, которые также базируются на допущении постоянства теплофизических параметров.

Еще одной проблемой при построении таких систем может быть необходимость управления ненаблюдаемой координатой объекта – например, температурой в середине объекта, измерить которую не представляется возможным. Приходится определять ее косвенно, прибегая к аналитическим методам.

Проблема инвариантности в системах управления широко рассматривается в современной науке, например в [1–4].

Применительно к объектам с сосредоточенными параметрами известна задача синтеза системы управления методами обратной динамики и задача компенсации динамических свойств объекта нахождением близкой к обратной передаточной функции с помощью цепных (периодических) структур.

Применительно к задачам управления метод обратной динамики подразумевает определение закона управления путем нахождения дифференциального уравнения, описывающего поведение управляемой величины по заданным требованиям к показателям качества, последующего вычисления по этому уравнению старшей производной и подстановки ее вместо старшей производной в уравнение объекта.

Такой метод был предложен Л.М. Бойчуком [5] для определения структуры при синтезе нелинейных систем управления. Широкому распространению метода способствовали работы П.Д. Крутько [6, 7].

Задача нахождения обратной передаточной функции объекта относится к классу «некорректных» и не имеет точного решения. Проблема состоит в необходимости компенсации динамических свойств объекта и, как следствие, в выполнении операций точного дифференцирования.

Идеальное дифференцирующее звено реализовать невозможно, поэтому, как правило, прибегают к различным приближенным способам реализации оператора дифференцирования. Большинство из них состоит в использовании метода малого параметра, где наличие малого коэффициента позволяет задать системе некоторый запас устойчивости, снизив при этом точность реализации.

Задачам нахождения обратных передаточных функций и решению некорректных задач посвящены работы Б.М. Менского, А.Н.Тихонова [8–12].

Для решения задачи компенсации динамических свойств объекта возможно использовать цепную схему, где последовательно соединены одинаковые звенья и каждое последующее звено все больше приближает структуру к обратной функции объекта [13–19].

Постановка задачи

Для синтеза системы управления процессом нагрева массивной металлической заготовки относительно ненаблюдаемой координаты (нагрев центральной точки) предлагается последовательно решать следующие задачи:

1. Разработка математической модели распределенного объекта с граничным управлением первого рода.
2. Разработка динамических структур, близких к обратной передаточной функции объекта.

3. Определение эталонной траектории изменения регулируемого параметра (температура в центре заготовки) и на основе обратной передаточной функции определение управляющего воздействия (температура на поверхности заготовки), обеспечивающего требуемый характер поведения ненаблюдаемой фазовой координаты.

4. Математическое описание объекта управления в граничных условиях третьего рода (конвективный нагрев в газовой печи).

5. Структурно-параметрический синтез системы граничного управления с обратной связью по температуре поверхности заготовки методом обратной динамики.

В результате получим систему управления нагревом ненаблюдаемой координаты объекта с обратной связью по температуре поверхности заготовки и температурой печи в качестве управляющего воздействия.

Как будет показано ниже, такая система будет обладать слабой чувствительностью к параметрическим возмущениям объекта управления.

Структура предлагаемого подхода представлена на рис. 1.

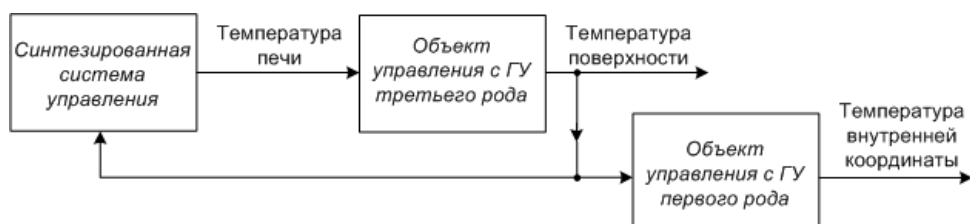


Рис. 1. Структура системы управления внутренней координатой объекта

В качестве объекта управления рассматривается массивная неограниченная пластина из алюминиевого сплава Д16, нагреваемая по толщине. В таблице приводятся принятые в расчетах характеристики нагреваемой заготовки.

Характеристики нагреваемых заготовок сплава Д16 (АА2024)

Параметр	Значение
$2R$, толщина заготовки, мм	250
λ , коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С	130
ρ , плотность, кг/м³	2800
c , теплоемкость, Дж/кг·°С	922
a , коэффициент температуропроводности, м²/с	$49 \cdot 10^{-6}$

Объект управления описывается сначала в граничных условиях первого рода (управление температурой внутренней координаты по температуре поверхности). Затем осуществляется переход к управлению граничной температурой объекта с управляющим воздействием по температуре конвекционной печи. Для этого объект описывается в граничных условиях третьего рода.

Решение поставленной задачи

Решением первой краевой задачи (1) построена модель объекта с управлением по температуре поверхности пластины [20]:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$Q(x,0) = Q_0(x), \quad 0 \leq x \leq R;$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial t} = 0, \quad t > 0;$$

$$Q(R,t) = Q_{II}(t), \quad t > 0.$$

В (1) $a = \text{const}$ – заданный постоянный коэффициент.

Краевая задача (1) может быть представлена в стандартной форме с однородными граничными и нулевыми начальными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} + \omega(x,t), \quad t > 0, \quad 0 < x < R \\ Q(x,0) &= 0, \quad 0 \leq x \leq R \\ \frac{\partial Q(0,t)}{\partial t} &= \frac{\partial Q(R,t)}{\partial t} = 0, \quad t > 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где $\omega(x,t)$ – стандартизирующая функция [20]:

$$\omega(x,t) = a\delta'(x-R) \cdot Q_n(t) + Q_0(x) \cdot \delta(t). \quad (3)$$

Здесь $\delta(t)$ и $\delta(x-R)$ – дельта-функции временного и пространственного аргументов соответственно, сосредоточенные в точках $t=0$ и $x=R$, и $\delta'(x-R)$ – производная по x от $\delta(x-R)$.

Переход к изображениям по Лапласу в уравнениях (2) приводит к следующему выражению для передаточной функции объекта управления (1) с граничным управляющим воздействием $Q_{II}(t)$ в форме ее разложения в бесконечный ряд по собственным функциям первой краевой задачи [20]:

$$W_x(x,p) = \frac{\tilde{Q}(x,p)}{\tilde{Q}_{II}(p)} = \frac{a\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n-1) \cos\left(\frac{\pi x(2n-1)}{2R}\right) \frac{\frac{4R^2}{a\pi^2(2n-1)^2}}{\frac{4R^2}{a\pi^2(2n-1)^2} p + 1}, \quad (4)$$

где $\tilde{Q}(x,p)$ и $\tilde{Q}_{II}(p)$ – изображения $Q(x,t)$ и $Q_{II}(t)$.

Модель объекта построена в соответствии с передаточной функцией (4) с учетом характеристик, приведенных в таблице. При построении модели (рис. 2) ограничили пятью слагаемыми бесконечного ряда.

Задачу компенсации динамических свойств объекта и получения приближенной обратной передаточной функции выполним с помощью цепной структуры [19,

22] (рис. 3), где последовательно соединены одинаковые звенья и каждое последующее звено все больше приближает структуру к обратной функции объекта [14–19, 21].

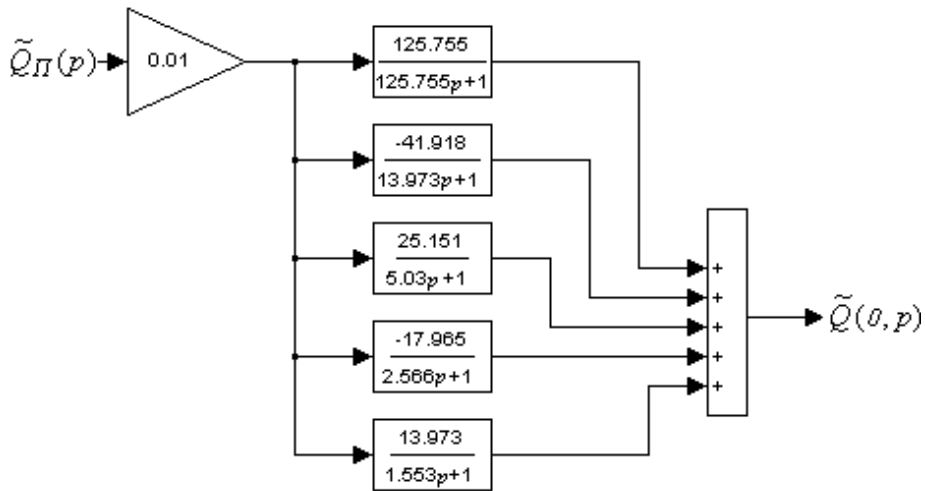


Рис. 2. Модель объекта управления для нагрева центра пластины при граничных условиях первого рода

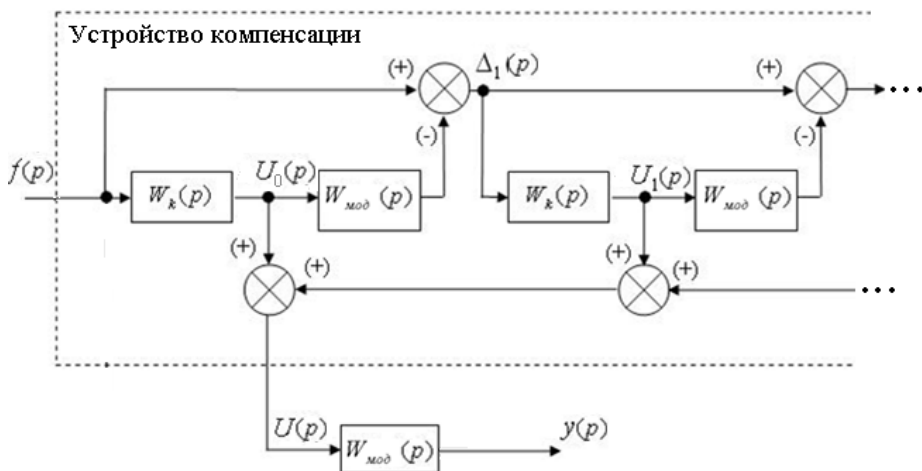


Рис. 3. Система компенсации динамических свойств объекта

На рис. 3 $W_{mod}(p)$ – передаточная функция модели объекта управления, а $W_k(p)$ – передаточная функция корректирующего звена, описываемая уравнением

$$W_{\kappa}(p) = \frac{1}{1 - C + W_{\text{mod}}(p)}. \quad (5)$$

Коэффициент C варьируется в диапазоне $[0 \dots 1]$. При $C=1$ система оказывается физически нереализуемой. В данном подходе необходимо подобрать коэффициент C таким образом, чтобы система была устойчивой и реализуемой (например, в части ограничений на величину управляющего воздействия). Увеличением количества ячеек периодической структуры в устройстве компенсации добиваются приемлемой точности. При этом чем ближе значение коэффициента C к 1 , тем выше скорость сходимости.

Несложно показать, что при бесконечном увеличении количества ячеек периодической структуры и при значениях C , принадлежащих указанному диапазону, передаточная функция структуры стремится к обратной передаточной функции модели объекта:

$$\begin{cases} U_0(p) = f(p) \cdot W_{\kappa}(p), \\ \Delta_1(p) = f(p) \cdot (1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p)), \\ U_1(p) = \Delta_1(p) \cdot W_{\kappa}(p), \\ \Delta_2(p) = \Delta_1(p) \cdot (1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p)), \\ U_2(p) = \Delta_2(p) \cdot W_{\kappa}(p), \\ \dots \\ \Delta_n(p) = \Delta_{n-1}(p) \cdot (1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p)), \\ U_n(p) = \Delta_n(p) \cdot W_{\kappa}(p). \end{cases} \quad (6)$$

Из (6) получаем:

$$\begin{aligned} U(p) &= \sum_{i=0}^n U_i(p), \\ U_i(p) &= W_{\kappa}(p) \cdot f(p) \cdot (1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p))^i, \\ U(p) &= W_{\kappa}(p) \cdot f(p) \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n (1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p))^i\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Из (5) следует, что

$$\lim_{C \rightarrow 1} (W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p)) = 1, \quad (8)$$

где C принадлежит диапазону $[0 \dots 1]$.

Тогда в (7) при количестве ячеек $n \rightarrow \infty$ имеем сумму бесконечной геометрической прогрессии, знаменатель которой по абсолютной величине меньше единицы:

$$|1 - W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{mod}}(p)| < 1, \quad \text{при } C < 1. \quad (9)$$

Известно, что сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии равна первому члену этой прогрессии, деленному на разность между единицей и знаменателем этой прогрессии.

Таким образом, при бесконечном количестве ячеек структуры, представленной на рис. 3, она с абсолютной точностью реализует обратную передаточную функцию объекта управления при любом значении коэффициента $C \in [0, 1]$:

$$U(p) = W_{\kappa}(p) \cdot f(p) \frac{1}{W_{\kappa}(p) \cdot W_{\text{мод}}(p)} = f(p) \cdot \frac{1}{W_{\text{мод}}(p)}. \quad (10)$$

На рис. 3 устройство компенсации включено последовательно с моделью объекта управления. Такое соединение при идеальной реализации компенсирующего устройства имеет единичную передаточную функцию и должно повторить входное воздействие $f(p)$.

В качестве объекта управления рассматривалась модель поведения регулируемой температуры в центре пластины:

$$W_{\text{ЭГ}}(p) = \frac{300}{50000p^2 + 330p + 1}. \quad (11)$$

Построен динамический компенсатор центра пластины при нагреве в граничных условиях 1-го рода (рис. 4) и найдена необходимая траектория изменения температуры поверхности заготовки.

Значение коэффициента $C=0.7$ выбрано из соображений устойчивости системы.

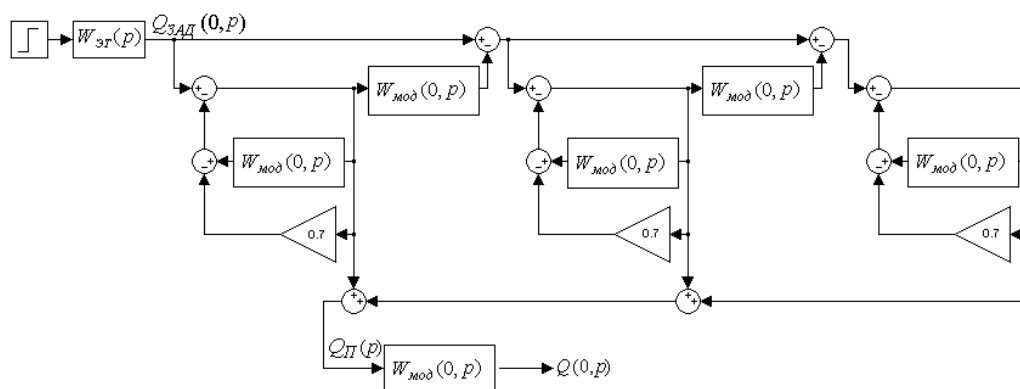


Рис. 4. Динамический компенсатор температуры центра пластины в процессе нагрева при граничных условиях 1-го рода

На рис. 5 приведена переходная характеристика $Q_{\text{ЗАД}}(0, t)$ эталонной модели полученной реакции $Q(0, t)$ на выходе модели объекта; управляющее воздействие $Q_{\text{П}}(t)$ – температура поверхности пластины, а также относительная погрешность, полученная при значении коэффициента $C=0.7$ и количестве ячеек 1 и 3.

Получена передаточная функция изменения граничной температуры нагреваемой заготовки с учетом заданной эталонной траектории температуры в центральной точке объекта (12). Она соответствует модели системы, представленной на рис. 4 с моделью распределенного объекта управления, представленного на рис. 2.

$$W_{\text{э.п.}}(p) = \frac{12p^4 + 27p^3 + 25p^2 + 13p + 38}{50p^6 + 200p^5 + 313p^4 + 258p^3 + 122p^2 + 32.1p + 0.107}. \quad (12)$$

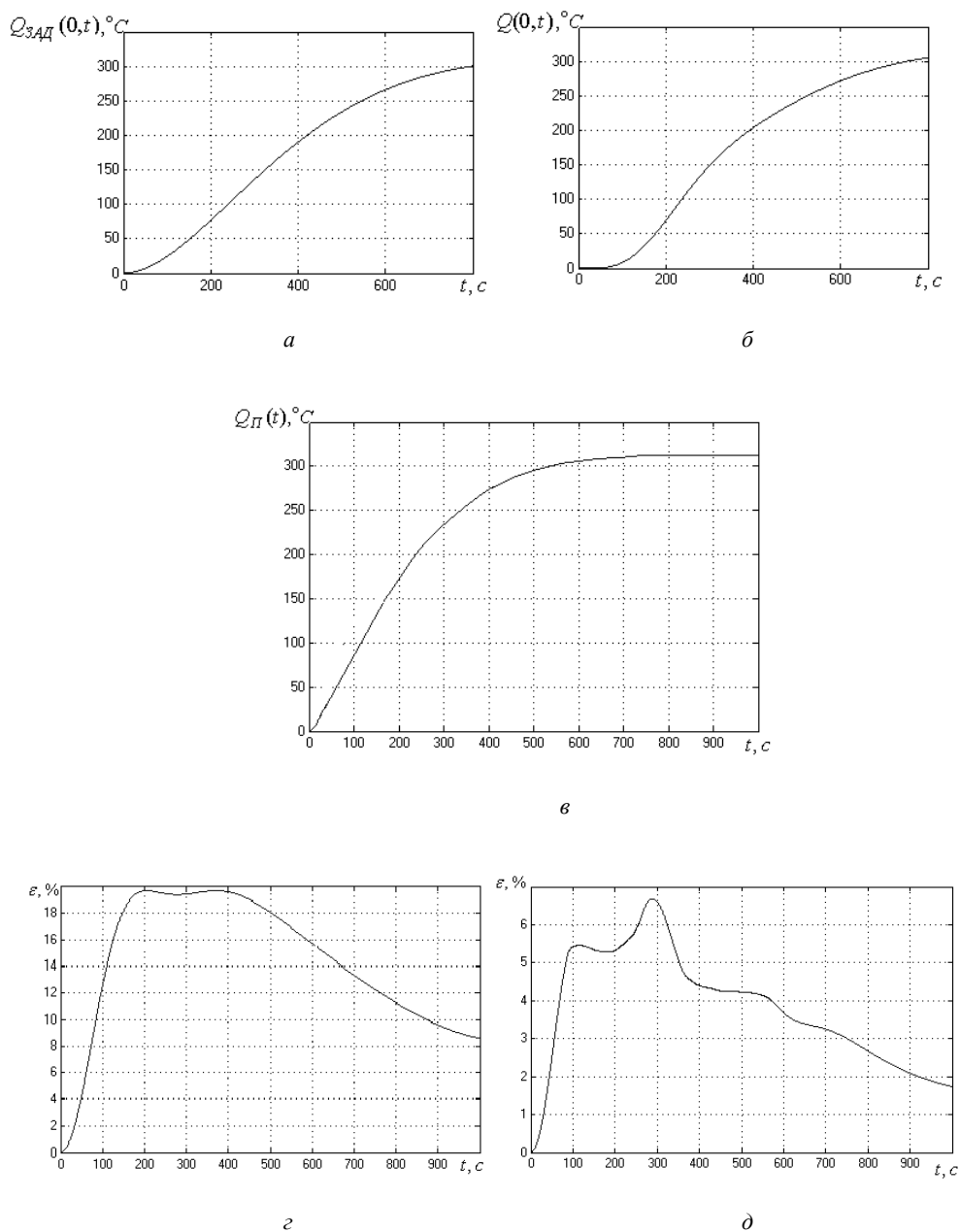


Рис. 5. Переходная характеристика эталонной модели (*a*), синтезированной системы (*б*), найденный закон изменения граничной температуры (*в*), погрешность отработки сигнала эталонной модели при 1 ячейке компенсационной структуры (*г*), при 3 ячейках компенсационной структуры (*д*)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial t^2}, \quad 0 < x < R, \quad t > 0; \\
Q(x,0) &= Q_0(x), \quad 0 \leq x \leq R, \quad t = 0; \\
\frac{\partial Q(0,t)}{\partial t} &= 0, \quad t > 0; \\
\lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial t} + \alpha \cdot Q(R,t) &= \alpha \cdot Q_C(t), \quad t > 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

Решением третьей краевой задачи (13) построена модель объекта [6] для температуры поверхности той же самой заготовки с управлением по температуре печи (рис. 6).

В (13) $a = \text{const}$ – заданный постоянный коэффициент.

Стандартная форма уравнений объекта (13) опять представляется в виде (2), где теперь стандартизирующая функция отличается от (3) и записывается следующим образом [20]:

$$\omega(x,t) = \frac{\alpha}{c\gamma} \delta(\xi - R) \cdot Q_C(t) + Q_0(x) \cdot \delta(t). \tag{14}$$

Передаточная функция объекта опять представляется в форме бесконечного ряда [20]:

$$W_x(x,p) = \frac{\tilde{\zeta}_{x,x}}{\tilde{\zeta}_{c,x}} - \frac{\alpha}{\gamma R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cos(\eta_n)} \cos\left(\frac{x\eta_n}{R}\right) \frac{\frac{R^2}{a\eta_n^2}}{\frac{R^2}{a\eta_n^2} p + 1}. \tag{15}$$

При построении модели, как и в прошлый раз, ограничились пятью слагаемыми. Также учтены характеристики, приведенные в таблице.

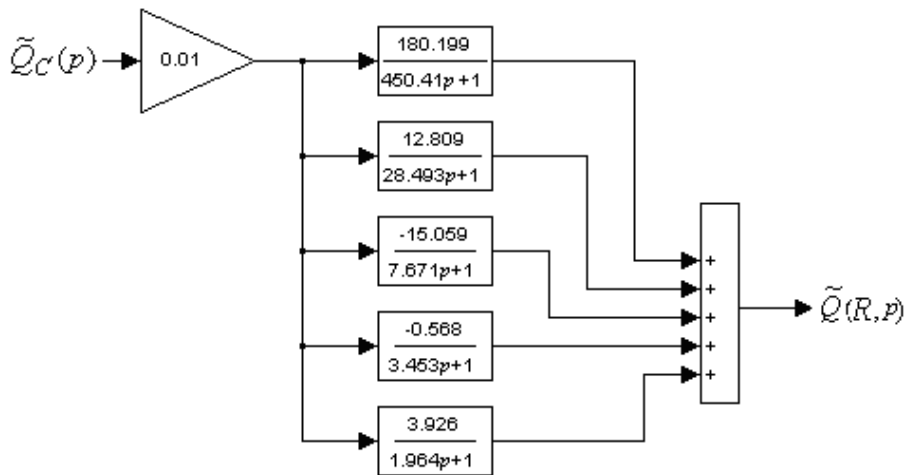


Рис. 6. Модель объекта управления для температуры поверхности пластины при граничных условиях третьего рода

Для синтеза системы управления, адаптивной к параметрическим возмущениям объекта, воспользуемся методами обратной динамики [5–7, 13].

Задача сводится к минимизации квадратичного отклонения значений производных для выходов эталонной модели и объекта управления соответственно.

Для этого предполагается минимизировать функционал (16) по градиентной схеме (17).

$$G(Q_C(t)) = \frac{1}{2} (\dot{y}(t) - \dot{Q}(x_l, t))^2; \quad (16)$$

$$\frac{dQ_C(t)}{dt} = \lambda \frac{dG(Q_C)}{dQ_C}, \quad \lambda = \text{const} \quad (17)$$

Здесь $y(t)$ – сигнал на выходе эталонной модели. За эталонную модель принимается передаточная функция (12).

Из (16) и (17) получаем:

$$Q_C(t) = k(y(t) - Q(x_l, t)), \quad k = \text{const}. \quad (18)$$

На основе уравнения (18) выполним структурный синтез системы управления. Для этого проинтегрируем почленно уравнение эталонной модели (12), выделив ее выход $y(t)$. Подставим его в (18) и выполним замену $y(t) = Q(x_l, t)$, обеспечив обратную связь по управляемой величине.

Указанные действия выполняются непосредственно при построении структуры системы управления (рис. 7).

На рис. 7: $Q(0, p)$ – температура центра пластины; $Q(R, p)$ – температура ее поверхности; $W_{Г\text{УЗ}}(R, p)$ – передаточная функция модели объекта управления в условиях третьей краевой задачи; $Q_C(p)$ – граничное управляющее воздействие по температуре печи; $W_{Г\text{У1}}(0, p)$ – передаточная функция модели объекта управления от температуры поверхности к температуре центра в условиях первой краевой задачи.

Следует обратить внимание, что коэффициенты синтезированной структуры соответствуют коэффициентам эталонной модели и не зависят от параметров самого объекта. Благодаря этому система получает свойство слабой чувствительности к параметрическим возмущениям.

Для проверки работоспособности системы в условиях параметрической неустойчивости объект управления подменяли аналогичным объектом, но с другими параметрами (рис. 8а).

Требуемая переходная характеристика температуры поверхности заготовки и полученная при замене объекта моделью с другими теплофизическими параметрами представлены на рис. 8б и 8в.

Представленные переходные характеристики подтверждают слабую чувствительности синтезированной системы к параметрическим возмущениям объекта управления.

На полученных моделях проверялась способность системы отрабатывать другие виды возмущений. Для примера рассмотрено возмущение по входу объекта (помехи по температуре печи), которое может быть вызвано притоком воздуха разной температуры в печь извне.

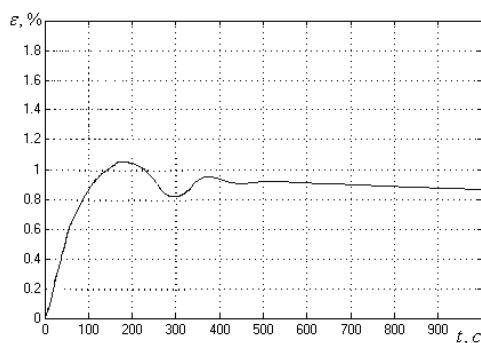
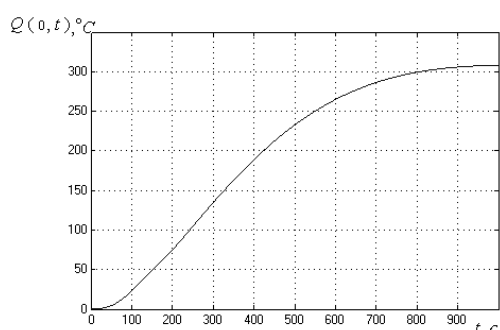
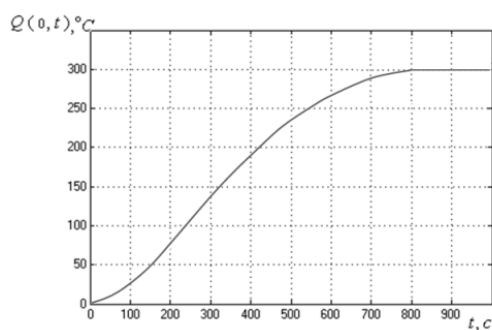
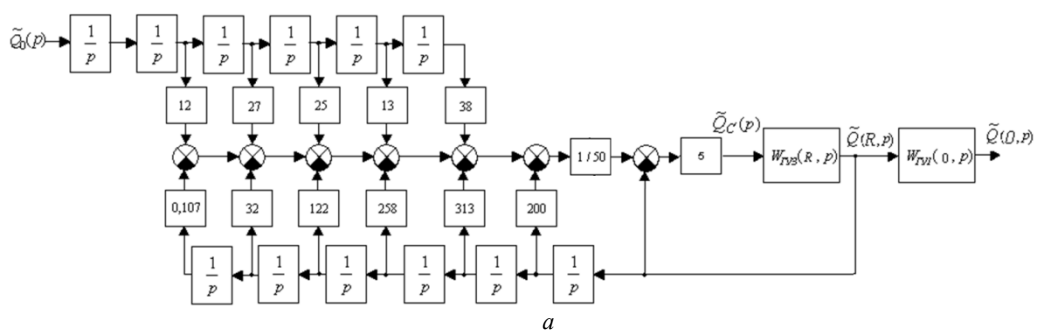


Рис. 7. Структурная схема системы управления по температуре в центре заготовки (*a*), заданная переходная характеристика для температуры в центре пластины (*б*), полученная переходная характеристика (*в*), относительная погрешность синтезированной системы (*г*)

На рис. 9 представлено случайное воздействие на температуру печи и относительное отклонение от эталонной траектории температуры ненаблюдаемой координаты распределенного объекта (нагреваемой заготовки).

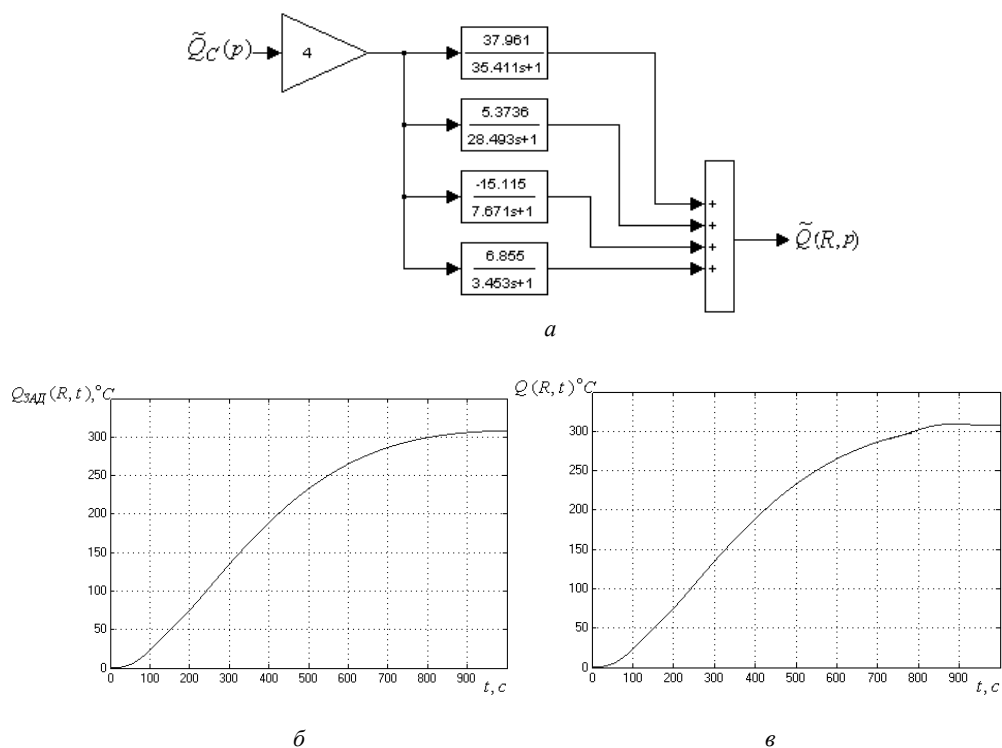


Рис. 8. Параметрические возмущения объекта управления (а), заданная переходная характеристика для температуры на поверхности пластины (б), полученная переходная характеристика при параметрических возмущениях (в)

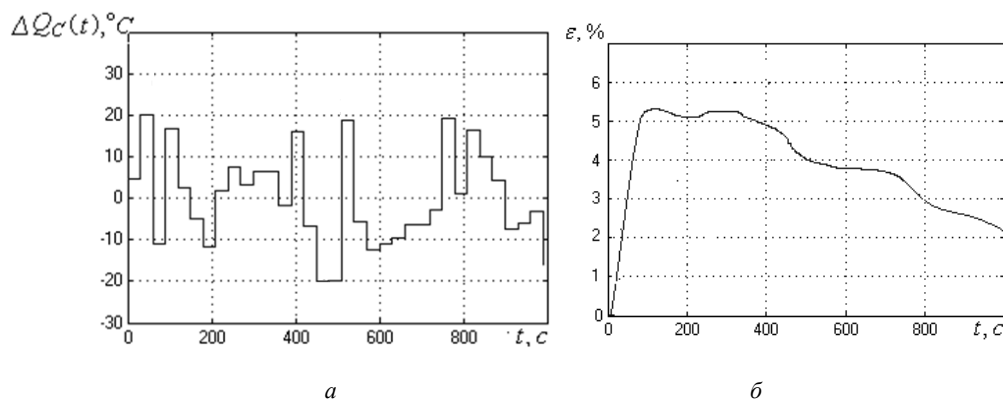


Рис. 9. Случайное воздействие на входе объекта управления (а), относительное отклонение от эталонной траектории (б)

Выводы

В работе выполнен синтез системы управления ненаблюдаемой координатой объекта с распределенными параметрами. Синтезированная система обладает свойством адаптивности к параметрическим возмущениям объекта управления. Рассматривался процесс нагрева массивной неограниченной пластины по толщине. В качестве материала для нагреваемой заготовки использован сплав Д16.

Для модели объекта управления в граничных условиях первого рода с помощью периодических структур получена близкая к обратной передаточная функция и найдено такое поведение граничной температуры, которое обеспечивает требуемый нагрев ненаблюдаемой центральной точки объекта.

Это поведение граничной температуры принято за эталонную модель, на основе которой решена обратная задача динамики для того же объекта, но в граничных условиях третьего рода (управление температурой поверхности с помощью температуры конвекционной печи).

В ходе исследования выявлены также основные ограничения предложенного подхода:

– порядок эталонной модели должен быть не ниже порядка объекта управления;

– инерционность эталонной модели не должна быть ниже инерционности объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нестеров В.Н.* Моделирование инвариантных и квазиинвариантных систем на основе принципа многоканальности // Прикладная физика и математика. – 2020. – № 5. – С. 32–35.
2. *Аполонский В.В., Копылова Л.Г., Тарарыкин С.В.* Разработка и исследование селективно-инвариантных электромеханических систем с адаптацией регуляторов к изменениям уровня скорости // Известия Российской академии наук. Сер. Теория и системы управления. – 2020. – № 5. – С. 28–43.
3. *Хиен Ву Ань, Ягодкина Т.В.* Синтез инвариантной системы адаптивного управления на базе следящей системы // Фундаментальные исследования. – М., 2016. – № 6–1. – С. 52–57.
4. *Харьков В.П.* Адаптивное управление динамической системой на основе обратных задач динамики // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза, 2016. – Т. 1. – С. 176–177.
5. *Бойчук Л.М.* Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. – М.: Энергия, 1971.
6. *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
7. *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
8. *Менский Б.М.* Принцип инвариантности в автоматическом регулировании. – М.: Машиностроение, 1972. – 235 с.
9. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
10. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.
11. *Тихонов А.Н., Гончаровский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.* Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990.
12. *Тихонов А.Н., Кальнер В.Д., Гласко В.Б.* Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990.
13. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
14. *Тычинин А.В.* Методы обратных задач динамики в задачах синтеза систем управления распределенным объектом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2005. – № 39. – С. 21–25.
15. *Тычинин А.В.* Адаптивность в задачах синтеза систем управления распределенным объектом // Современная техника и технологии СТГ2006: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2006. – С. 188–189.
16. *Тычинин А.В.* Синтез систем управления распределенным объектом управления решением обратной задачи динамики // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды V Всероссийской научной конференции с международным участием. – Самара, 2008. – С. 128–130.
17. *Тычинин А.В., Тычинина Ю.А.* Структурно-параметрический синтез системы управления объектом с распределенными параметрами // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 74–79.

18. Тян В.К. Теория периодических структур в некорректных задачах синтеза инвариантных и автономных систем управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2006. – Вып. 41. – С. 47–54.
19. Тян В.К. Структурное представление обратного оператора в банаховом пространстве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2007. – № 1(14). – С. 197–199.
20. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие. – М.: Высш.шк., 2003. – 299 с.
21. Рапопорт Э.Я., Тян В.К. Достижение заданной инвариантности в стохастических системах комбинированного управления // Куйбышевский политехнический институт. Деп. В ВИНТИ 20.06.89, № 4089-B89.
22. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2020 г.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE CONTROL SYSTEM OF THE UNOBSERVED OUTPUT FOR THE OBJECT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

A.A. Tychinin¹, Y.A. Tychinina², D.A. Ragazin²

¹ «TM-service»

157, 6th proseka, Samara, 443029, Russian Federation

² Samara State Technical University

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

Abstract. Method of synthesis of a control system for the object with the distributed parameters, providing compensation of dynamic properties of the object and giving to it of properties of standard model of a set. The system possesses the property of an adaptability to parametrical interference of the object. Control along the unobservable coordinate of the object is implemented by synthesizing a chain structure that implements a transfer function close to the inverse transfer function of the object. Weak sensitivity to parametric instability is provided by solving the inverse problem of dynamics. As an example, the heating of a massive billet in a convection oven is considered.

Keywords: object with distributed parameters, boundary conditions 1 type, boundary conditions 3 type, dynamic compensation, object inverse transfer function, periodic structures, compensation device, parametric instability, parametric noise, inverse problem of dynamics, reference model, unobservable coordinate, convection heating, temperature at the center of the workpiece, change in the thermophysical characteristics of the object.

Aleksandr A. Tychinin (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.

Yulia A. Tychinina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Dmitry A. Ragazin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

REFERENCES

1. *Nesterov V. N.* Modeling of invariant and quasi-invariant systems based on the multichannel principle. Applied Physics and Mathematics. 2020. Vol. 5. Pp. 32–35. (In Russian).
2. *Apolonsky V.V., Kopylova L.G., Titarov S.V.* Development and research of selective-invariant electromechanical systems with adaptation of regulators to change of speed level. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Ser. control theory and systems. 2020. Vol. 5. Pp. 28–43. (In Russian).
3. *Hien Vu Anh, Yagodkina T.V.* Synthesis adaptive modal regulator for invariant system on the basis of tracking system. Fundamental research. 2016. Vol. 6–1. Pp. 52–57. (In Russian).
4. *Kharkov V.P.* Adaptive control of a dynamic system based on inverse problems of dynamics. Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality", Penza, 2016, Vol. 2. Pp. 176–177. (In Russian).
5. *Boychuk L.M.* Method of structural synthesis of nonlinear automatic control systems. M.: Energiya, 1971.
6. *Krutko P.D.* Inverse problems of the dynamics of controlled systems. Linear models. Moscow: Nauka, 1987. 304 p.
7. *Krutko P.D.* Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control. Mashinostroenie, 2004. 576 p.
8. *Mensky B.M.* The principle of invariance in automatic control. M.: Mechanical engineering, 1972, 235 p.
9. *Tikhonov A.N., Samarsky A.A.* Equations of mathematical physics. M.: Nauka, 1966. 724 p.
10. *Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.* Methods for Solving Ill-Posed Problems. M.: Nauka, 1979.
11. *Tikhonov A.N., Goncharovsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G.* Numerical Methods for Solving Ill-Posed Problems. M.: Nauka, 1990.
12. *Tikhonov A.N., Kalner V.D., Glasko V.B.* Mathematical modeling of technological processes and the method of inverse problems in mechanical engineering. M.: Mechanical Engineering, 1990.
13. *Kim D.P.* Automatic control theory. M.: FIZMATLIT, 2004. 464 p.
14. *Tychinin A.V.* Methods of inverse problems of dynamics in problems of synthesis of control systems for a distributed object. - steel. Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. 2005. Vol. 39. Pp. 21–25. (In Russian).
15. *Tychinin A.V.* Adaptability in problems of synthesis of control systems for a distributed object. Modern techniques and technologies CTT'2006 // proceedings of the XII International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists, Tomsk 2006. Pp. 188–189.
16. *Tychinin A.V.* Synthesis of control systems for a distributed control object by solving the inverse problem of dynamics. Proceedings of the fifth All-Russian scientific conference with international participation "Mathematical modeling and boundary value problems". Samara, 2008. Pp. 128–130.
17. *Tychinin A.V., Tychinina Yu.A.* Structural and Parametric Synthesis of a Distributed Parameter Object Control System. Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. 2009. Vol. 1(23). Pp. 74–79. (In Russian).
18. *Tyan V.K.* Theory of periodic structures in ill-posed problems of synthesis of invariant and autonomous control systems. Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. 2006. Vol. 41. Pp. 47–54. (In Russian).
19. *Tyan V.K.* Structural representation of the inverse operator in a Banach space. Vestnik Samgtu. Ser. Technical Sciences. Ser. Physics and mathematics. 2007. Vol. 1(14). Pp. 197–199.
20. *Rapoport E.Ya.* Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters: Textbook. allowance. M.: Vyssh. shk., 2003. 299 p.
21. *Rapoport E.Ya., Tyan V.K.* Achieving a given invariance in stochastic combined control systems. Kuibyshev Polytechnic Institute. Dep. AT VINITI 20.06.89, No. 4089-B89.
22. *Rapoport E.Ya.* Analysis and synthesis of automatic control systems with distributed parameters: Textbook. allowance. M.: Vyssh. shk., 2005. 292 p.

УДК.539.19

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМУЛИРОВКА РЕШЕНИЙ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБЛАСТЯХ С ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ

В.В. Шевелев

МИРЕА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова
Россия, 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4

E-mail: valeshevelev@yandex.ru

Аннотация. С помощью преобразования Фурье получены интегральные представления решений краевых задач теплопроводности и диффузии в двухфазной области с подвижной межфазной границей. Предложенный подход позволяет получить уравнение движения межфазной границы без необходимости предварительного нахождения температурных и(или) концентрационных полей и исследовать устойчивость межфазной границы относительно возмущений ее формы. Справедливость предложенного подхода продемонстрирована на примере автомобильного роста сферического кристалла в переохлажденном расплаве и кристаллизации расплава на подложке из того же вещества. На основе полученного уравнения, определяющего скорость автомобильного движения межфазной границы, проанализированы особенности кинетики кристаллизации расплава на подложке. Кратко обсуждены условия применимости развитого подхода к решению краевых задач теплопроводности и диффузии в областях, разделенных движущейся границей.

Ключевые слова: интегральное представление, решение, фазовое превращение, теплопроводность, межфазная граница.

Введение

Математические модели процессов тепломассопереноса играют важную роль в исследовании и прогнозировании технологических процессов, в которых для получения материалов с требуемыми свойствами используются процессы теплопроводности (термообработка, кристаллизация, плавление) и диффузии (процессы при фазовых превращениях в твердом состоянии в многокомпонентных системах, затвердевание растворов в расплаве, процессы насыщения материала технологически важным компонентом) [1–7].

Это связано с тем, что указанные математические модели позволяют исследовать влияние кинетики процессов тепломассопереноса на формирование структуры получаемого материала в зависимости как от способа внешнего воздействия

Шевелев Валентин Владимирович (д.ф.-м.н., проф.), профессор кафедры «Высшая и прикладная математика» в МИРЕА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова; профессор кафедры «Математика» в МИСиС.

на материал, так и от его спектра времен релаксации в условиях указанного внешнего воздействия.

Одним из важнейших технологических приемов создания материалов с заданными свойствами является формирование структуры материала в результате протекания в нем фазовых превращений. При этом кинетика фазовых превращений является одной из важнейших компонент в технологии получения материалов различного назначения, в том числе используемых в электротехнике, приборостроении и вычислительной технике. Это связано прежде всего с тем, что она, как правило, играет существенную роль в формировании структуры материала, определяющей его различные эксплуатационные свойства.

Структура материалов, формирующаяся в процессе протекания в них фазовых превращений, зависит от конечного распределения в них центров новой фазы по размерам. Это распределение определяется следующими двумя процессами: зарождением центров новой фазы и процессом их последующего роста. Первый из указанных процессов моделируется начально-краевыми задачами для уравнения типа Фоккера – Планка, второй – краевыми задачами для уравнений теплопроводности или/и диффузии в областях с движущимися границами или моделями фазового поля. Второй из указанных процессов играет не менее важную роль в формировании конечной структуры материала, чем процесс зарождения центров новой фазы, ввиду известной проблемы устойчивости межфазной границы раздела фаз, приводящей к формированию дендритной структуры материала. Имеется огромное число работ, посвященных исследованию устойчивости межфазной границы, разработке аналитических и численных методов решения соответствующих краевых задач [8–18].

Одним из эффективных аналитических методов решения краевых задач теплопроводности и диффузии, моделирующих кинетику фазовых превращений, является метод интегрального представления соответствующих процессу температурных и концентрационных полей. Этот метод предпочтителен в том случае, когда основной задачей является определение скорости движения межфазной границы, так как он позволяет получить уравнение движения межфазной границы без необходимости предварительного нахождения температурных и(или) концентрационных полей.

В настоящее время в многочисленных работах, посвященных интегральным представлениям краевых задач для областей с движущимися границами, моделирующих кинетику фазовых превращений, указанные представления получены в основном для случая, когда процессы тепло-и/или массопереноса, обусловленные фазовым превращением, происходят только в одной из областей двухфазной области.

Однако в общем случае процессы тепло- и/или массопереноса, обусловленные фазовым превращением, происходят, как правило, в обеих областях двухфазной области и их необходимо учитывать в математических моделях кинетики фазовых превращений, особенно в тех случаях, когда характерные времена процессов переноса – одного порядка. Насколько нам известно, для случая двухфазных областей решения в интегральной форме получены только в отдельных частных случаях [19, 20].

В данной работе на основе интегрального преобразования Фурье предложена интегральная формулировка решения связанных краевых задач для уравнения теплопроводности для двухфазной области с движущейся межфазной границей, мо-

делирующих процесс кристаллизации однокомпонентного расплава. Аналогичными краевыми задачами моделируются и процессы фазового превращения в растворах (твердых и жидких). Так что излагаемый ниже подход может быть применен и для интегральной формулировки решения связанных краевых задач для уравнения диффузии.

Формулировка модели

Типичная математическая модель роста центра новой фазы из расплава в результате теплоотвода через переохлажденный расплав, когда начальная температура в обеих фазах постоянна, а исходная фаза имеет неограниченный объем, имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta_s(M, t)}{\partial t} = a_s \Delta \Theta_s(M, t), M \in G_s(t), t > 0, \quad (1)$$

$$\Theta_s(M, 0) = 0, M \in G_s(0), \quad (2)$$

$$v_n = k \cdot (\Theta_{eq}(M, t) - \Theta_l(M, t)), M \in S(t), t > 0, \quad (3)$$

$$\Theta_s(M, t) = \Theta_l(M, t) + \Delta \Theta_{ls}, M \in S(t), t > 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Theta_l(M, t)}{\partial t} = a_l \Delta \Theta_l(M, t), M \in G_l(t), t > 0, \quad (5)$$

$$\Theta_l(M, 0) = 0, M \in G_l(0), \quad (6)$$

$$qv_n = \lambda_s \frac{\partial \Theta_s(M, t)}{\partial n} - \lambda_l \frac{\partial \Theta_l(M, t)}{\partial n}, M \in S(t), t > 0, \quad (7)$$

$$|\Theta_s(M, t)| < \infty, \quad (8)$$

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \Theta_l(M, t) = 0. \quad (9)$$

Здесь $\Theta_s(M, t) = T_s(M, t) - T_{si}$, $T_s(M, t)$ – температура в точке $M \in G_s(t)$ области $G_s(t)$, занятой твердой фазой в момент времени t ;

T_{si} – начальная температура твердой фазы;

$\Theta_l(M, t) = T_l(M, t) - T_{li}$, $T_l(M, t)$ – температура в точке $M \in G_l(t)$ области $G_l(t)$, занятой жидкой фазой (расплавом) в момент времени t ;

T_{li} – начальная температура жидкой фазы;

$\Delta \Theta_{ls} = T_{li} - T_{si}$; $\Theta_{eq}(M, t) = T_{eq}(M, t) - T_{li}$, $M \in S(t)$, есть переохлаждение жидкой фазы у межфазной поверхности;

$T_{eq}(M, t)$ – температура равновесия между жидкой и твердой фазами, зависящая в общем случае от кривизны межфазной границы;

a_s, a_l – температуропроводности твердой и жидкой фаз соответственно;
 λ_s, λ_l – теплопроводности твердой и жидкой фаз соответственно;
 v_n – нормальная скорость движения межфазной границы;
 ρ – плотность твердой фазы;
 q – удельная теплота плавления на единицу объема;
 $S(t)$ – поверхность межфазной границы.

Начальное условие (2) сформулировано в предположении, что в начальный момент времени твердая фаза отсутствовала.

Уравнение (3) есть граничное условие, определяющее температуру на межфазной поверхности. В общем случае это кинетическое условие, которое формулируется в зависимости от механизма роста кристалла. В данном случае граничное условие (3) записано в предположении нормального механизма роста кристалла [1, 2], который реализуется при достаточно больших переохлаждениях жидкой фазы. Условие (4) есть условие равенства температур твердой и жидкой фаз на межфазной поверхности.

При заданной скорости роста условий (1)–(6), (8), (9) достаточно для однозначного определения соответствующих температурных полей. Однако если скорость роста не задана, то необходимо задавать дополнительное условие для ее определения. Таким условием является условие теплового баланса на межфазной поверхности, которое в общем виде записывается в виде, аналогичном уравнению (7).

Условие теплового баланса существенно усложняет возможность получения аналитического решения соответствующей краевой задачи, так как необходимо согласованным образом найти и температурное поле, и зависимость $S(t)$, связанные друг с другом. В результате для определения зависимости $S(t)$ необходимо в общем случае решить интегро-дифференциальное уравнение, получающееся после подстановки выражений температурных полей в условие массового баланса [1]. Приближенные аналитические методы решения самосогласованных краевых задач для уравнений теплопроводности и диффузии представлены в [1].

Метод решения

Решение краевых задач (1)–(9) ищем с помощью преобразования Фурье, полагая, что функции $\Theta_s(M, t)$ и $\Theta_l(M, t)$ вне областей определения $G_s(t)$ и $G_l(t)$ в своих краевых задачах соответственно равны нулю, а начало координат находится в области $G_s(t)$. Тогда изображения этих функций определяются следующими формулами:

$$\bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{G_s(t)} \Theta_s(M, t) \exp(i\bar{k}_s \cdot \bar{r}) dV, \quad (10)$$

$$\bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{G_l(t)} \Theta_l(M, t) \exp(i\bar{k}_l \cdot \bar{r}) dV. \quad (11)$$

Преобразуем далее уравнения краевых задач (1)–(9) по формулам (10), (11) преобразования Фурье с учетом формул Грина и того, что

$$\frac{d}{dt} \iiint_{G(t)} f(M, t) dV = \iiint_{G(t)} \frac{\partial}{\partial t} f(M, t) dV + \iiint_{G(t)} \operatorname{div}(\bar{v} f(M, t)) dV \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \iiint_{G(t)} f(M, t) dV = \iiint_{G(t)} \frac{\partial}{\partial t} f(M, t) dV + \iint_{S(t)} v_n f(M, t) dS,$$

где $\bar{v} = d\bar{r}(M, t)/dt, M \in S(t), S(t) = \partial G(t)$ – граница области $G(t)$;
 $\bar{r}(M, t), M \in S(t)$ – радиус-вектор точки M , принадлежащей поверхности $S(t)$;

v_n – нормальная скорость движения $S(t)$ границы области $G(t)$;

n – внешняя нормаль к $S(t)$.

Получим в результате уравнения

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t)}{dt} + a_s \bar{k}_s^2 \bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t) &= \frac{1}{(2\pi)^3} \iint_{S(t)} v_n(M, t) \Theta_s(M, t) \exp(i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_M) dS_M + \\ &+ \frac{a_s}{(2\pi)^3} \iint_{S(t)} \left(\exp(i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_M) \frac{\partial \Theta_s(M, t)}{\partial n_M} - \Theta_s(M, t) \frac{\partial \exp(i\bar{k}_s \cdot \bar{r}_M)}{\partial n_M} \right) dS_M = g_s(t), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t)}{dt} + a_l \bar{k}_l^2 \bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t) &= -\frac{1}{(2\pi)^3} \iint_{S(t)} v_n(M, t) \Theta_l(M, t) \exp(i\bar{k}_l \cdot \bar{r}_M) dS_M - \\ &- \frac{a_l}{(2\pi)^3} \iint_{S(t)} \left(\exp(i\bar{k}_l \cdot \bar{r}_M) \frac{\partial \Theta_l(M, t)}{\partial n_M} - \Theta_l(M, t) \frac{\partial \exp(i\bar{k}_l \cdot \bar{r}_M)}{\partial n_M} \right) dS_M = g_l(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь n_M – внешняя нормаль к $S(t)$ относительно области $G_s(t), M \in S(t)$,
 $\bar{r}_M$ – радиус-вектор точки M .

Начальные условия для этих задач Коши имеют вид, в рамках предположения о постоянстве начальных температур, $\bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, 0) = 0, \bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, 0) = 0$. Тогда решения уравнений (12), (13) можно представить в виде

$$\bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t) = \int_0^t g_s(\eta) \exp(-a_s \bar{k}_s^2 (t - \eta)) d\eta, \quad \bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t) = \int_0^t g_l(\eta) \exp(-a_l \bar{k}_l^2 (t - \eta)) d\eta.$$

Подставляя в эти формулы соответствующие выражения $g_s(t)$ и $g_l(t)$ из формул (12) и (13), и далее $\bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t)$ и $\bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t)$ в формулы обращения преобразования Фурье

$$\Theta_s(P, t) = \int \bar{\Theta}_s(\bar{k}_s, t) \exp(-i\bar{k}_s \bar{r}_P) d\bar{k}_s, \quad \Theta_l(P, t) = \int \bar{\Theta}_l(\bar{k}_l, t) \exp(-i\bar{k}_l \bar{r}_P) d\bar{k}_l,$$

получим следующее интегральное представление решений краевых задач (1)–(9):

$$\begin{aligned}\Theta_s(P, t) &= \\ &= \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^t d\eta \iint_{S(\eta)} \left(a_s \frac{\partial \Theta_s(M, t)}{\partial n_M} + v_n \cdot \Theta_s \right) \int \exp(-a_s \bar{k}_s^2 (t - \eta) - i \bar{k}_s \cdot \Delta \bar{r}) d\bar{k}_s dS_M - \\ &\quad (14)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}& - \frac{a_s}{(2\pi)^3} \int_0^t d\eta \iint_{S(\eta)} \Theta_s(M, \eta) \frac{\partial}{\partial n_M} \int \exp(-a_s \bar{k}_s^2 (t - \eta) - i \bar{k}_s \cdot \Delta \bar{r}) d\bar{k}_s dS_M, M \in S(\eta), \\ & P \in G_s(t),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Theta_l(P, t) &= \\ &= - \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^t d\eta \iint_{S(\eta)} \left(a_l \frac{\partial \Theta_l(M, t)}{\partial n_M} + v_n \cdot \Theta_l \right) \int \exp(-a_l \bar{k}_l^2 (t - \eta) - i \bar{k}_l \cdot \Delta \bar{r}) d\bar{k}_l dS_M + \\ &\quad (15)\end{aligned}$$

$$+ \frac{a_l}{(2\pi)^3} \int_0^t d\eta \iint_{S(\eta)} \Theta_l(M, \eta) \frac{\partial}{\partial n_M} \int \exp(-a_l \bar{k}_l^2 (t - \eta) - i \bar{k}_l \cdot \Delta \bar{r}) d\bar{k}_l dS_M, M \in S(\eta),$$

$$P \in G_l(t),$$

где $d\bar{k} = dk_x dk_y dk_z$, $\Delta \bar{r} = \bar{r}_P - \bar{r}_M = \bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta)$, $\bar{\rho}(M, \eta) \in S(\eta)$ – радиус-вектор точки $M \in S(\eta)$;

$\bar{r}_P$ – радиус-вектор точки P , а интегрирование по $\bar{k} = (k_x, k_y, k_z)$ выполняется по каждой компоненте вектора $\bar{k}$ по промежутку $(-\infty, +\infty)$.

Выполняя далее в (14), (15) стандартное интегрирование по $\bar{k}$ переходом к сферической системе координат в $\bar{k}$ -пространстве, получим

$$\begin{aligned}& \int \exp(-a \bar{k}^2 (t - \eta) - i \bar{k} \cdot \Delta \bar{r}) d\bar{k} = \\ &= \int_0^\infty \exp(-a |\bar{k}|^2 (t - \eta)) |\bar{k}|^2 d|\bar{k}| \int_0^\pi \exp(-i |\bar{k}| |\Delta \bar{r}| \cos \theta) \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi = \\ &= 2\pi \int_0^\infty \exp(-a |\bar{k}|^2 (t - \eta)) |\bar{k}|^2 d|\bar{k}| \int_{-1}^1 \exp(-i |\bar{k}| |\Delta \bar{r}| \eta) d\eta = \\ &= 4\pi \int_0^\infty \exp(-a |\bar{k}|^2 (t - \eta)) |\bar{k}|^2 d|\bar{k}| \int_0^1 \cos(|\bar{k}| |\Delta \bar{r}| \eta) d\eta = \\ &= 4\pi \int_0^\infty \exp(-a |\bar{k}|^2 (t - \eta)) |\bar{k}| \sin(|\bar{k}| |\Delta \bar{r}|) d|\bar{k}| = \frac{\pi \sqrt{\pi}}{\sqrt{a(t - \eta)^3}} \exp\left(-a \frac{|\Delta \bar{r}|^2}{4a(t - \eta)}\right).\end{aligned}$$

С учетом этого результата выражения (14) и (15) преобразуются к виду

$$\begin{aligned}
 \Theta_s(P, t) = & \frac{1}{8\sqrt{(\pi a_s)^3}} \times \\
 & \times \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} \left(a_s \frac{\partial \Theta_s(M, \eta)}{\partial n_M} + v_n \cdot \Theta_s(M, \eta) \right) \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_s(t-\eta)} \right) dS_M - \\
 & - \frac{a_s}{8\sqrt{(\pi a_s)^3}} \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} \Theta_s(M, \eta) \frac{\partial}{\partial n_M} \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_s(t-\eta)} \right) dS_M, \\
 & P \in G_s(t),
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 \Theta_l(P, t) = & \\
 = & -\frac{1}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} \left(a_l \frac{\partial \Theta_l(M, \eta)}{\partial n_M} + v_n \cdot \Theta_l(M, \eta) \right) \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) dS_M + \\
 & + \frac{a_l}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} \Theta_l(M, \eta) \frac{\partial}{\partial n_M} \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) dS_M, \\
 & P \in G_l(t).
 \end{aligned} \tag{17}$$

Формулы (16), (17) являются искомыми интегральными представлениями температурных полей в каждой из фаз двухфазной области. Они особенно удобны для расчета температурных полей, когда заданы температура на межфазной границе и нормальная скорость ее движения. В случае процесса роста центра новой фазы, когда температура на межфазной границе и скорость ее роста не заданы, а подлежат самосогласованному определению из условий равенства температур на межфазной границе (4) и теплового баланса (7), мы приходим к системе двух интегро-дифференциальных уравнений, из которой необходимо найти $\partial \Theta_s(M, t)/\partial n$, $\partial \Theta_l(M, t)/\partial n$ и нормальную скорость движения межфазной границы v_n .

Для аналитического решения таких систем обычно используют либо метод разложения по малому параметру, либо метод линеаризации [3], когда отклонение температурных полей в обеих фазах от известных решений является малым возмущением задачи.

Иллюстрация метода

Однофазная область. В случае однофазной области изложенный подход приводит к следующему выражению для температурного поля:

$$\begin{aligned} \Theta_l(P, t) = & \\ = & \frac{1}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} v_n \left(\frac{q}{C_l \rho_l} - \Theta_l(M, \eta) \right) \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) dS_M + \\ & + \frac{a_l}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \iint_{S(\eta)} \Theta_l(M, \eta) \frac{\partial}{\partial n_M} \exp \left(-\frac{(\bar{r}_P - \bar{\rho}(M, \eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) dS_M, \\ P \in G_l(t), \end{aligned} \quad (18)$$

где C_l – удельная теплоемкость расплава;

ρ_l – плотность расплава.

В частности, в случае роста сферического кристалла в переохлажденном расплаве из формулы (18), полагая $dS_M = \rho^2 \sin \theta d\theta d\varphi$ и интегрируя по φ от 0 до 2π , получим:

$$\begin{aligned} \Theta_l(r, t) = & \frac{2\pi}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \rho^2(\eta) \frac{d\rho(\eta)}{d\eta} \left(\frac{q}{C_l \rho_l} - \Theta_l(\eta) \right) \times \\ & \times \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \int_0^\pi \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\cos\theta}{2a_l(t-\eta)} \right) \sin\theta d\theta + \\ & + \frac{2\pi a_l}{8\sqrt{(\pi a_l)^3}} \int_0^t \frac{\rho^2(\eta) \Theta_l(\eta) d\eta}{\sqrt{(t-\eta)^3}} \int_0^\pi \frac{\partial}{\partial \rho} \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta) - 2r\rho(\eta)\cos\theta}{4a_l(t-\eta)} \right) \sin\theta d\theta. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь θ есть угол между $\bar{r}_P$ и $\bar{\rho}(M, \eta)$; $r = |\bar{r}_P|$, $\rho(\eta) = |\bar{\rho}(\eta)|$, $\Theta_l(t)$ есть значение $\Theta_l(r, t)$ на межфазной границе, то есть $\Theta_l(t) = \Theta_l(M, t)$, $M \in S(t)$. Проинтегрируем далее по θ :

$$\begin{aligned} \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \int_0^\pi \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\cos\theta}{2a_l(t-\eta)} \right) \sin\theta d\theta &= \int_{-1}^1 \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\xi}{2a_l(t-\eta)} \right) d\xi = \\ &= \frac{2a_l(t-\eta)}{r\rho(\eta)} \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \left(\exp \left(\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) - \exp \left(-\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) \right) = \end{aligned}$$

$$= \frac{2a_l(t-\eta)}{r\rho(\eta)} \left(\exp \left(-\frac{(r-\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) - \exp \left(-\frac{(r+\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) \right),$$

$$\begin{aligned} & \int_0^\pi \frac{\partial}{\partial \rho} \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta) - 2r\rho(\eta)\cos\theta}{4a_l(t-\eta)} \right) \sin\theta d\theta = \\ &= \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{1}{2a_l(t-\eta)} \int_0^\pi (r\cos\theta - \rho(\eta)) \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\cos\theta}{2a_l(t-\eta)} \right) \sin\theta d\theta = \\ &= \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{1}{2a_l(t-\eta)} \int_{-1}^1 r\xi \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\xi}{2a_l(t-\eta)} \right) d\xi - \\ & - \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \int_{-1}^1 \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\xi}{2a_l(t-\eta)} \right) d\xi = \\ &= \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{1}{\rho(\eta)} \times \\ & \times \left(\exp \left(\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) + \exp \left(-\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) - \int_{-1}^1 \exp \left(\frac{r\rho(\eta)\xi}{2a_l(t-\eta)} \right) d\xi \right) - \\ & - \exp \left(-\frac{r^2 + \rho^2(\eta)}{4a_l(t-\eta)} \right) \frac{1}{r} \left(\exp \left(\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) - \exp \left(-\frac{r\rho(\eta)}{2a_l(t-\eta)} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{\rho(\eta)} \left(\exp \left(-\frac{(r-\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) + \exp \left(-\frac{(r+\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) \right) - \\ & - \frac{2a_l(t-\eta)}{r\rho^2(\eta)} \left(\exp \left(-\frac{(r-\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) - \exp \left(-\frac{(r+\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) \right) \\ & - \frac{1}{r} \left(\exp \left(-\frac{(r-\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) - \exp \left(-\frac{(r+\rho(\eta))^2}{4a_l(t-\eta)} \right) \right). \end{aligned}$$

Подставив полученные результаты в (19), получим

$$\begin{aligned}
 \Theta_l(r, t) = & \frac{1}{2r\sqrt{\pi a_l}} \times \\
 & \times \int_0^t \rho(\eta) \frac{d\rho(\eta)}{d\eta} \left(\frac{q}{C_l \rho_l} - \Theta_l(\eta) \right) \left(\exp \left(-\frac{(r - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) - \exp \left(-\frac{(r + \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}} + \\
 & + \frac{1}{4r\sqrt{\pi a_l}} \int_0^t \rho(\eta) \Theta_l(\eta) \left((r - \rho(\eta)) \exp \left(-\frac{(r - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) + \right. \\
 & \left. + (r + \rho(\eta)) \exp \left(-\frac{(r + \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \right) \frac{d\eta}{\sqrt{(t - \eta)^3}} - \\
 & - \frac{1}{2r\sqrt{\pi}} \int_0^t \Theta_l(\eta) \left(\exp \left(-\frac{(r - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) - \exp \left(-\frac{(r + \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}}.
 \end{aligned} \tag{20}$$

Выражение (20) для температурного поля является решением следующей краевой задачи, вытекающей из формул (1)–(9) и рассмотренной в [1]:

$$\frac{\partial \Theta_l(r, t)}{\partial t} = a_l \left(\frac{\partial^2 \Theta_l(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Theta_l(r, t)}{\partial r} \right), \rho(t) < r < \infty, t > 0, \tag{21}$$

$$\Theta_l(\rho(t), t) = \Theta_{eq} - \frac{1}{k} \frac{d\rho(t)}{dt}, t > 0, \tag{22}$$

$$q \frac{d\rho(t)}{dt} = -\lambda_l \frac{\partial \Theta_l(\rho(t), t)}{\partial r}, t > 0, \tag{23}$$

$$\Theta_l(r, 0) = 0, r > 0, \tag{24}$$

$$\Theta_l(\infty, t) = 0, t \geq 0. \tag{25}$$

Краевая задача (21)–(25) является математической моделью процесса роста сферического кристалла из переохлажденного расплава [1].

В том случае, когда процесс затвердевания расплава контролируется теплопроводностью, температура на межфазной границе близка температуре кристаллизации, то есть переохлаждение на межфазной границе практически снимается и $\Theta_l(\eta) = \Theta_{eq} = T_{eq} - T_{li} = \text{const}$, где $T_{eq} - T_{li}$ есть исходное переохлаждение расплава, из формулы (19) получается известное автомодельное решение с законом движения межфазной границы $\rho(t) = 2\beta\sqrt{a_l t}$. Для этого необходимо найти

$\partial\Theta_l(\rho(t),t)$ исходя из выражения (20) и полагая затем $\rho(t)=2\beta\sqrt{a_l t}$, далее вычислить достаточно сложные интегралы и подставить результат в уравнение (24). В результате придем к следующему уравнению для параметра β , определяющего кинетику роста сферического кристалла из переохлажденного расплава (выкладки мы не приводим ввиду их громоздкости):

$$2\beta^2\left(1-\beta\sqrt{\pi}e^{\beta^2}\operatorname{erfc}\beta\right)=\frac{\Theta_{eq}C_l}{q\rho_l}. \quad (26)$$

Здесь $\operatorname{erfc}\beta=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{\beta}^{\infty}e^{-x^2}dx$.

Значения левой части уравнения (26) заключены между нулем и единицей [1]. Следовательно, уравнение (26) имеет решение только при условии $0\leq(\Theta_{eq}C_l)/(q\rho_l)<1$, которое, таким образом, является и условием существования автомодельного решения.

Двухфазная область. В качестве другой иллюстрации метода рассмотрим двухфазную одномерную краевую задачу для теплопроводности, моделирующую процесс кристаллизации на подложке из того же вещества, что и расплав, лежащий в основе различных технологий получения материалов с требуемыми свойствами [1]. Математическая модель указанного процесса имеет следующий вид:

$$\frac{\partial\Theta_s(x,t)}{\partial t}=a_s\frac{\partial^2\Theta_s(x,t)}{\partial x^2}, -\infty<x<\rho(t), t>0, \quad (27)$$

$$\Theta_s(x,0)=0, -\infty<x<0, \quad (28)$$

$$\Theta_s(\rho(t),t)=\Theta_{sk}, t>0, \quad (29)$$

$$\Theta_s(-\infty,t)=0, t>0, \quad (30)$$

$$\frac{\partial\Theta_l(x,t)}{\partial t}=a_l\frac{\partial^2\Theta_l(x,t)}{\partial x^2}, \rho(t)<x<\infty, t>0, \quad (31)$$

$$\Theta_l(x,0)=0, 0<x<\infty, \quad (32)$$

$$\Theta_l(\rho(t),t)=\Theta_{lk}, t>0, \quad (33)$$

$$\Theta_l(\infty,t)=0, t>0, \quad (34)$$

$$q\frac{d\rho(t)}{dt}=\lambda_s\frac{\partial\Theta_s(\rho(t),t)}{\partial x}-\lambda_l\frac{\partial\Theta_l(\rho(t),t)}{\partial x}, t>0. \quad (35)$$

Здесь $\Theta_s(x, t) = T_s(x, t) - T_{si}$, $T_s(x, t)$ – температура в твердой фазе в точке x в момент времени t , T_{si} – начальная температура в твердой фазе; $\Theta_l(x, t) = T_l(x, t) - T_{li}$, $T_l(x, t)$ – температура в жидкой фазе в точке x в момент времени t , T_{li} – начальная температура в жидкой фазе; $\Theta_{sk} = T_{eq} - T_{si}$, $\Theta_{lk} = T_{eq} - T_{li}$.

Запишем решения краевых задач исходя из формул (16), (17) и предполагая, что температура на межфазной границе $x = \rho(t)$ не зависит от координат y и z . Тогда, интегрируя в (16), (17) по y и z , получим

$$\begin{aligned} \Theta_s(x, t) = & \\ = & \frac{1}{2\sqrt{\pi a_s}} \int_0^t \left(a_s \frac{\partial \Theta_s(\rho(\eta), \eta)}{\partial x} + \frac{d\rho(\eta)}{d\eta} \Theta_s(\rho(\eta), \eta) \right) \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_s(t - \eta)} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}} - \\ & - \frac{1}{4\sqrt{\pi a_s}} \int_0^t (x - \rho(\eta)) \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_s(t - \eta)} \right) \Theta_s(\rho(\eta), \eta) \frac{d\eta}{\sqrt{(t - \eta)^3}}, \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Theta_l(x, t) = & \\ = & -\frac{1}{2\sqrt{\pi a_l}} \int_0^t \left(a_l \frac{\partial \Theta_l(\rho(\eta), \eta)}{\partial x} + \frac{d\rho(\eta)}{d\eta} \Theta_l(\rho(\eta), \eta) \right) \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}} + \\ & + \frac{1}{4\sqrt{\pi a_l}} \int_0^t (x - \rho(\eta)) \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \Theta_l(\rho(\eta), \eta) \frac{d\eta}{\sqrt{(t - \eta)^3}}. \end{aligned} \quad (37)$$

Рассмотрим автомодельный случай, когда процесс затвердевания контролируется теплопроводностью, а не кинетическими процессами на межфазной границе. В этом случае $\rho(t) = 2\beta\sqrt{t}$, $\Theta_s(\rho(t), t) = \Theta_{sk}$, $\Theta_l(\rho(t), t) = \Theta_{lk}$.

Тогда, так как $\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{\beta}{\sqrt{t}}$, то

$$\frac{\partial \Theta_s(\rho(t), t)}{\partial x} = \frac{\beta_s}{\sqrt{t}} \Theta_{sk}, \quad (38)$$

$$\frac{\partial \Theta_l(\rho(t), t)}{\partial x} = \frac{\beta_l}{\sqrt{t}} \Theta_{lk}. \quad (39)$$

Подставив (38), (39) в уравнение (33), получим

$$q\beta = \lambda_s \beta_s \Theta_{sk} - \lambda_l \beta_l \Theta_{lk}. \quad (40)$$

Уравнение (40) содержит три неизвестных величины β, β_s, β_l . Для того чтобы найти параметр β , определяющий кинетику процесса кристаллизации, необходимо определить величины β_s, β_l . Их мы найдем, удовлетворяя уравнения (38), (39) с помощью полученных решений (36), (37). Однако прежде чем найти $\frac{\partial \Theta_s(\rho(t), t)}{\partial x}, \frac{\partial \Theta_l(\rho(t), t)}{\partial x}$, преобразуем выражения (36), (37) с учетом того, что

$$d \frac{(x - \rho(\eta))}{2a\sqrt{t - \eta}} = \left(\frac{(x - \rho(\eta))}{4a\sqrt{(t - \eta)^3}} - \frac{1}{2a\sqrt{t - \eta}} \frac{d\rho(\eta)}{d\eta} \right) d\eta.$$

Это позволяет объединить второе и третье слагаемые в (36), (37). В результате такого объединения формулы (36), (37) можно привести с учетом того, что $\Theta_s(\rho(t), t) = \Theta_{sk}, \Theta_l(\rho(t), t) = \Theta_{lk}$, к следующему виду:

$$\begin{aligned} \Theta_s(x, t) = & -\frac{1}{2} \Theta_{sk} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_s t}} + \\ & + \frac{a_s}{2\sqrt{\pi a_s}} \int_0^t \frac{\partial \Theta_s(\rho(\eta), \eta)}{\partial x} \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_s(t - \eta)} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}}, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \Theta_l(x, t) = & \frac{1}{2} \Theta_{lk} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_s t}} - \\ & - \frac{a_l}{2\sqrt{\pi a_l}} \int_0^t \frac{\partial \Theta_l(\rho(\eta), \eta)}{\partial x} \exp \left(-\frac{(x - \rho(\eta))^2}{4a_l(t - \eta)} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}}. \end{aligned} \quad (42)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta_s(\rho(t), t)}{\partial x} = & \\ = & \Theta_{sk} \exp \left(-\frac{\beta^2}{a_s} \right) \frac{1}{2\sqrt{\pi a_s t}} + \frac{\beta_s \Theta_{sk}}{2\sqrt{t}} - \\ & - \frac{\beta \beta_s}{2\sqrt{\pi a_s}} \Theta_{sk} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\eta}} \frac{1}{\sqrt{t} + \sqrt{\eta}} \exp \left(-\frac{\beta^2(\sqrt{t} - \sqrt{\eta})}{a_s(\sqrt{t} + \sqrt{\eta})} \right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}} \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Theta_l(\rho(t), t)}{\partial x} = \\
= -\Theta_{lk} \exp\left(-\frac{\beta^2}{a_l}\right) \frac{1}{2\sqrt{\pi a_l t}} + \\
+ \frac{\beta_l \Theta_{lk}}{2\sqrt{t}} + \frac{\beta \beta_l}{2\sqrt{\pi a_l}} \Theta_{lk} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\eta}} \frac{1}{\sqrt{t} + \sqrt{\eta}} \exp\left(-\frac{\beta^2(\sqrt{t} - \sqrt{\eta})}{a_l(\sqrt{t} + \sqrt{\eta})}\right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}}.
\end{aligned} \tag{44}$$

В выражения (43), (44) входят однотипные интегралы, которые также появляются при нахождении автомодельного решения рассмотренного выше однофазного случая. Интегралы такого типа подробно рассмотрены в [1] и не приводятся в известных таблицах определенных интегралов. Поэтому рассмотрим метод их вычисления. Для этого ввиду их однотипности ограничимся рассмотрением интегралов

$$S = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\eta}} \frac{1}{\sqrt{t} + \sqrt{\eta}} \exp\left(-\frac{\gamma^2(\sqrt{t} - \sqrt{\eta})}{(\sqrt{t} + \sqrt{\eta})}\right) \frac{d\eta}{\sqrt{t - \eta}}$$

и для его вычисления вводим переменную интегрирования $\xi = \eta/t$, после чего получим

$$S = \frac{1}{\sqrt{t}} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{\xi}} \frac{1}{1 + \sqrt{\xi}} \exp\left(-\frac{\gamma^2(1 - \sqrt{\xi})}{(1 + \sqrt{\xi})}\right) \frac{d\xi}{\sqrt{1 - \xi}}.$$

Полученный интеграл вычисляется подстановкой $\frac{1 - \sqrt{\xi}}{1 + \sqrt{\xi}} = y^2$.

Тогда, учитывая, что

$$\xi = \left(\frac{1 - y^2}{1 + y^2}\right)^2, 1 - \sqrt{\xi} = \frac{2y^2}{1 + y^2}, d\xi = -8 \frac{y(1 - y^2)}{(1 + y^2)^3} dy, 1 - \xi = \frac{4y^2}{(1 + y^2)^2},$$

получим после соответствующего преобразования подынтегрального выражения

$$S = \frac{1}{\sqrt{t}} \int_0^1 \exp(-\gamma^2 y^2) dy = \frac{1}{\gamma \sqrt{t}} 2\sqrt{\pi} \operatorname{erf} \gamma,$$

где $\operatorname{erf} \gamma = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\gamma e^{-x^2} dx$.

Учтем полученный результат в формулах (43), (44). Получим с учетом (38), (39) соответственно

$$\beta_s = \exp\left(-\frac{\beta^2}{a_s}\right) \frac{1}{2\sqrt{\pi a_s}} + \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_s}{2} \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_s}}, \tag{45}$$

$$\beta_l = -\exp\left(-\frac{\beta^2}{a_l}\right) \frac{1}{2\sqrt{\pi a_l}} + \frac{\beta_l}{2} + \frac{\beta_l}{2} \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_l}}. \quad (46)$$

Из уравнений (45), (46) получим следующие выражения для искомых величин β_s, β_l :

$$\beta_s = \frac{\exp\left(-\frac{\beta^2}{a_s}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi a_s}}}{1 + \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_s}}}, \quad (47)$$

$$\beta_l = -\frac{\exp\left(-\frac{\beta^2}{a_l}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi a_l}}}{1 - \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_l}}}. \quad (48)$$

Подставив выражения (47), (48) в (40), получим искомое уравнение для параметра β , определяющее кинетику процесса кристаллизации:

$$q\beta = \frac{\lambda_s \Theta_{sk} \exp\left(-\frac{\beta^2}{a_s}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi a_s}}}{1 + \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_s}}} + \frac{\lambda_l \Theta_{lk} \exp\left(-\frac{\beta^2}{a_l}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi a_l}}}{1 - \operatorname{erf} \frac{\beta}{\sqrt{a_l}}}. \quad (49)$$

Уравнение (49) позволяет сделать некоторые выводы относительно кинетики кристаллизации расплава на подложке. В частности, из уравнения (49) следует, что при $\Theta_{sk} < 0, \Theta_{lk} < 0$, то есть когда температура кристаллизации (плавления) T_{eq} меньше и начальной температуры подложки T_{si} , и начальной температуры расплава T_{li} , кристаллизация невозможна, а происходит, наоборот, процесс плавления подложки.

При условии же, когда $\Theta_{sk} > 0, \Theta_{lk} > 0$, то есть когда температура кристаллизации T_{eq} выше и начальной температуры подложки T_{si} , и начальной температуры расплава T_{li} , процесс кристаллизации гарантированно имеет место и происходит с тем большей скоростью, чем больше указанные начальные переохлаждения подложки Θ_{sk} и расплава Θ_{lk} . В этом случае теплоотвод от межфазной границы происходит и в подложку, и в переохлажденный расплав.

Рассмотрим случай, когда $\Theta_{sk} < 0, \Theta_{lk} > 0$, то есть когда начальная температура подложки T_{si} больше температуры кристаллизации T_{eq} , а начальная температура расплава T_{li} меньше температуры кристаллизации T_{eq} . Тогда при достаточно малых β уравнение (49) примет вид

$$\beta = \frac{1}{q\sqrt{\pi}} \left(\Theta_{sk} \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} + \Theta_{lk} \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l} \right). \quad (50)$$

Здесь C_s, ρ_s, C_l, ρ_l – соответственно удельная теплоемкость и плотность твердой и жидкой фаз.

Из уравнения (50) следует, что расплав кристаллизуется на подложке при условии $\beta > 0$, то есть при условии

$$|\Theta_{sk}| \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} < \Theta_{lk} \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l}.$$

Это условие означает, что расплав кристаллизуется на подложке в результате теплоотвода через расплав. При условии

$$|\Theta_{sk}| \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} > \Theta_{lk} \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l},$$

наоборот, плавится подложка, а в случае, когда

$$|\Theta_{sk}| \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} = \Theta_{lk} \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l},$$

система расплав – подложка находится в состоянии кинетического равновесия, так как $\beta = 0$.

В противоположном случае, когда $\Theta_{sk} > 0, \Theta_{lk} < 0$, расплав кристаллизуется на подложке в результате теплоотвода через подложку при условии $\beta > 0$, то есть при условии

$$\Theta_{sk} \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} > |\Theta_{lk}| \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l}.$$

При условии

$$\Theta_{sk} \sqrt{\lambda_s C_s \rho_s} < |\Theta_{lk}| \sqrt{\lambda_l C_l \rho_l},$$

наоборот, плавится подложка.

Таким образом, рассмотренные выше примеры показывают, что интегральные представления решений краевых задач теплопроводности и диффузии, моделирующих технологические процессы получения материалов с требуемыми свойствами, позволяют предсказывать кинетику указанных процессов и условия ее реализации без предварительного нахождения температурных и(или) концентрационных полей, что представляет определенные преимущества перед численными методами решения указанных задач.

Выводы

Изложенный подход к интегральной формулировке решений краевых задач теплопроводности или диффузии может быть легко обобщен на случай неоднородного по объему распределения начальной температуры в твердой и жидкой фазах, обусловленного разного рода случайными факторами в технологии производства материалов с помощью затвердевания.

Развитый метод нахождения интегральных представлений решений указанных задач может быть также распространен и на случай, когда исходный объем новой фазы не равен нулю.

Кроме того, метод позволяет также получить интегральные представления решений задач, моделирующих кристаллизацию слитков, то есть кристаллизацию в больших объемах [1, 2], что представляет отдельный технологический интерес.

Предложенный метод проиллюстрирован на примере решения краевых задач для уравнения теплопроводности, однако без существенных изменений он легко переносится на аналогичные краевые задачи для уравнения диффузии.

Развитый в работе метод получения интегральных представлений краевых задач для уравнения теплопроводности и диффузии применим прежде всего в тех случаях, когда на подвижной границе раздела областей переноса заданы значения как искомых функций, так и их нормальных производных, что как раз и имеет место в математических моделях кинетики фазовых превращений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
2. Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.
3. Любов Б.Я., Шевелев В.В. Аналитический расчет кинетики диффузионного растворения сферического выделения иной фазы // Физика металлов и металловедение. – 1973. – Т. 35. – № 2. – С. 330–335.
4. Temkin D.E., Shevelev V.V. Kinetics of nucleation in two-component systems. Journal of Crystal Growth. 1984. Vol. 66. № 2. Pp. 380–400.
5. Иванцов Г.П. О росте сферического и иглообразного кристаллов бинарного сплава // ДАН СССР. – 1952. – Т. 83. – № 4. – С. 573–577.
6. Temkin D.E. Crystallization process. Consultant Bureau, New York, 1966. P. 15.
7. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетическая теория. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
8. Mullins W.W., Sekerka R.F. Morphological stability of a particle growing by diffusion or heat flow. J. Appl. Phys., 1963. Vol. 34. № 1. Pp. 323–329.
9. Mullins W.W., Sekerka R.F. Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy. J. Appl. Phys., 1964. Vol. 35. № 2. Pp. 444–451.
10. Caroli B., Caroli C., Roulet B., Langer J.S. Solvability condition for needle crystals at large undercooling in a nonlocal model of solidification. Phys. Rev. A, 1986. Vol. 33. № 1. Pp. 442–452.
11. Benamar M., Bouissou Ph., Pelce P. An exact solution for the shape of a crystal growing in a forced flow. Journal of Crystal Growth, 1988. Vol. 92. № 1–2. Pp. 97–100.
12. Saville D.A., Beaghton P.J. Growth of needle-shaped crystals in the presence of convection. Phys. Rev. A, 1988. Vol. 37. № 9. Pp. 3423–3430.
13. William R.A., Gill N. Dendritic growth with thermal convection. Journal of Crystal Growth, 1988. Vol. 91. № 4. Pp. 587–598.
14. Jian-Jun Xu. Global neutral stability of dendrite growth and selection condition of tip velocity. Journal of Crystal Growth, 1990. Vol. 100. № 3. Pp. 481–490.
15. Jian-Jun Xu. Interfacial wave theory of dendrite growth: global mode solution and quantum condition. Canadian Journal of Physics, 1990. Vol. 68. № 11. Pp. 58–66.
16. Langer J.S. Dendritic sidebranching in the three-dimensional symmetric model in presence of noise. Phys. Rev. A, 1987. Vol. 36. № 9. Pp. 3350–3358.
17. Jian-Jun Xu. Dendritic growth from a melt in an external flow: uniformly valid asymptotic solution for the steady state. Journal of Fluid Mechanics, 1994. Vol. 263. № 3. Pp. 227–244.
18. Lia J., Tang Y.L., Shenc N., Pana W. Effects of solidification kinetics on phase selection of Ni–Al alloys. Journal of Alloys and Compounds, 2001. Vol. 329. № 1–2. Pp. 157–161.
19. Шевелев В.В., Локишин Дж.Л. О нахождении закона движения межфазной границы в задачах, моделирующих кинетику фазовых превращений // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Сер.: Энергетика. – 2004. – № 3. – С. 44–51.

20. Шевелев В.В. Аналитический расчет времени, лимитируемого диффузией растворения сферической частицы второй фазы // Известия АН СССР. Сер.: Металлы. – 1988. – № 6. – С. 57–60.

Статья поступила в редакцию 20 января 2021 г.

INTEGRAL FORMULATION OF SOLUTIONS OF BOUNDARY-VALUE PROBLEMS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN DOMAINS WITH MOVING BOUNDARIES

V.V. Shevelev

MIREA – Russian technological University, Institute of fine chemical technologies. M.V. Lomonosov
78, pr-ct Vernadsky, Moscow, 119454, Russia

National research technological University "MISIS"
4, Leninsky pr-ct, Moscow, 119049, Russia

E-mail: valeshevelev@yandex.ru

Abstract. *Using the Fourier transform, integral representations of solutions to boundary value problems of heat conduction and diffusion in a two-phase region with a moving interface are obtained. The proposed approach makes it possible to obtain the equation of motion of the interface without the need to first find the temperature and (or) concentration fields. This makes it possible to study the stability of the interface with respect to disturbances in its shape. The validity of the proposed approach is demonstrated by the example of self-similar growth of a spherical crystal in a supercooled melt and crystallization of the melt on a substrate of the same substance. On the basis of the obtained equation, which determines the rate of self-similar motion of the interface, the features of the kinetics of crystallization of the melt on the substrate are analyzed. The conditions of applicability of the developed approach to the solution of boundary value problems of heat conduction and diffusion in regions separated by a moving boundary are briefly discussed.*

Keywords: *integral representation, solution, phase transformation, thermal conductivity, interface.*

REFERENCES

1. Lyubov B.Ya. Teoriya kristallizatsii v bol'shikh ob'yemakh. M.: Nauka, 1975. 256 p. (In Russian).
2. Lyubov B.Ya. Kineticheskaya teoriya fazovykh prevrashcheniy. M.: Metallurgiya, 1969. 264 p. (In Russian).
3. Lyubov B.Ya., Shevelev V.V. Analiticheskiy raschet kinetiki diffuzionnogo rastvoreniya sfericheskogo vydeleniya inoy fazy. Fizika metallov i metallovedeniye. 1973. Vol. 35. № 2. Pp. 330–335. (In Russian).
4. Temkin D.E., Shevelev V.V. Kinetics of nucleation in two-component systems. Journal of Crystal Growth. 1984. Vol. 66. № 2. Pp. 380–400.
5. Ivantsov G.P. O roste sfericheskogo i igloobraznogo kristallov binarnogo splava. DAN SSSR. 1952. Vol. 83. № 4. Pp. 573–577. (In Russian).
6. Temkin D.E. Crystallization process. Consultant Bureau, New York, 1966. P. 15.

Valentin V. Shevelev, Professor.

7. *Kristian Dzh.* Teoriya prevrashcheniy v metallakh i splavakh. ch. 1. Termodinamika i obshchaya kineticheskaya teoriya. M.: Mir, 1978. 806 p. (In Russian).
8. *Mullins W.W., Sekerka R.F.* Morphological stability of a particle growing by diffusion or heat flow. J. Appl. Phys., 1963. Vol. 34. № 1. Pp. 323–329.
9. *Mullins W.W., Sekerka R.F.* Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy. J. Appl. Phys., 1964. Vol. 35. № 2. Pp. 444–451.
10. *Caroli B., Caroli C., Roulet B., Langer J.S.* Solvability condition for needle crystals at large undercooling in a nonlocal model of solidification. Phys. Rev. A, 1986. Vol. 33. № 1. Pp. 442–452.
11. *Benamar M., Bouissou Ph., Pelce P.* An exact solution for the shape of a crystal growing in a forced flow. Journal of Crystal Growth, 1988. Vol. 92. № 1–2. Pp. 97–100.
12. *Saville D.A., Beaghton P.J.* Growth of needle-shaped crystals in the presence of convection. Phys. Rev. A, 1988. Vol. 37. № 9. Pp. 3423–3430.
13. *William R.A., Gill N.* Dendritic growth with thermal convection. Journal of Crystal Growth, 1988. Vol. 91. № 4. Pp. 587–598.
14. *Jian-Jun Xu.* Global neutral stability of dendrite growth and selection condition of tip velocity. Journal of Crystal Growth, 1990. Vol. 100. № 3. Pp. 481–490.
15. *Jian-Jun Xu.* Interfacial wave theory of dendrite growth: global mode solution and quantum condition. Canadian Journal of Physics, 1990. Vol. 68. № 11. Pp. 58–66.
16. *Langer J.S.* Dendritic sidebranching in the three-dimensional symmetric model in presence of noise. Phys. Rev. A, 1987. Vol. 36. № 9. Pp. 3350–3358.
17. *Jian-Jun Xu.* Dendritic growth from a melt in an external flow: uniformly valid asymptotic solution for the steady state. Journal of Fluid Mechanics, 1994. Vol. 263. № 3. Pp. 227–244.
18. *Lia J., Tang Y.L., Shenc N., Pana W.* Effects of solidification kinetics on phase selection of Ni–Al alloys. Journal of Alloys and Compounds, 2001. Vol. 329. № 1–2. Pp. 157–161.
19. *Shevelev V.V., Lokshin Dzh.L.* O nakhozhdanii zakona dvizheniya mezhfaznoy granitsy v zadachakh, modeliruyushchikh kinetiku fazovykh prevrashcheniy. Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob"yedineniy SNG. Seriya «Energetika». 2004. № 3. Pp. 44–51. (In Russian).
20. *Shevelev V.V.* Analiticheskiy raschet vremeni, limitiruyemogo diffuziyei rastvoreniya sfericheskoy chastitsy vtoroy fazy. Izvestiya AN SSSR. Seriya Metally. 1988. № 6. Pp. 57–60. (In Russian).

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 004.772

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Б.Я. Лихтциндер, Ю.О. Бакай

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

E-mail: lixt@psuti.ru

Аннотация. Содержание данной статьи определяется актуальностью использования стандартов беспроводных сенсорных сетей. Рассматривается разнообразие беспроводных сетей. Представляются стандарты персональных беспроводных сетей. В частности, представляется подробный разбор технологии GPRS. Представляются различные протоколы передачи данных. Лаконично обобщаются скорости передачи данных. Представлено развитие стандартов Bluetooth. Описаны скорости передачи данных. Подробно рассмотрены стандарты технологии Bluetooth, представлен обзор преимуществ и недостатков данных стандартов, представлено разнообразие областей применения беспроводных сенсорных сетей.

Ключевые слова: беспроводные технологии, сети, протоколы передачи данных, данные, блютуз, скорости передачи данных, сенсорные сети.

Введение

Существует большой ряд практических задач, в которых требуется контролировать состояние некоторого множества датчиков или простых исполнительных устройств, размещенных на относительно небольших расстояниях и к которым затруднительно или нежелательно подводить проводные линии. Вот некоторые примеры таких задач:

– Система обеспечения безопасности здания или территории. В ней есть датчики регистрации движения разного типа, видеокамеры наблюдения, контролируется появление или уход сотрудника, снабженного радиоэлектронным пропуском.

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

Бакай Юлия Олеговна, студентка бакалавриата.

– Система автоматизации здания: включение дверей, кондиционеров, опрос аварийных датчиков.

– Промышленное управление и мониторинг: сбор данных о процессах, состоянии станков и агрегатов.

– Управление доступом и освещением в зданиях, сбор информации от счетчиков воды и электроэнергии для ЖКХ.

– Индивидуальное медицинское диагностическое оборудование: опрос датчиков, размещенных непосредственно на больных средней степени тяжести, передвигающихся по территории лечебницы или санатория.

Для решения таких задач предназначены беспроводные цифровые сети, работающие по стандарту ZigBee. Это общее название набора протоколов высокого сетевого уровня, использующих небольшие маломощные радиопередатчики, основанные на стандарте IEEE 802.15.4 [1], который описывает беспроводные персональные вычислительные сети. ZigBee нацелена на приложения, которым требуется большее время автономной работы от батарей и высокая степень безопасности при относительно небольших скоростях передачи данных. Основное достоинство технологии ZigBee заключается в том, что она при относительно невысоком энергопотреблении поддерживает не только простые топологии беспроводной связи («точка – точка» и «звезда»), но и сложные беспроводные сети с ячеистой топологией с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений [2].

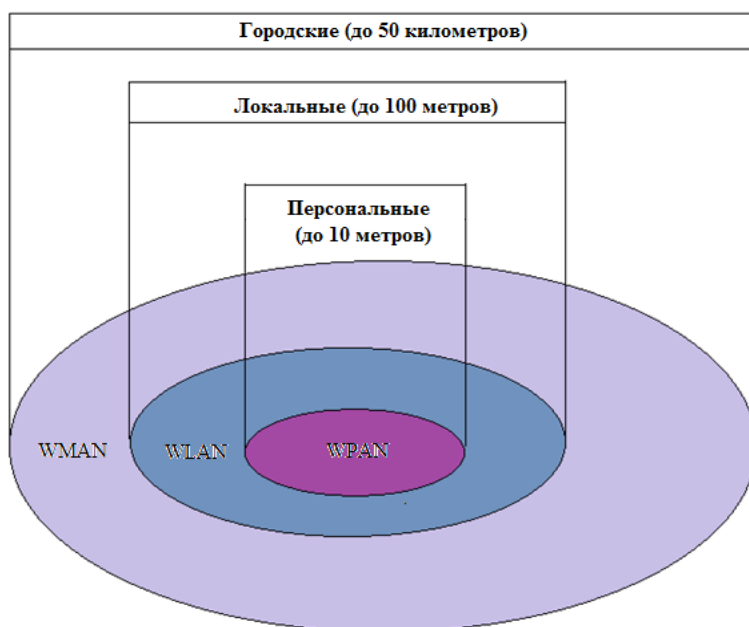
Иными словами, сеть ZigBee – это распределенная, самоорганизующаяся сеть множества датчиков. Однако помимо ZigBee имеется ряд других технологий.

Многообразие беспроводных технологий

Все многообразие современных беспроводных технологий условно можно разбить на несколько типов (см. рисунок) [3]:

1. Для связи оборудования в пределах рабочего места, например сотового телефона и ноутбука (или компьютера, или принтера), предназначены персональные беспроводные сети WPAN (Wireless Personal Area Network). Очевидно, что такие сети обслуживаются самим пользователем или системным (сетевым) администратором без привлечения телекоммуникационного оператора. Среди WPAN-сетей наибольшей популярностью пользуется сеть Bluetooth, позволяющая связать портативные вычислительные или телекоммуникационные устройства (сотовые телефоны, КПК, ноутбуки) с беспроводной периферией и аксессуарами, расположенными в небольшом удалении (до 10 м, а в отдельных случаях – до 100 м) от пользователя.

2. Беспроводные локальные сети WLAN (Wireless Local Area Network), которые, по ассоциации с наиболее популярной беспроводной сетью, также называют Wi-Fi (сокращение Wireless Fidelity) сетями, обеспечивают дальность связи в помещении порядка 50–150 м или на открытом пространстве до 300 м. Предназначены они в основном для развертывания беспроводных сетей в пределах одного или нескольких помещений, хотя возможно их использование и на открытых площадках ограниченных размеров. Также определенной популярностью пользуются так называемые хот-споты – беспроводные сети, развертываемые с целью обеспечения доступа в Интернет или корпоративную сеть в публичных местах (в гостиницах, аэропортах, кафе, ресторанах, выставочных залах и пр.).



Виды беспроводных технологий

3. Характерный радиус действия распределенных беспроводных сетей масштаба города WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) составляет величину порядка 50 км. Такие сети призваны дополнить (а в перспективе и полностью заменить) в качестве «последней мили» инфраструктуру кабельных городских коммуникационных сетей, служащих для высокоскоростного доступа в Интернет и телефонии. К этой категории относятся сети широкополосного доступа WiMAX (семейства стандартов IEEE 802.16) [4].

Стандарты персональных беспроводных сетей

Infrared Data Association (IrDA, ИК-порт, инфракрасный порт) – группа стандартов, описывающая протоколы физического и логического уровня передачи данных с использованием инфракрасного диапазона световых волн в качестве среды передачи. Является разновидностью оптической линии связи ближнего радиуса действия.

Была особо популярна в конце 1990-х – начале 2000-х годов. В данное время практически вытеснена более современными способами связи, такими как Wi-Fi и Bluetooth. Основными причинами отказа от IrDA являются:

- усложнение сборки корпусов устройств, в которых монтировалось ИК-прозрачное окно;
- ограниченная дальность действия и требования прямой видимости пары приемник – передатчик;
- относительно низкая скорость передачи данных первых реализаций стандарта. В последующих ревизиях стандарта этот недостаток исправили: скоростные

возможности немного превышают, например, возможности самой распространенной на сегодняшний момент версии протокола Bluetooth. Однако широкого распространения скоростные варианты IrDA получить уже не успели.

В повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с ИК-портами.

Дистанционный пульт управления передает команды на телевизор или видеомagneтофон с помощью IrDA. До недавнего времени ИК-портами оснащались большая часть мобильных телефонов, ноутбуков и карманных компьютеров. ИК-портами оснащаются некоторые принтеры и цифровые фотоаппараты. Большинство настольных ПК, напротив, не имеет инфракрасного порта в стандартной системной конфигурации, и для них необходим ИК-адаптер, который подключается к компьютеру через USB, COM-порт или в специальный разъем на материнской плате.

Через ИК-порт с помощью протокола высокого уровня IrOBEX можно, например, передать цифровую визитную карточку, мелодию, картинку или файл на другой мобильник или компьютер, на котором также имеется ИК-порт. Этот же протокол позволяет организовать синхронизацию данных. Обеспечивает возможность обмена произвольными объектами данных: контактами, событиями календаря и даже исполняемыми приложениями.

IrCOMM (Infrared Communications Protocol) – протокол позволяет использовать ИК-соединение в качестве последовательного или параллельного порта (COM). Протокол IrCOMM позволяет использовать мобильный телефон как беспроводной модем.

IrLAN (Infrared Local Area Network) – протокол, позволяющий подключиться к LAN-сети через IrDA-соединение одним из трех способов: как точка доступа, одноранговая связь peer-to-peer или в качестве хоста. Протокол IrLAN позволяет подключить и связать устройства в локальную сеть наподобие Ethernet.

Ввиду того, что пульты дистанционного управления используют этот же протокол, КПК со встроенным ИК-портом можно использовать как пульт для управления. Для этого, как правило, необходимо установить соответствующее ПО.

IrPHY (Infrared Physical Layer Specification) представляет обязательный протокол самого низкого уровня среди спецификаций IrDA. Соответствует физическому уровню сетевой модели OSI.

Основные характеристики спецификации IrPHY выглядят следующим образом:

- дальность: не менее 1 м;
- минимальное поддерживаемое отклонение от оси приемника/передатчика: не менее 15°;
- скорость передачи данных: от 2,4 кбит/с до 16 Мбит/с (100-мегабитная версия находится в разработке);
- модуляция: немодулированный сигнал, без несущей;
- волновой диапазон: от 850 до 880 нанометров;
- режим передачи данных: полудуплексный.

Интересно, что спецификация не определяет максимальных допустимых значений для таких параметров, как дальность или отклонение от оси, тем не менее типичное расположение устройств для организации соединения подразумевает расстояние от 5 до 50 см на одной оси. Устройства с односторонней связью (например, пульт ДУ и телевизор), как правило, поддерживают дальность не менее 10 м.

Использование полудуплексного режима мотивируется тем, что при попытке одновременного приема и передачи данных излучение собственного передатчика

будет сильно мешать приему сигнала от передатчика удаленного, что делает реализацию полнодуплексного режима очень сложной и нецелесообразной.

IrLAP (Infrared Link Access Protocol) – обязательный протокол второго уровня, располагается поверх IrPHY, соответствует канальному уровню сетевой модели OSI.

IrLAP отвечает за следующие функции:

- контроль доступа;
- поиск расположенных вблизи устройств;
- установление и поддержка двунаправленного соединения;
- распределение первичной и вторичной ролей среди устройств.

IrLAP делит все сообщающиеся устройства на одно первичное и остальные (одно и более) вторичные. Первичное устройство контролирует все вторичные и может передавать им данные без «разрешения». Вторичное устройство может отправлять данные только по запросу с первичного.

IrLMP (Infrared Link Management Protocol) – обязательный протокол третьего уровня. Соответствует сетевому уровню сетевой модели OSI. Состоит из двух подуровней – LM-MUX (Link Management Multiplexer) и LM-IAS (Link Management Information Access Service).

LM-MUX отвечает за следующие функции:

- разделение потока данных на различные каналы связи;
- смена первичных/вторичных устройств.

LM-IAS отвечает за следующие функции:

- публикация списка доступных сервисов;
- доступ клиентских устройств к опубликованным сервисам.

Tiny TP (Tiny Transport Protocol) – протокол, основанный на базе IrLMP. Позволяет передавать большие массивы данных и управлять потоком данных, расставляя приоритеты каждому логическому каналу.

IrOBEX (Infrared Object Exchange) – протокол, упомянутый выше основанный на базе Tiny TP.

IrFM (Infrared Financial Messaging) – протокол, позволяющий проводить денежные транзакции между двумя устройствами. Находится в стадии разработки [5].

Скорости передачи данных

Скорости передачи данных делятся на несколько поддиапазонов – SIR, MIR, FIR, VFIR, UFIR, каждый из которых характеризуется не только разными скоростями, но и использованием различных кодовых схем. Что, собственно, и делает возможной более быструю передачу данных.

SIR (Serial Infrared) использует те же скорости передачи данных, что и в спецификации последовательного соединения RS232 (COM-порт), а именно 9.6 Кбит/с, 19.2 Кбит/с, 38.4 Кбит/с, 57.6 Кбит/с, 115.2 Кбит/с. Совпадение поддерживаемых скоростей не случайно и позволяет довольно легко реализовать COM IrDA адаптеры.

Как правило, наименьшая доступная скорость для устройств составляет именно 9600 бит/с, и именно она используется для передачи сигналов поиска, оповещения и сопряжения.

MIR (Medium Infrared) поддерживает скорости передачи данных 0.576 Мбит/с и 1.152 Мбит/с. Хотя MIR и не является официальным термином IrDA, однако то,

что схема кодирования, используемая для этих скоростей, отлична как от SIR, так и от FIR, делает этот термин довольно удобным и распространенным.

FIR (Fast Infrared) – устаревший термин спецификации IrDA, ранее использовавшийся для обозначения устройств, поддерживающих скорость передачи данных от 9600 бит/с до 4 Мбит/с, что включает в себя и SIR, и MIR. В наше время, как правило, термин FIR используется для обозначения собственно скорости 4 Мбит/с. Некоторые источники используют термин FIR для обозначения всех скоростей, превышающих SIR.

VFIR (Very Fast Infrared) – термин, использующийся для обозначения поддержки скоростей передачи вплоть до 16 Мбит/с.

Хотя детали спецификации все еще находятся в состоянии разработки, на данный момент 16 Мбит/с – это самая высокая скорость передачи данных по IrDA, поддерживаемая серийными устройствами. Например, инфракрасный передатчик TFDU8108 поддерживает все скорости передачи данных от 9.6 Кбит/с до 16 Мбит/с.

UFIR (Ultra Fast Infrared) находится в состоянии разработки, ожидается, что будет поддерживать скорости вплоть до 100 Мбит/с.

GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) [6] – надстройка над технологией мобильной связи GSM, осуществляющая пакетную передачу данных. GPRS позволяет пользователю сети сотовой связи производить обмен данными с другими устройствами в сети GSM и с внешними сетями, в том числе Интернет. GPRS предполагает тарификацию по объему переданной/полученной информации, а не по времени, проведенному онлайн.

При использовании GPRS информация собирается в пакеты и передается через неиспользуемые в данный момент голосовые каналы. Такая технология предполагает более эффективное использование ресурсов сети GSM. При этом что именно является приоритетом передачи – голосовой трафик или передача данных, выбирается оператором связи. Федеральная тройка в России использует безусловный приоритет голосового трафика перед данными, поэтому скорость передачи зависит не только от возможностей оборудования, но и от загрузки сети. Возможность использования сразу нескольких каналов обеспечивает достаточно высокие скорости передачи данных, теоретический максимум при всех занятых таймслотах TDMA составляет 171,2 Кбит/с. Существуют различные классы GPRS, различающиеся скоростью передачи данных и возможностью совмещения передачи данных с одновременным голосовым вызовом.

Передача данных разделяется по направлениям «вниз» (downlink; DL) – от сети к абоненту и «вверх» (uplink, UL) – от абонента к сети. Мобильные терминалы разделяются на классы по количеству одновременно используемых таймслотов для передачи и приема данных. Современные телефоны поддерживают до 4 таймслотов одновременно для приема по линии «вниз» (то есть могут принимать 85 Кбит/с по кодовой схеме CS-4) и до 2 для передачи по линии «вверх» (class 10 или 4+2 всего 5). Новейшие телефоны поддерживают class 12 (или 4+4, всего 5).

Абоненту, подключенному к GPRS, предоставляется виртуальный канал, который на время передачи пакета становится реальным, а в остальное время используется для передачи пакетов других пользователей. Поскольку один канал могут использовать несколько абонентов, возможно возникновение очереди на передачу

пакетов и, как следствие, задержка связи. Например, современная версия программного обеспечения контроллеров базовых станций допускает одновременное использование одного таймслота шестнадцатью абонентами в разное время и до 5 (из 8) таймслотов на частоте, итого – до 80 абонентов, пользующихся GPRS на одном канале связи (средняя максимальная скорость при этом $21,4 \cdot 5 / 80 = 1,3$ Кбит/с на абонента). Другой крайний случай – пакетирование таймслотов в один непрерывный с вытеснением голосовых абонентов на другие частоты (при наличии таковых и с учетом приоритета). При этом телефон, работающий в режиме GPRS, принимает все пакеты на одной частоте и не тратит времени на переключения. В этом случае скорость передачи данных достигает максимально возможной, как и описано выше, 4+2 таймслота (class 10) или 4+4 (class 12).

Технология GPRS использует GMSK-модуляцию. В зависимости от качества радиосигнала данные, пересылаемые по радиоэффиру, кодируются по одной из 4 кодовых схем (CS1–CS4). Каждая кодовая схема характеризуется избыточностью кодирования и помехоустойчивостью и выбирается автоматически в зависимости от качества радиосигнала. По той же схеме и используя то же самое оборудование работает и технология EDGE. Но внутри таймслота EDGE используется другая, более плотная упаковка информации (модуляция 8PSK).

Стандарты Bluetooth

Стандарт Bluetooth (назван в честь короля викингов Харальда Синезубого, поэтому его часто называют просто «синий зуб») сегодня является одним из самых известных и распространенных. Его первая спецификация была выпущена в 1998 году компанией Ericsson (в разработке принимали участие также IBM, Intel, Nokia и Toshiba) для обмена данными без проводов между двумя и более устройствами. Поскольку эта компания занималась производством мобильных телефонов, то именно для них новая технология и предназначалась – как тривиальная замена интерфейсного кабеля. Именно поэтому от Bluetooth не требовалось ни большого радиуса действия, ни высокой скорости передачи данных, да и в какой-то особой функциональности нужды не было. Зато требовались простота подключения и максимально низкое энергопотребление.

Однако к настоящему времени область применения «синего зуба» существенно расширилась – он превратился в универсальный беспроводной интерфейс для персональных сетей, в которые могут входить практически любые устройства. Так, помимо сотовых телефонов и различных дополнений к ним (беспроводные гарнитуры и пр.), Bluetooth широко используется для передачи данных в КПК и ноутбуках, в беспроводных компьютерных мышках и клавиатурах. Многие принтеры (и не только мобильные) и МФУ используют этот интерфейс для «избавления» от проводов. Кроме того, он стал фактическим стандартом передачи данных между GPS-навигаторами и устройствами отображения (КПК или ноутбуками).

Радиосвязь Bluetooth осуществляется в стандартном ISM-диапазоне (2,4–2,48 ГГц). Спектр сигнала формируется по методу частотных скачков FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – несущая частота сигнала скачкообразно меняется 1600 раз в секунду (всего предусмотрено 79 рабочих частот) по псевдослучайному закону. Таким образом, если в одном и том же месте работают несколько устройств Bluetooth, то они не мешают друг другу. Передача цифровых данных происходит со скоростью 723,2 Кбит/с [7].

По «дальнобойности» все устройства Bluetooth подразделяются на три класса (дальность очень зависит от преград и помех):

- Class 1 – передатчик мощностью до 100 мВт обеспечивает радиус действия до 100 м;
- Class 2 – передатчик мощностью до 2,5 мВт обеспечивает радиус действия до 10 м;
- Class 3 – передатчик мощностью до 1 мВт обеспечивает радиус действия до 1 м.

Естественно, что сегодня больше всего распространены устройства 1-го и 2-го классов как обеспечивающие более или менее приемлемый радиус устойчивой работы.

На сегодня известны следующие стандарты Bluetooth:

Bluetooth 1.0. Устройства версий 1.0 (1998) и 1.0B имели плохую совместимость между продуктами различных производителей. В 1.0 и 1.0B была обязательной передача адреса устройства (BD_ADDR) на этапе установления связи, что делало невозможной реализацию анонимности соединения на протокольном уровне и было основным недостатком данной спецификации.

Bluetooth 1.1. В Bluetooth 1.1 было исправлено множество ошибок, найденных в 1.0B, добавлена поддержка для нешифрованных каналов, индикация уровня мощности принимаемого сигнала (RSSI).

Bluetooth 1.2. В версии 1.2 была добавлена технология адаптивной перестройки рабочей частоты (AFH), что улучшило сопротивляемость к электромагнитной интерференции (помехам) путем использования разнесенных частот в последовательности перестройки. Также увеличилась скорость передачи и добавилась технология eSCO, которая улучшала качество передачи голоса путем повторения поврежденных пакетов. В HCI добавилась поддержка трех-проводного интерфейса UART.

Главные улучшения включают следующее:

- быстрое подключение и обнаружение;
- адаптивная перестройка частоты с расширенным спектром (AFH), которая повышает стойкость к радиопомехам;
- более высокие, чем в 1.1, скорости передачи данных, практически до 721 Кбит/с;
- расширенные синхронные подключения (eSCO), которые улучшают качество передачи голоса в аудиопотоке, позволяя повторную передачу поврежденных пакетов, и при необходимости могут увеличить задержку аудио, чтобы оказать лучшую поддержку для параллельной передачи данных;
- в Host Controller Interface (HCI) добавлена поддержка трехпроводного интерфейса UART;
- утвержден как стандарт IEEE Standard 802.15.1-2005 [8];
- введены режимы управления потоком данных (Flow Control) и повторной передачи (Retransmission Modes) для L2CAP.

Bluetooth 2.0 + EDR. Bluetooth версии 2.0 был выпущен 10 ноября 2004 г. Имеет обратную совместимость с предыдущими версиями 1.x. Основным нововведением стала поддержка Enhanced Data Rate (EDR) для ускорения передачи данных. Номинальная скорость EDR – около 3 Мбит/с, однако на практике это позволило повысить скорость передачи данных только до 2,1 Мбит/с. Дополнительная производительность достигается с помощью различных радиотехнологий для передачи данных.

Стандартная (базовая) скорость передачи данных использует GFSK-модуляцию радиосигнала при скорости передачи в 1 Мбит/с. EDR использует сочетание

модуляций GFSK и PSK с двумя вариантами: $\pi/4$ -DQPSK и 8DPSK. Они имеют большие скорости передачи данных по воздуху – 2 и 3 Мбит/с соответственно.

Bluetooth SIG издала спецификацию как «Технология Bluetooth 2.0 + EDR», которая подразумевает, что EDR является дополнительной функцией. Кроме EDR есть и другие незначительные усовершенствования к 2.0 спецификации, и продукты могут соответствовать «Технологии Bluetooth 2.0», не поддерживая более высокую скорость передачи данных. По крайней мере, одно коммерческое устройство, HTC TyTN Pocket PC, использует «Bluetooth 2.0 без EDR» в своих технических спецификациях.

Согласно 2.0 + EDR спецификации, EDR обеспечивает следующие преимущества:

- увеличение скорости передачи в 3 раза (2,1 Мбит/с) в некоторых случаях;
- уменьшение сложности нескольких одновременных подключений из-за дополнительной полосы пропускания;
- более низкое потребление энергии благодаря уменьшению нагрузки.

Bluetooth 2.1. В 2007 году были добавлены технология расширенного запроса характеристик устройства (для дополнительной фильтрации списка при сопряжении), энергосберегающая технология Sniff Subrating, которая позволяет увеличить продолжительность работы устройства от одного заряда аккумулятора в 3–10 раз. Кроме того, обновленная спецификация существенно упрощает и ускоряет установление связи между двумя устройствами, позволяет производить обновление ключа шифрования без разрыва соединения, а также делает указанные соединения более защищенными благодаря использованию технологии Near Field Communication.

Bluetooth 2.1 + EDR. В августе 2008 года Bluetooth SIG представил версию 2.1+EDR. Новая редакция Bluetooth снижает потребление энергии в 5 раз, повышает уровень защиты данных и облегчает распознавание и соединение Bluetooth-устройств благодаря уменьшению количества шагов, за которые оно выполняется.

Bluetooth 3.0 + HS. 3.0+HS была принята Bluetooth SIG 21 апреля 2009 года. Она поддерживает теоретическую скорость передачи данных до 24 Мбит/с. Ее основной особенностью является добавление AMP (асимметричная мультипроцессорная обработка) (альтернативно MAC/PHY), дополнение к 802.11 как высокоскоростное сообщение. Две технологии были предусмотрены для AMP: 802.11 и UWB, но UWB отсутствует в спецификации.

Модули с поддержкой новой спецификации соединяют в себе две радиосистемы: первая обеспечивает передачу данных в 3 Мбит/с (стандартная для Bluetooth 2.0) и имеет низкое энергопотребление; вторая совместима со стандартом 802.11 и обеспечивает возможность передачи данных со скоростью до 24 Мбит/с (сравнима со скоростью сетей Wi-Fi). Выбор радиосистемы для передачи данных зависит от размера передаваемого файла. Небольшие файлы передаются по медленному каналу, а большие – по высокоскоростному. Bluetooth 3.0 использует более общий стандарт 802.11 (без суффикса), то есть несовместим с такими спецификациями Wi-Fi, как 802.11b/g или 802.11n.

Bluetooth 4.0. Bluetooth SIG утвердил спецификацию Bluetooth 4.0 30 июня 2010 г. Bluetooth 4.0 включает в себя протоколы: классический Bluetooth, высокоскоростной Bluetooth и Bluetooth с низким энергопотреблением. Высокоскоростной Bluetooth основан на Wi-Fi, а классический Bluetooth состоит из протоколов предыдущих спецификаций Bluetooth.

Протокол Bluetooth с низким энергопотреблением предназначен прежде всего для миниатюрных электронных датчиков (использующихся в спортивной обуви, тренажерах, миниатюрных сенсорах, размещаемых на теле пациентов, и т. д.). Низкое энергопотребление достигается за счет использования специального алгоритма работы. Передатчик включается только на время отправки данных, что обеспечивает возможность работы от одной батарейки типа CR2032 в течение нескольких лет. Стандарт предоставляет скорость передачи данных в 1 Мбит/с при размере пакета данных 8–27 байт. В новой версии два Bluetooth-устройства смогут устанавливать соединение менее чем за 5 миллисекунд и поддерживать его на расстоянии до 100 м. Для этого используется усовершенствованная коррекция ошибок, а необходимый уровень безопасности обеспечивает 128-битное AES-шифрование.

Сенсоры температуры, давления, влажности, скорости передвижения и т. д. на базе этого стандарта могут передавать информацию на различные устройства контроля: мобильные телефоны, КПК, ПК и т. п.

Первый чип с поддержкой Bluetooth 3.0 и Bluetooth 4.0 был выпущен компанией ST-Ericsson в конце 2009 года.

Bluetooth 4.0 поддерживается в MacBook Air и Mac mini (с июля 2011 года), iMac (ноябрь 2012 года), iPhone 4S (октябрь 2011 года) и iPhone 5 (сентябрь 2012 года), iPad 3 (март 2012 года) и iPad mini (с ноября 2012 года), смартфонах LG Optimus 4X HD (февраль 2012 года), Google Nexus 4, HTC One X, S, V и Samsung Galaxy S III (май 2012 года), Explay Infinity (август 2012 года), HTC One X+ (2012), HTC Desire C, HTC Desire V, Google Nexus 7 (2012), Sony VAIO SVE1511N1RSI, Nokia Lumia 920 (18 сентября 2012 г.).

Bluetooth 5.0. 16 июня 2016 года Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила спецификацию Bluetooth 5.0. Изменения коснулись в основном режима с низким потреблением и высокоскоростного режима. Радиус действия увеличен в 4 раза, скорость увеличена в 2 раза. Максимальный диапазон работы – до 200 м на открытом пространстве и до 40 м в помещении. Bluetooth 5.0 увеличивает пропускную способность до 2 Мбит/с.

Bluetooth 5.1. 29 января 2019 года Bluetooth Special Interest Group (SIG) представила спецификацию Bluetooth 5.1. Система позиционирования теперь может определять направление, с которого поступает сигнал Bluetooth. Учитывая расстояние и направление, устройства Bluetooth теперь смогут определить точное местоположение устройства вплоть до сантиметра. Bluetooth 5.1 предлагает два разных метода определения направления: «Угол прибытия» (AoA) и «Угол вылета» (AoD). Одно из двух устройств должно иметь массив из нескольких антенн, и данные, полученные от этих антенн, могут использоваться для определения направления, с которого поступает сигнал Bluetooth. Одной из новых функций является «рандомизация индексации вещательных каналов». Bluetooth 5.0 требовал, чтобы устройства проходили по каналам 37, 38 и 39 в строгом порядке. Теперь устройства могут выбирать каналы в произвольном порядке. Это уменьшает вероятность того, что два устройства Bluetooth будут мешать друг другу и «разговаривать» друг с другом по одним и тем же каналам при объявлении о готовности к подключению, и это будет полезно в местах с большим количеством устройств Bluetooth [9].

Bluetooth Low Energy Mesh (BLE Mesh). 18 июля 2017 представили технологию Bluetooth Low Energy Mesh. Технология предназначена для обеспечения связи между главным контроллером и сенсорными устройствами. Распределенная сеть

BLE Mesh использует метод управляемого потока для передачи сообщений на подключенные устройства, которые называются узлами. Этот метод предусматривает отправку сообщений широковещательной рассылкой BLE тем узлам, которые находятся в пределах досягаемости. Принимающие узлы ретранслируют или перенаправляют это сообщение другим узлам в пределах своего диапазона. Как только соответствующий узел получает сообщение, инициируется заранее определенное событие [10].

Заключение

В данной работе проведен анализ различных технологий беспроводной передачи данных. Изложены принципы работы основных протоколов беспроводных сетей. Выявлены недостатки и возможности развития той или иной технологии беспроводных сетей. В частности, проведен подробный обзор стандартов технологии Bluetooth, представлены последовательные этапы перехода и развития данных стандартов. На основе изложенных фактов можно сделать вывод, что технологии беспроводных сенсорных сетей имеют потенциал развития и расширения области применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEEE 802.15.4-2020. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата обращения: 18.12.2020).
2. *Варгаузин В.А.* Сетевая технология ZigBee // ТелеМультиМедиа. – 2005. – № 6. – С. 29–32.
3. ITU-T Y.4104/F.744: Service description and requirements for ubiquitous sensor network middleware. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.744-200912-I!!PDF-E&type=items (дата обращения: 18.12.2020).
4. IEEE 802.16. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_16-2009.html (дата обращения: 18.12.2020).
5. IrDA Library of Specifications and Technical Papers for EMF. URL: <https://www.irda.org/library-of-specs> (дата обращения: 18.12.2020).
6. Cambridge English Dictionary. URL: <https://dictionary.cambridge.org/> (дата обращения: 18.12.2020).
7. *Scarfone K., Padgett J.* Guide to Bluetooth security. NIST Special Publication 800-121 Revision 1, 2008.
8. IEEE 802.15.1-2005. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2005.html (дата обращения: 18.12.2020).
9. ITU-T Y.4251/F.747.1: Capabilities of ubiquitous sensor networks for supporting the requirements of smart metering services. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.747.1-201206-I!!PDF-E&type=items
10. ITU-T Y.4403/Y.2026: Functional requirements and architecture of the next generation network for support of ubiquitous sensor network applications and services. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2026-201207-I!!PDF-R&type=items

Статья поступила в редакцию 13 января 2021 г.

WIRELESS SENSOR NETWORK TECHNOLOGIES

B.Ya. Likhttsinder, Yu.O. Bakai

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

E-mail: lixt@psuti.ru

Abstract. *The content of this paper is determined by the relevance of wireless sensor network standards. The paper discusses the diversity of wireless networks. Personal wireless network standards are presented. In particular, a detailed analysis of GPRS technology is presented. Various data transmission protocols are presented. Data transmission speeds are briefly reviewed. The evolution of Bluetooth standards is presented. Data transmission rates are described. Standards for Bluetooth technology are discussed in detail, an overview of the advantages and disadvantages of these standards is given, and the variety of applications for wireless sensor networks is presented.*

Keywords: *wireless technology, networks, data protocols, data, Bluetooth, data rates, sensor networks.*

REFERENCES

1. IEEE 802.15.4-2020. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (Accessed: 18.12.2020).
2. Vargauzin V.A. ZigBee network technology. TeleMul'tiMedia. 2005, no. 6. pp. 29–32. [in Russian]
3. ITU-T Y.4104/F.744: Service description and requirements for ubiquitous sensor network middle-ware. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.744-200912-I!!PDF-E&type=items
4. IEEE 802.16. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_16-2009.html (Accessed: 18.12.2020).
5. IrDA Library of Specifications and Technical Papers for EMF. Available at: <https://www.irda.org/library-of-specs> (Accessed: 18.12.2020).
6. Cambridge English Dictionary. Available at: <https://dictionary.cambridge.org/> (Accessed: 18.12.2020).
7. Scarfone K., Padgett J. Guide to Bluetooth security. NIST Special Publication 800-121 Revision 1, 2008.
8. IEEE 802.15.1-2005. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2005.html (Accessed: 18.12.2020).
9. ITU-T Y.4251/F.747.1: Capabilities of ubiquitous sensor networks for supporting the requirements of smart metering services. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-F.747.1-201206-I!!PDF-E&type=items
10. ITU-T Y.4403/Y.2026: Functional requirements and architecture of the next generation network for support of ubiquitous sensor network applications and services. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2026-201207-I!!PDF-R&type=items

*Boris Ya. Likhttsinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yulia O. Bakai, Undergraduate Student.*

Электротехника

УДК 612.3.07

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ

А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов, В.П. Курган, А.А. Горячкин

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

Аннотация. Рассмотрены задачи управления режимами работы насосных агрегатов с частотно-регулируемым приводом на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя. Обсуждаются характерные особенности требований к показателям качества процесса регулирования систем стабилизации уровня жидкости в резервуарах. Получены в форме передаточных функций математические модели функционально необходимых звеньев системы: частотно-регулируемого привода со скалярным управленком, обобщенного объекта управления, датчика обратной связи. Линеаризованная модель объекта управления с учетом нелинейной зависимости момента на валу двигателя от скорости получена в виде передаточной функции апериодического звена. Разработана структурная схема замкнутой по уровню жидкости системы управления. Отмечено, что использование для рассматриваемой системы стандартных настроек, ориентированных на достижение максимального быстродействия, может приводить к недопустимым значениям скорости изменения регулирующего воздействия и порождать гидравлические удары и повышенный износ кинематической части агрегата. Предложена методика синтеза регулятора, учитывающая ограничения на показатели качества переходного процесса изменения скорости насосного агрегата при отработке основного возмущения. Проведен синтез регулятора на примере конкретной установки, обсуждаются результаты моделирования переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям.

Ключевые слова: насосный агрегат, стабилизация уровня жидкости в резервуаре, частотно-регулируемый привод, система стабилизации, синтез регулятора.

В последние десятилетия у нас в стране и за рубежом значительное внимание уделяется применению частотно-регулируемого привода (ЧРП) для совершенствования режимов работы вентиляторных и насосных установок, широко используемых в промышленности, ЖКХ, сельском хозяйстве и потребляющих около 40 % вырабатываемой в стране электроэнергии [1–4, 5–10, 13, 16–18].

Абакумов Александр Михайлович (д.т.н. проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Кузнецов Павел Константинович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Курган Владимир Павлович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Горячкин Александр Александрович, магистрант.

Управление частотой вращения центробежных нагнетательных установок позволяет существенно снизить расход электроэнергии и повысить эффективность управления технологическими режимами.

По результатам энергетических обследований [3, 6, 7], многие установки водоснабжения, в том числе в сфере ЖКХ, работают со значительным превышением напора, что приводит к существенным бесполезным затратам электроэнергии и утечкам воды. В этих условиях модернизация действующих приводов насосов с нерегулируемыми асинхронными короткозамкнутыми двигателями путем установки преобразователей частоты позволяет понизить напор в трубопроводной системе за счет снижения скорости насосных агрегатов до требуемых значений. При этом благодаря кубической зависимости мощности центробежных нагнетателей от скорости достигается значительный энергосберегающий эффект.

Наряду с отмеченными простыми техническими решениями в насосных установках используются замкнутые системы автоматического управления режимами работы насосных агрегатов [3, 6, 7, 9, 10, 15–18]. Они предназначены преимущественно для решения одной из следующих задач.

1) Стабилизация давления в определенной точке гидравлической сети, в частности в так называемой «диктующей» точке разветвленной трубопроводной сети. Такие системы обеспечивают комфортные условия водоснабжения потребителей и дают дополнительную экономию электроэнергии по сравнению с вариантом простого снижения напора за счет уменьшения скорости насосного агрегата установки водоснабжения.

2) Стабилизация уровня жидкости в напорных и приемных резервуарах. Применение таких систем должно обеспечивать прежде всего нормальное протекание технологического процесса и предотвращать возникновение аварийных ситуаций в условиях изменения отбора или притока жидкости. Дополнительно, как правило, достигается энергосберегающий эффект.

Системы стабилизации уровня жидкости в резервуарах широко используются в промышленности и сфере ЖКХ. В насосных установках, подающих воду потребителям через аккумулирующую емкость (резервуар, напорную башню и т. п. (рис. 1)), жидкость забирается из источника, например водоема, и подается насосным агрегатом в выше расположенную напорную емкость.

Если потребление (отбор) жидкости Q_1 равно подаче Q , то уровень h в аккумулирующей емкости остается постоянным. Поскольку расход жидкости, как правило, изменяется, возникает задача управления подачей (производительностью) насосного агрегата с целью поддержания постоянного уровня. Стабилизация уровня исключает переполнение емкости и создает комфортные условия для потребителей. С энергетической точки зрения желательно поддерживать минимальный уровень жидкости в накопительной емкости – в этом случае высота подъема и расход энергии будут минимальными, что обеспечит дополнительный энергосберегающий эффект.

Наряду с рассмотренной задачей системы стабилизации уровня используются в установках для откачки жидкости из приемных резервуаров: для откачки грунтовых вод в горной промышленности, в канализационных насосных станциях и др. В этом случае необходимо поддерживать требуемый уровень жидкости в резервуаре, из которого производится откачка. Для таких установок аварийным является не только режим переполнения резервуара, но и режим, когда уровень снижается ниже допустимого и жидкость не поступает во всасывающий патрубок насоса.

С точки зрения синтеза САУ задачи аналогичны. Для определенности далее рассматривается задача стабилизации уровня жидкости в напорном резервуаре.

Одним из вариантов ее решения является использование релейного способа управления. В этом случае на напорной емкости устанавливаются датчики максимального и минимального уровня, с помощью которых формируются сигналы на включение/отключение насосного агрегата.

Релейная система проста в реализации, но при переменном графике потребления число включений/отключений двигателя в сутки, как показывает опыт эксплуатации подобных установок [6, 7], может достигать 50...100. Такой режим работы приводит к повышенному износу насосного агрегата, дополнительным потерям электроэнергии в пусковых режимах, а для агрегатов мощностью больше 150...200 кВт является недопустимым.

В этих условиях целесообразно использование замкнутых систем стабилизации уровня на базе частотно-регулируемого привода. Однако при их внедрении, как отмечено в [6, 7], возникают проблемы с обеспечением необходимой статической точности и устойчивости САУ, что делает актуальной задачу анализа динамических характеристик ее элементов и разработки методики синтеза подобных систем.

Функциональная схема системы (см. рис. 1) содержит: насос Н, приводимый в движение асинхронным двигателем АД; преобразователь частоты ПЧ; датчик уровня ДУ; задатчик уровня ЗД; регулятор Рег.

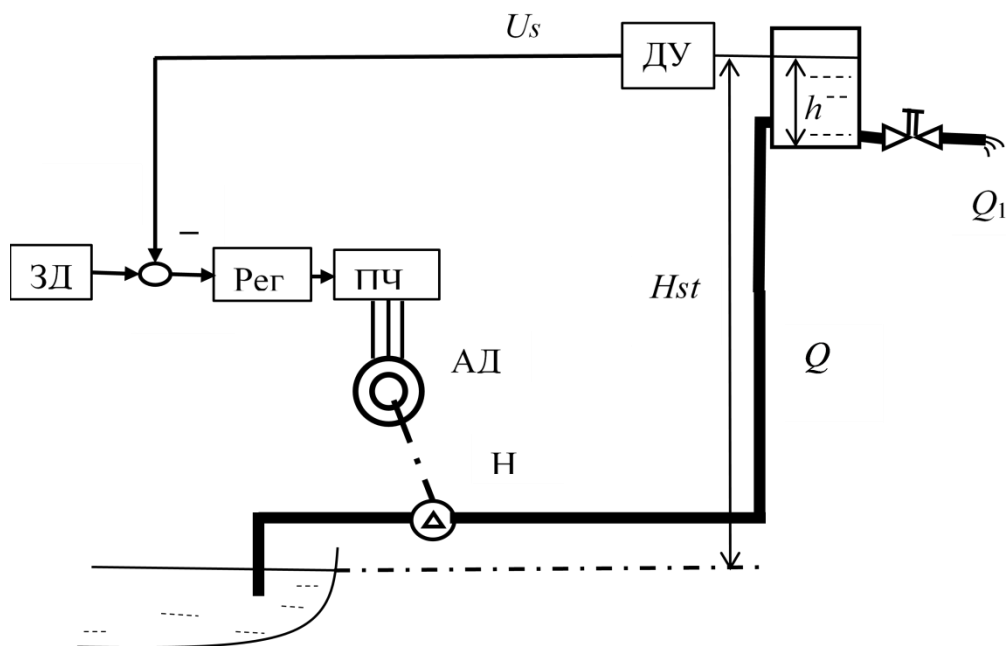


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации уровня жидкости в аккумулирующей емкости

Математическая модель объекта управления

Для рассматриваемой задачи регулирующим воздействием на объект управления является скорость ω насосного агрегата, определяющая напор H_p насоса и подачу Q жидкости в емкость; основным возмущающим воздействием служит расход (отбор) жидкости Q_1 .

Напор насоса уравновешен статическим напором H_{st} и потерями напора в элементах гидравлической системы, которые зависят от квадрата подачи [4, 6, 7, 12]:

$$H_p = H_{st} + SQ^2, \quad (1)$$

где S – суммарное гидравлическое сопротивление насоса и трубопровода.

Если принять, что при номинальной скорости ω_{nom} насосного агрегата обеспечивается номинальная подача, то согласно (1) значение гидравлического сопротивления

$$S = \frac{H_{nom} - H_{st}}{Q_{nom}^2}. \quad (2)$$

При использовании регулируемого привода напор насоса в соответствии с уравнением подобия [3, 6, 7] определяется фиктивным напором H_f и зависит от квадрата относительной угловой скорости:

$$H_p = H_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_{nom}} \right)^2, \quad (3)$$

и уравнение (1) с учетом (3) преобразуется к виду:

$$H_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_{nom}} \right)^2 = H_{st} + SQ^2. \quad (4)$$

В рассматриваемом объекте изменение статического напора (см. рис. 1) равно изменению уровня жидкости в емкости: $\Delta H_{st} = \Delta h$. Линеаризовав уравнение (4), после преобразований приращение подачи с учетом (2) можно представить в виде

$$\Delta Q = k_{QH}(\Delta H_p - \Delta h) = k_{QH}(k_{H\omega}\Delta\omega - \Delta h), \quad (5)$$

где

$$k_{QH} = \frac{\Delta Q}{\Delta H} = \frac{Q_{nom}^2}{2(H_{nom} - H_{st})Q_0}, \Delta H = \Delta H_p - \Delta h, \\ k_{H\omega} = \frac{\Delta H_p}{\Delta\omega} = \left(\frac{\partial H_p}{\partial \omega} \right)_0 = 2H_f \frac{\omega_0}{\omega_{nom}^2},$$

ω_0 и Q_0 – значения скорости и подачи в точке линеаризации (в рабочей точке).

Соотношению (5) соответствуют звенья 1, 2 и первый узел алгебраического суммирования сигналов на структурной схеме (рис. 2).

Приращение объема жидкости в баке определяется подачей и расходом:

$$\Delta V(t) = \int_0^t [\Delta Q(t) - \Delta Q_1(t)] dt,$$

или в операторной форме

$$\Delta V(p) = \frac{1}{p} [\Delta Q(p) - \Delta Q_1(p)].$$

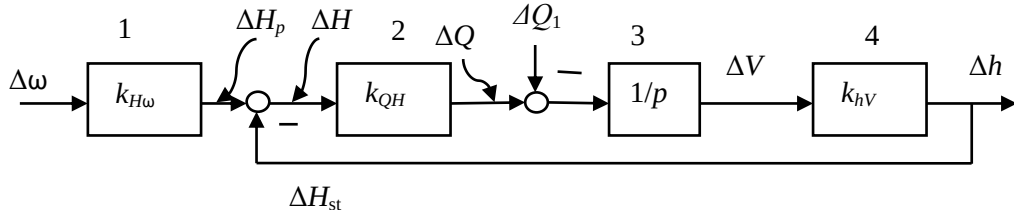


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

Тогда динамические свойства звена 3, устанавливающего взаимосвязь между приращением объема жидкости и разностью подачи и расхода $[\Delta Q - \Delta Q_1]$, можно отразить передаточной функцией интегрирующего звена (см. рис. 2):

$$W_{VQ}(p) = \frac{\Delta V(p)}{[\Delta Q(p) - \Delta Q_1(p)]} = \frac{1}{p}.$$

Приращение уровня жидкости в емкости связано с приращением ее объема ΔV соотношением

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{B},$$

где B – площадь поверхности зеркала жидкости в резервуаре.

Взаимосвязь этих переменных показана на структурной схеме звеном 4 с коэффициентом передачи

$$k_{hV} = \frac{\Delta h}{\Delta V} = \frac{1}{B}.$$

В соответствии со структурной схемой (см. рис. 2) объекту управления присуща отрицательная обратная связь. Ее действие, например, в случае возрастания уровня жидкости в баке приводит к уменьшению разности напора насоса и статического напора ($H_p - H_{st}$) и снижению подачи.

Согласно полученной структурной схеме передаточная функция объекта по управляющему воздействию

$$W_0(p) = \frac{\Delta h(p)}{\Delta\omega(p)} = \frac{k_{H\omega}}{T_o p + 1}, \quad (6)$$

где постоянная времени объекта

$$T_o = \frac{1}{k_{QH} k_{hV}}.$$

Математическая модель ЧРП

Исполнительным элементом в рассматриваемой САУ является ЧРП, с помощью которого создается регулирующее воздействие на объект управления.

Для центробежных насосов момент статического сопротивления при нулевом статическом напоре зависит от квадрата относительной частоты вращения и снижается при уменьшении частоты. Такой характер нагрузки и невысокие требования к диапазону регулирования и точности поддержания скорости позволяют применять для привода насосов простые приводы со скалярным управлением.

Используя модель ЧРП со скалярным управлением, рассмотренную в [15], структурную схему линейризованной системы частотного управления асинхронным двигателем для приращения переменных представим в виде, приведенном на рис. 3.

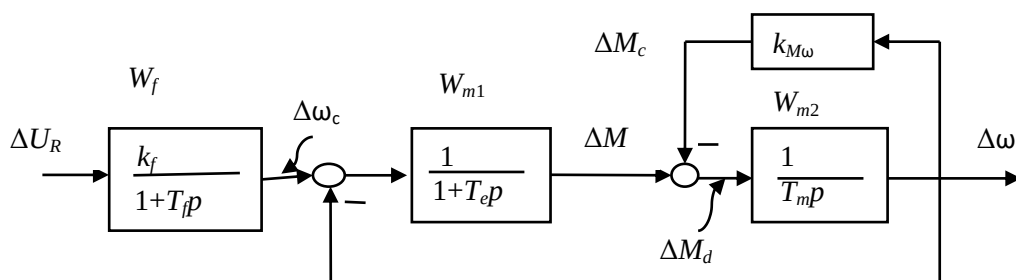


Рис. 3. Структурная схема ЧРП

Схема отражает динамические свойства ЧРП для рабочего участка характеристики двигателя.

Электромагнитная и электромеханическая инерционность АД отражены на структурной схеме передаточными функциями апериодического и интегрирующего звеньев:

$$W_{m1}(p) = \frac{\beta}{T_e p + 1}; \quad W_{m2}(p) = \frac{1}{\beta T_m p};$$

где β – жесткость линейризованной механической характеристики:

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{2M_{max}}{\omega_0 S_k};$$

M_{max} – максимальный (критический) момент АД;

ω_0 – синхронная угловая скорость АД при номинальной частоте напряжения на статоре;

S_k – критическое скольжение АД;

T_e – электромагнитная постоянная АД:

$$T_e = \frac{1}{2\pi f_{1n} S_k} = \frac{1}{314 S_k};$$

T_m – электромеханическая постоянная АД:

$$T_m = \frac{J}{\beta};$$

J – приведенный момент инерции двигателя и механизма.

На схеме показан также динамический момент:

$$M_d = M - M_c.$$

Указанные звенья и связи отражают динамические свойства АД для случая, когда момент сопротивления механизма не зависит от скорости. Для насосов механический момент на валу в соответствии с формулой подобия [3, 6, 7] зависит от квадрата скорости:

$$M_c = M_{nom} \left(\frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^2,$$

где M_{nom} – номинальный момент двигателя.

Линеаризовав последнее соотношение, получим:

$$\Delta M_c = k_{M\omega} \Delta \omega,$$

где

$$k_{M\omega} = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega} = \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right)_0 = 2M_{nom} \frac{\omega_0}{\omega_{nom}^2}.$$

Эквивалентная передаточная функция участка структурной схемы, охваченного обратной связью с коэффициентом $k_{M\omega}$:

$$W_1(p) = \frac{W_{m2}(p)}{1 + W_{m2}(p)k_{M\omega}} = \frac{1/k_{M\omega}}{T_{01}p + 1},$$

где

$$T_{01} = \frac{\beta T_m}{k_{M\omega}}.$$

Передаточная функция двигателя с учетом зависимости момента сопротивления от скорости на основе структурной схемы (рис. 3) будет:

$$W_m(p) = \frac{W_{m1}(p)W_1(p)}{1 + W_{m1}(p)W_1(p)} = \frac{k_m}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (7)$$

где

$$k_m = \frac{\beta}{\beta + k_{M\omega}}, T_1 = \sqrt{\frac{T_{01}T_e}{1 + \beta/k_{M\omega}}}; T_2 = \frac{T_{01} + T_e}{1 + \beta/k_{M\omega}}.$$

Динамические свойства преобразователя частоты описываются передаточной функцией

$$W_f(p) = \frac{\Delta \omega_c(p)}{\Delta U_R(p)} = \frac{k_{fu}}{T_{fu}p + 1}, \quad (8)$$

где k_{fu} и T_{fu} – коэффициент передачи и постоянная времени ПЧ.

Передаточная функция электропривода

$$W_{fd}(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta U_R(p)} = W_f(p)W_m(p) = \frac{k_{fu}k_m}{(T_{fu}p + 1)(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}. \quad (9)$$

С учетом изложенного структурная схема системы стабилизации, замкнутой обратной связью по уровню с коэффициентом передачи k_s , показана на рис. 4.

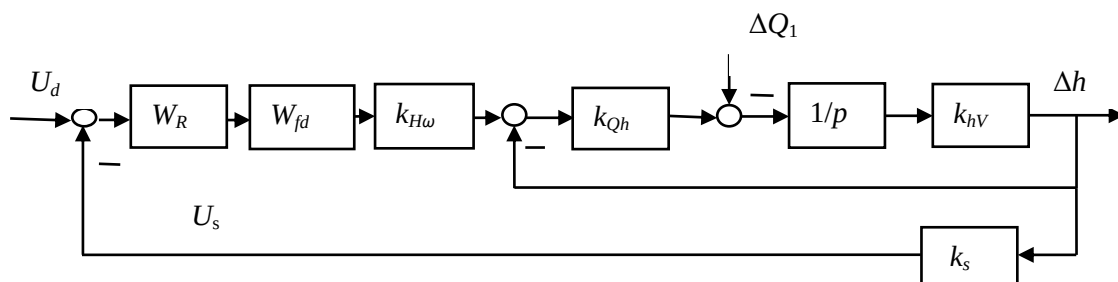


Рис. 4. Структурная схема системы стабилизации уровня жидкости в резервуаре

Синтез регулятора

Стандартные методы синтеза регуляторов [11] ориентированы на достижение высокого быстродействия при обработке задающего воздействия. Высокое быстродействие достигается за счет компенсации «больших» постоянных времени в контуре регулирования и форсировки регулирующего воздействия на объект управления.

Рассматриваемая система стабилизации должна обеспечить прежде всего высокую точность обработки основного возмущения в условиях ограничений на перерегулирование и скорость изменения регулирующего воздействия, обусловленных необходимостью предотвращения гидравлических ударов и повышенного износа звеньев кинематической цепи насосного агрегата.

В связи с этим синтез регулятора целесообразно вести, рассматривая динамические характеристики системы по возмущающему воздействию для выходной координаты – скорости насосного агрегата.

Перенеся возмущение ΔQ_1 на второй блок сравнения (см. рис. 3), структурную схему системы относительно рассматриваемых переменных можно преобразовать к виду, показанному на рис. 5.

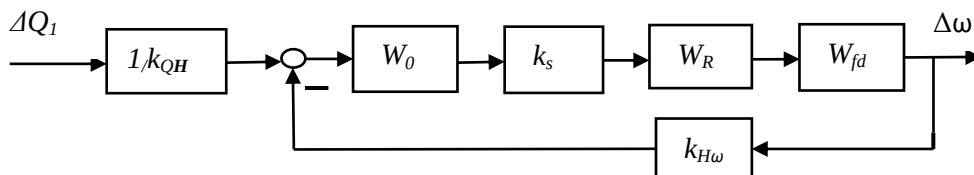


Рис. 5. Преобразованная структурная схема системы стабилизации уровня жидкости в резервуаре

Динамические характеристики рассматриваемой системы определяются прежде всего свойствами замкнутого контура. В соответствии со структурной схемой (см. рис. 5) передаточная функция нескорректированного контура в разомкнутом состоянии:

$$W_{op}(p) = W_o(p)k_s W_{fd}(p)k_{H\omega}(p).$$

Как показал численный анализ, постоянная времени объекта управления на несколько порядков превышает постоянные времени звеньев ЧРП, что позволяет на этапе синтеза регулятора пренебречь последними и упрощенно принять:

$$W_{op}(p) = \frac{k_{op}}{T_o p + 1}, \quad (10)$$

где коэффициент усиления разомкнутого контура

$$k_{op} = k_s k_{fd} k_{H\omega}.$$

Требуемый аperiodический характер переходного процесса изменения скорости при обработке ступенчатого возмущения в замкнутой системе можно получить [11, 14], выбрав эталонную (желаемую) передаточную функцию разомкнутого контура в виде передаточной функции интегрирующего звена:

$$W_{ref}(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{\Delta Q_1(p)} = \frac{k_{op}}{T_{int} p}. \quad (11)$$

При этом динамические свойства замкнутого контура будут эквивалентны свойствам аperiodического звена с передаточной функцией

$$W_{cl}(p) = \frac{1/k_{H\omega}}{T_a p + 1}$$

с постоянной времени

$$T_a = \frac{T_{int}}{k_{op}}.$$

Рассматриваемый переходный процесс в системе будет протекать по экспоненциальному закону с известным максимальным ускорением, равным $\Delta\omega/T_a$, и заканчиваться для 5%-й зоны допустимых отклонений за время

$$t_r = 3T_a. \quad (12)$$

Передаточную функцию регулятора $W_R(p)$ несложно найти, приравняв передаточные функции (10) разомкнутой скорректированной системы и эталонной (11):

$$W_R(p)W_{op}(p) = W_{ref}(p),$$

откуда

$$W_R(p) = \frac{W_{ref}(p)}{W_{op}(p)} = \frac{T_o p + 1}{k_{op} T_{int} p}.$$

Последнее выражение соответствует передаточной функции ПИ-регулятора

$$W_R(p) = \frac{T_{R1} p + 1}{T_{R2} p}. \quad (13)$$

Для компенсации «большой» постоянной T_o времени объекта следует принять постоянную времени дифференцирующей составляющей регулятора

$$T_{R1} = T_o.$$

Наличие интегральной составляющей регулятора $T_{R2}p$ обеспечивает астатизм системы. Постоянная времени интегральной составляющей определяется соотношением

$$T_{R2} = k_{op}T_{int}. \quad (14)$$

Учитывая формулы (12) и (14), для определения T_{R2} следует задаться требуемым (желаемым) временем регулирования t_{reg} и рассчитать постоянную времени интегрирования регулятора:

$$T_{R2} = \frac{k_{op}t_{reg}}{3}. \quad (15)$$

Назначая (выбирая) значение t_{reg} , следует учитывать, что увеличение t_{reg} снижает динамические нагрузки в насосном агрегате, но приводит к увеличению динамического отклонения уровня жидкости в резервуаре при отработке возмущения.

Переходный процесс изменения скорости насосного агрегата при отработке задающего воздействия определяется передаточной функцией замкнутой системы, которая при пренебрежении инерционностью звеньев электропривода приводится к виду:

$$W_{\omega u}(p) = \frac{k_e(T_{R1}p + 1)}{k_{op}(T_{int}p + 1)}.$$

Дифференцирующее звено $(T_{R1}p + 1)$ в числителе полученной передаточной функции как раз и позволяет скомпенсировать большую постоянную времени объекта управления и получить высокое быстродействие при отработке задающего сигнала. Однако этот эффект достигается за счет форсированного изменения скорости насосного агрегата, что нежелательно и, в принципе, не требуется для рассматриваемой системы.

Требуемый аperiodический характер изменения скорости при отработке сигнала задания достигается включением на входе системы фильтра с передаточной функцией аperiodического звена с постоянной времени $T_F = T_{R1}$:

$$W_F(p) = \frac{1}{T_F p + 1}. \quad (16)$$

Естественно, в результате такого решения увеличивается время переходного процесса.

Моделирование системы стабилизации уровня жидкости

В качестве примера при моделировании рассмотрена установка с насосным агрегатом АК 50-250/263/37,0/2 со следующими техническими данными:

$$Q_{nom} = 92 \frac{\text{м}^3}{\text{час}} = 0,0255 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; H_{nom} = 79 \text{ м вод. ст.}$$

Агрегат оснащен приводным двигателем АИР200М2 с номинальными данными:

$$P_{nom} = 37 \text{ кВт}; n_c = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}; S_{nom} = 0,02.$$

Площадь зеркала аккумулирующей емкости принята $V=10 \text{ м}^3$.

По приведенным выше выражениям рассчитаны значения параметров математической модели системы:

$$k_{H\omega} = 0,512 \frac{\text{м вод. ст}}{\frac{\text{рад}}{\text{с}}}; k_{QH} = 0,00162 \frac{\text{м}^3/\text{с}}{\text{м вод. ст.}}$$

$$k_{hV} = \frac{1}{B} = 0,1 \text{ м}^{-2}; T_o = 6182 \text{ с}; k_m = 0,966;$$

$$T_1^2 = 0,000287 \text{ с}^2; T_2 = 0,0108 \text{ с};$$

$$k_f = 31,5 \frac{\text{рад/с}}{\text{В}}; T_f = 0,001 \text{ с}; k_s = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$k_{op} = 15,6; T_{R1} = T_o = 6183 \text{ с}.$$

Расчетные значения постоянной времени T_{R2} для двух принятых величин желаемых значений $t_{reg}=3\text{ с}$ и 6 с составляют соответственно $15,6\text{ с}$ и $31,2\text{ с}$.

Графики переходных процессов изменения скорости при скачке основного возмущения – расхода жидкости на $0,5Q_{ном}$ приведены на рис. 6.

Время регулирования для расчетного значения постоянной времени регулятора $T_{R2} = 15,6\text{ с}$ составляет 3 с ; при двукратном увеличении T_{R2} время регулирования возрастает в два раза, до 6 с . Инерционность ЧРП, как и предполагалось, не оказывает существенного влияния на переходный процесс.

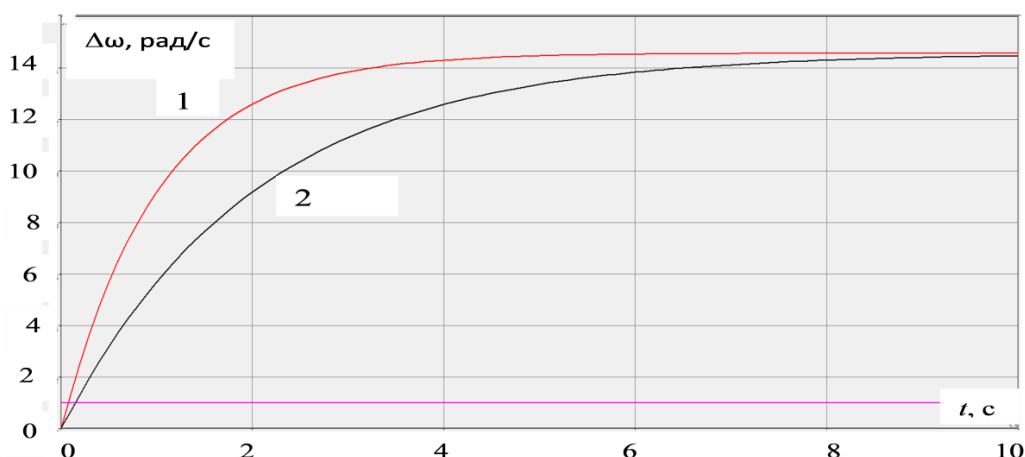


Рис. 6. Графики изменения скорости насосного агрегата при скачке расхода жидкости на $0,5 Q_{ном}$: кривая 1 – $T_{R2}=15,6\text{ с}$; кривая 2 $T_{R2}= 31,2\text{ с}$

Графики переходных процессов изменения уровня жидкости в резервуаре при скачке расхода жидкости $Q_1 = 0,5Q_{ном}$ для тех же значений T_{R2} показаны на рис. 7.

Как следует из графиков, максимальное динамическое отклонение (провал) уровня составляет $0,001\text{ м}$ для кривой 1 и $0,002\text{ м}$ для кривой 2. Следовательно, величина динамического провала вполне приемлема, а увеличение T_{R2} ведет к примерно пропорциональному возрастанию динамического провала или выброса уровня.

Переходные процессы изменения скорости насосного агрегата и уровня жидкости при скачке сигнала задания для системы стабилизации в силу самого назначения системы имеют второстепенной значение. В этом случае также желательно, чтобы процесс изменения скорости насосного агрегата протекал без перегулирования.

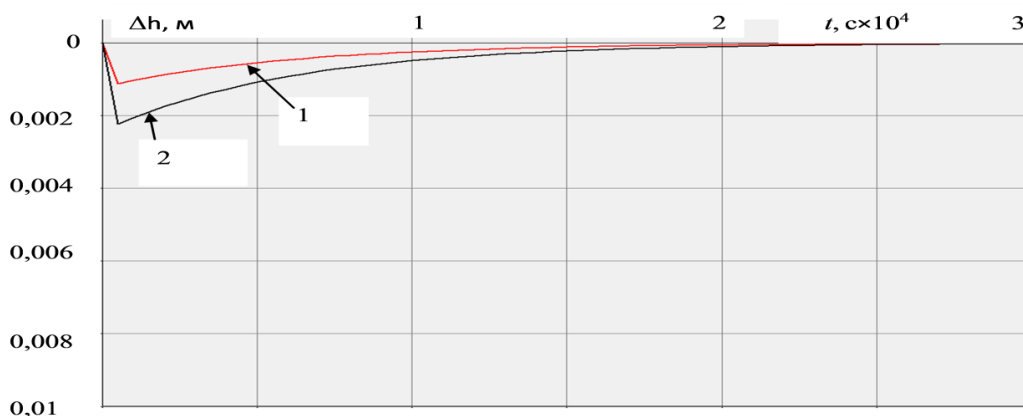


Рис. 7. Графики изменения уровня жидкости в емкости при скачке расхода жидкости на $0,5 Q_{ном}$: кривая 1 — $T_{R2}=15,6$ с; кривая 2 — $T_{R2}=31,2$ с

График изменения скорости для рассматриваемого переходного процесса в системе с фильтром по выражению (16) на входе системы показан рис. 8. Он характеризуется интенсивным нарастанием скорости на начальном участке с последующим «дотягиванием» до установившегося значения.

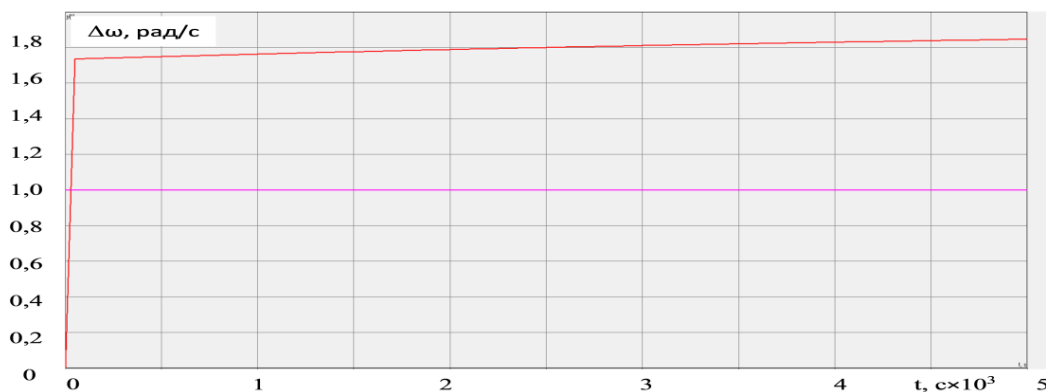


Рис. 8. График изменения скорости при скачке сигнала задания в системе с фильтром на входе

Расчетный график переходного процесса изменения уровня жидкости в резервуаре в замкнутой системе управления при скачке сигнала задания показан на рис. 9.

Время отработки сигнала задания определяется постоянной времени объекта $T_o \approx 6000$ с и, как следует из графиков, составляет около 18000 с. Уменьшить его можно за счет форсировки переходного процесса изменения скорости, т. е.

создания повышенных нагрузок на насосный агрегат. Такое решение должно обосновываться требованиями конкретной установки.

Отметим еще одну особенность подобных систем.

Возможны ситуации, когда расход жидкости Q_1 из емкости относительно невелик. В этом случае подача Q и скорость насосного агрегата снижаются. Скорость агрегата при регулировании не должна быть меньше некоторой допустимой по условиям нормального режима работы насоса [6, 7]. Поэтому при снижении скорости до некоторой определенной минимальной величины электропривод в таких системах переводится в так называемый «спящий» режим – скорость двигателя устанавливается равной нулю. Работа привода возобновляется, когда отклонение уровня жидкости превысит допустимое значение.

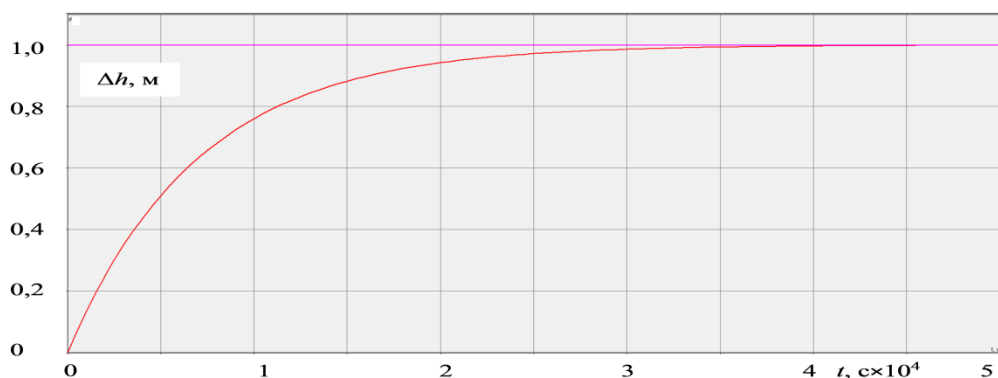


Рис. 9. График изменения уровня жидкости в емкости при скачке сигнала задания в системе с фильтром на входе

Такая система имеет зону нечувствительности, которая дополнительно к динамической ошибке определяет наибольшее отклонение уровня жидкости в резервуаре от заданного значения.

По литературным данным [6, 7], допустимое отклонение для САУ уровня не должно превышать $\pm 10 \dots 50$ мм. В современных системах эти значения могут быть значительно уменьшены. Однако высокая точность достигается непрерывным изменением скорости насосного агрегата, что приводит к дополнительным знакопеременным нагрузкам элементов кинематической схемы и их повышенному износу. Поэтому в некоторых случаях рекомендуется устанавливать повышенную зону нечувствительности САУ.

Выводы

Линеаризованная модель объекта управления системы стабилизации уровня жидкости в резервуаре получена в виде апериодического звена первого порядка, параметры которого зависят от номинальных значений напора и подачи насосного агрегата, статического напора и площади резервуара. Постоянная времени объекта управления, как правило, на несколько порядков превышает постоянные времени исполнительного элемента и датчика обратной связи, что позволяет на этапе синтеза регулятора использовать упрощенную модель системы. Рассмотрена методика синтеза регулятора с учетом ограничений на скорость изменения регулирующего воздействия на объект управления при

отработке основного возмущения – изменения отбора жидкости из резервуара. Результаты моделирования системы управления с выбранным ПИ-регулятором для конкретной установки свидетельствуют о достижении требуемых показателей качества регулирования при отработке возмущающего и задающего воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козаченко В.Ф., Миколаенко В.П., Кудряшов А.Л. Микропроцессорная система контроля для преобразователей частоты для используемых на заводах асинхронных электрических двигателей насосов и вентиляторов // *Электротехника*. – 2005. – № 7. – С. 29–33.
2. Гаврилов Д.П., Барабанов В.Г. Разработка и исследование системы управления насосной установкой // *Вестник ЮУрГУ. Сер.: Машиностроение*. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 11–19.
3. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. – М.: Академия, 2008. – 208 с.
4. Кедров В.С. Водоснабжение и водоотведение. – М.: Стройиздат, 2002. – 336 с.
5. Копырин В.Г., Бородацкий Е.В. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода // *Силовая электроника*. – 2006. – № 7. – С. 33–35.
6. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
7. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 242 с.
8. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: гидравлические машины и гидропневмопривод / Под ред. А.А. Шейпака. – М.: МГИУ, 2003. – 352 с.
9. Лысенко О.А., Дестярев А.В., Хамитов Р.Н. Моделирование электротехнического комплекса в системе «асинхронный двигатель – центробежный насос» // *Известия Транссиба*. – 2013. – № 3 (15). – С. 35–40.
10. Лысенко О.А., Хамитов Р.Н. Система стабилизации напора установок центробежных насосов со скалярным управлением частоты вращения асинхронного двигателя // *Известия Транссиба*. – 2013. – № 4(16). – С. 25–30.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
12. Павлинова И.И., Баженов В.И., Губий И.Г. Водоснабжение и водоотведение. – М.: Юрайт, 2013. – 472 с.
13. Петров Д.Н., Сербин Ю.В. Регулируемый привод в насосных установках // *Силовая электроника*. – 2005. – № 4. – С. 27–30.
14. Рапопорт Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: конспект лекций. – Куйбышев: КПТИ, 1985. – 56 с.
15. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
16. Фащиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. – М.: Горная книга, 2011. – 260 с.
17. Wei H., Li P., Jia H. Variable Structure Robust Design for Variable Frequency Pump-control-motor Speed Governing System. Nongye Jixie Xuebao / *Transactions Agricultural Machinery*. 2009. Vol. 40. № 10. Pp. 188–192.
18. Xiuhe L. Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun. 2010. Vol. 3. № 610276. Pp. 431–434.

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2020 г.

RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM FOR LIQUIDS LEVEL MAINTENANCE IN TANKS

A.M. Abakumov, P.K. Kuznetsov, V.P. Kurgan, A.A. Goryachkin

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

Annotation. *The problems of controlling the operating modes of pumping units with a frequency-controlled drive based on an asynchronous short-circuited motor are considered. The specific features of the requirements for the control process quality indicators of liquid level stabilization control system for the reservoirs are discussed. Mathematical models of functionally necessary parts of the system are obtained in the form of transfer functions: a frequency-controlled drive with scalar control, a generalized control object, and a feedback sensor. The linearized model of the controlled object taking into consideration a nonlinear dependence of the torque at the motor shaft on rotational speed is obtained in the form of a transfer function of the aperiodic unit. A block diagram of a closed loop liquid level control system has been developed. It is shown that the use of standard settings for the system under consideration, focused on maximum performance achievement, can leads to unacceptable values of control action speed variations and hence to generation of hydraulic shocks that decreases a wear of kinematic parts of the unit. A method for the synthesis of the controller is proposed, which takes into account the limitations on the quality indicators of the transient process of a speed variation of the pump unit when control system counteracts main disturbances. The synthesis of controller is carried out for an example of a specific installation and the results of modeling transients of a control system and perturbing effects are discussed.*

Keywords: *pumping unit, stabilization of the liquid level in the reservoir, variable frequency drive, stabilization system, controller synthesis.*

REFERENCES

1. Kozachenko V.F., Mikolayenko V.P., Kudryashov A.L. Mikroprotsessornaya sistema kontrolya dlya preobrazovateley chastoty dlya ispol'zuyemykh na zavodakh asinkhronnykh elektricheskikh dvigatelyakh nasosov i ventilyatorov. Elektrotehnika. 2005. № 7. Pp. 29–33.
2. Gavrilov D.P., Barabanov V.G. Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya nasosnoy ustanovkoy Vestnik YUUrGU. Seriya «Mashinostroyeniye». 2017. T. 17, № 2. Pp. 11–19.
3. Il'inskiy N.F., Moskalenko V.V. Elektroprivod: energo- i resursosberezheniye. M.: Akademiya, 2008. 208 p.
4. Kedrov V.S. Vodosnabzheniye i vodootvedeniye. 2-ye izd., pererab. i dop. M.: Stroyizdat, 2002. 336 p.
5. Kopyrin V.G., Borodatskiy Ye.V. Avtomatizatsiya nasosnoy stantsii s primeneniyyem chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda. Silovaya elektronika. 2006. № 7. Pp. 33–35.
6. Leznov B.S. Chastotno-reguliruyemyy elektroprivod nasosnykh ustanovok. M.: Mashinostroyeniye, 2013. 176 p.
7. Leznov B.S. Energoberezheniye i reguliruyemyy elektroprivod. M.: Energoatomizdat, 2006. 242 p.
8. Lepeshkin A.V., Mikhaylin A.A., Sheypak A.A. Gidravlika i gidropnevmoprivod: Gidravlicheskiye mashiny i gidropnevmoprivod / Pod red. A.A. Sheypaka. M.: MGIU, 2003. 352 p.

Aleksandr M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Pavel K. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir P. Kurgan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor
Aleksandr A. Goryachkin, Graduate Student.

9. *Lysenko O.A., Degtyarev A.V., Khamitov R.N.* Modelirovaniye elektrotekhnicheskogo kompleksa v sisteme «asinkhronnyy dvigatel' – tsentrobezhnyy nasos». *Izvestiya Transsiba*. 2013. № 3 (15). Pp. 35–40.
10. *Lysenko O.A., Khamitov R.N.* Sistema stabilizatsii napora ustanovok tsentrobezhnykh nasosov so skalyarnym upravleniyem chastoty vrashcheniya asinkhronnogo dvigatelya. *Izvestiya Transsiba*. 2013. № 4(16). Pp. 25–30.
11. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya / pod red. K.A. Pupkova, N.D. Yegupova.* M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004. 616 s.
12. *Pavlinova I.I., Bazhenov V.I., Gubiy I.G.* Vodosnabzheniye i vodootvedeniye. 4-ye izd., pererab. i dop. M.: Yurayt, 2013. 472 p.
13. *Petrov D.N., Serbin Yu.V.* Reguliruyemyy privod v nasosnykh ustanovkakh. *Silovaya elektronika*. 2005. № 4. Pp. 27–30.
14. *Rapoport E.Ya.* Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka: konspekt lektsiy. Kuybyshev: KPTI, 1985. 56 p.
15. *Terekhov V.M., Osipov O.I.* Sistemy upravleniya elektroprivodov. M.: Akademiya, 2005. – 304 p.
16. *Fashchilenko V.N.* Reguliruyemyy elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok gornykh predpriyatiy: Ucheb. posobiye. M.: Gornaya kniga, 2011. 260 p.
17. *Wei H., Li P., Jia H.* Variable Structure Robust Design for Variable Frequency Pump-control-motor Speed Governing System. *Nongye Jixie Xuebao / Transactions Agricultural Machinery*. 2009. Vol. 40. № 10. Pp. 188–192.
18. *Xiuhe L.* Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving. *International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun*. 2010. Vol. 3. № 610276. Pp. 431–434.

УДК 621.3.078

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ АМПЛИТУД ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ВЫХОДНОМ НАПРЯЖЕНИИ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.В. Стариков, С.Л. Лисин, О.С. Беляева, В.А. Кирдяшев

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

Аннотация. Современные низковольтные частотные преобразователи, построенные по принципу автономных инверторов с широтно-импульсной модуляцией, обладают большими амплитудами высших гармоник в выходном напряжении. Это негативно сказывается на работе асинхронного или синхронного двигателя, подключенного к такому преобразователю, поскольку вызывает снижение коэффициента полезного действия машины переменного тока. Произведен анализ причин плохого гармонического состава выходного напряжения традиционных инверторов с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией; отмечено, что основной из них является введение «мертвого» времени при переключении полумостов каждый период модуляции. Предложен способ синусоидальной модуляции, не требующий введения «мертвого» времени. Рассмотрены режимы функционирования силовых транзисторов при таком способе коммутации и диаграммы управляющих сигналов. Найдены аналитические выражения, позволяющие определить действующее значение выходного напряжения частотного преобразователя и коэффициенты высших гармоник при предлагаемом способе коммутации силовых транзисторов. Определена основная причина низкого действующего значения фазного напряжения на выходе инвертора при синусоидальной широтно-импульсной модуляции – неэффективное использование периода коммутации. Предложен способ синусоидальной модуляции, не требующий введения «мертвого» времени, повышающий действующее значение выходного напряжения и уменьшающий в 75 раз суммарный коэффициент гармонических составляющих. Приведены диаграммы сигналов, управляющих силовыми транзисторами и обеспечивающих снижение амплитуд высших гармоник на выходе частотного преобразователя. Произведена аппроксимация гармоническим рядом Фурье выходного напряжения инвертора, получающегося в случае применения предложенного способа коммутации силовых транзисторов. Отмечено, что для технической реализации синусоидальной модуляции, обеспечивающей малые амплитуды высших гармоник, необходимы только два широтно-импульсных модулятора.

Ключевые слова: частотный преобразователь, фазное напряжение, широтно-импульсная модуляция, ряд Фурье, высшие гармоники.

Подавляющее большинство современных частотных преобразователей построены по принципам автономных инверторов с широтно-импульсной модуляцией [1–8]. При этом исторически сложилось, что изначально использовалась так

Стариков Александр Владимирович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика».

Лисин Сергей Леонидович (к.т.н.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Беляева Ольга Сергеевна, аспирант.

Кирдяшев Виктор Александрович, аспирант.

называемая π -коммутация силовых транзисторов [8], простая в своей технической реализации, но обладающая плохим гармоническим составом выходного напряжения. Например, амплитуда пятой гармоники такого частотного преобразователя составляет 20 % от амплитуды первой [2, 9], что негативно сказывается на потере энергии в нагрузке.

Поэтому на смену частотным преобразователям с π -коммутацией силовых транзисторов пришли инверторы с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1–9]. Однако недостатками традиционной синусоидальной ШИМ являются низкое выходное напряжение, максимальное действующее значение которого составляет 182 В при подключении частотного преобразователя к трехфазной сети 380 В, и большие амплитуды высших гармоник [1]. Последнее связано с тем, что, как правило, необходимое напряжение на статорных обмотках асинхронного двигателя, подключенного к инвертору, формируется посредством подключения фазы статорной обмотки двигателя переменного тока то к плюсу, то к минусу источника постоянного напряжения каждый период ШИМ. Например, для формирования синусоидального напряжения на фазе *A* асинхронного двигателя каждый период модуляции переключаются транзисторы VT1 и VT4 частотного преобразователя (рис. 1) с переменной скважностью. То есть используется симметричный закон коммутации силовых транзисторов полумоста, причем нулю напряжения будет соответствовать скважность $\gamma_A = 0,5$. В связи с этим на каждом периоде ШИМ вынуждены вводить так называемое «мертвое» время, необходимое для создания выдержки между процессами выключения и включения транзисторов полумостов, а это негативно влияет на гармонический состав выходного напряжения [1].

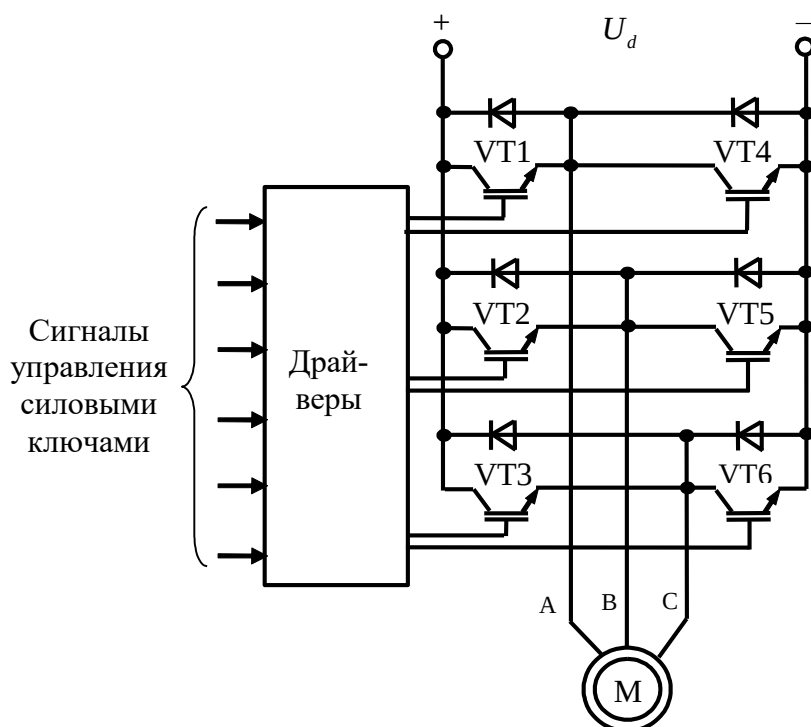


Рис. 1. Упрощенная силовая схема частотного преобразователя

В результате, как показывают натурные эксперименты [10], в инверторах с традиционной синусоидальной модуляцией при максимальном напряжении амплитуда третьей гармоники достигает 8 % от амплитуды первой, пятая гармоника составляет 12 %, а седьмая – 5 %.

Одним из подходов к улучшению гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя является применение таких законов коммутации силовых транзисторов, при которых отсутствует необходимость введения «мертвого» времени. Примером могут служить инверторы с трапецеидальной формой фазного напряжения, имеющие нулевую третью гармонику и амплитуду пятой гармоники порядка 4 % [11–14].

Дальнейшего уменьшения коэффициентов высших гармоник в выходном сигнале частотного преобразователя можно достичь за счет применения такой синусоидальной ШИМ, при которой не требуется использования «мертвого» времени при переключении транзисторов полумостов. Для достижения этого должны быть реализованы следующие режимы функционирования силовых транзисторов (табл. 1).

Таблица 1

Режимы функционирования силовых ключей

θ , рад.	$0 - \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} - \pi$	$\pi - \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} - \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} - 2\pi$
Режим VT1	γ_A	γ_A	γ_A	Выкл.	Выкл.	Выкл.
Режим VT2	Выкл.	Выкл.	γ_B	γ_B	γ_B	Выкл.
Режим VT3	γ_C	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_C	γ_C
Режим VT4	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_A	γ_A	γ_A
Режим VT5	γ_B	γ_B	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_B
Режим VT6	Выкл.	γ_C	γ_C	γ_C	Выкл.	Выкл.

Как и при π -коммутации транзисторов, период выходного напряжения делится на 6 частей длительностью $\frac{\pi}{3}$.

Скважность открытого состояния транзисторов VT1 и VT4 определяется по формуле

$$\gamma_A = \frac{N_U \sin \theta}{T_{ШИМ}},$$

где N_U – сигнал, определяющий величину (амплитуду) фазного напряжения;

$\theta = 2\pi f_1 t$ – угол поворота вектора напряжения;

f_1 – заданная частота напряжения на выходе инвертора;

$T_{ШИМ}$ – период широтно-импульсной модуляции.

Скважность транзисторов VT2 и VT5 должна быть равна

$$\gamma_B = \frac{N_U \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)}{T_{ШИМ}},$$

а скважность транзисторов VT3 и VT6 определяется выражением

$$\gamma_C = \frac{N_U \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)}{T_{ШИМ}}.$$

Из табл. 1 видно, что транзисторы каждого полумоста переключаются всего два раза за период выходного напряжения, причем в момент переключения скважность открывающегося транзистора должна быть равна нулю. Поэтому при частотах ШИМ до 20 кГц введения «мертвого» времени либо не требуется, либо задержка на включение должна работать всего 6 раз за период синусоиды.

Для реализации алгоритма синусоидальной модуляции, представленного в табл. 1, необходимо иметь 3 широтно-импульсных модулятора, синхронизированных по времени. Пример временных диаграмм сигналов управления силовыми транзисторами VT1, VT3 и VT5 для $\theta = \frac{\pi}{8}$, обеспечивающих требуемые режимы функционирования, приведен на рис. 2, причем высокому уровню сигналов U_{VT1} , U_{VT3} и U_{VT5} соответствует открытое состояние этих транзисторов.

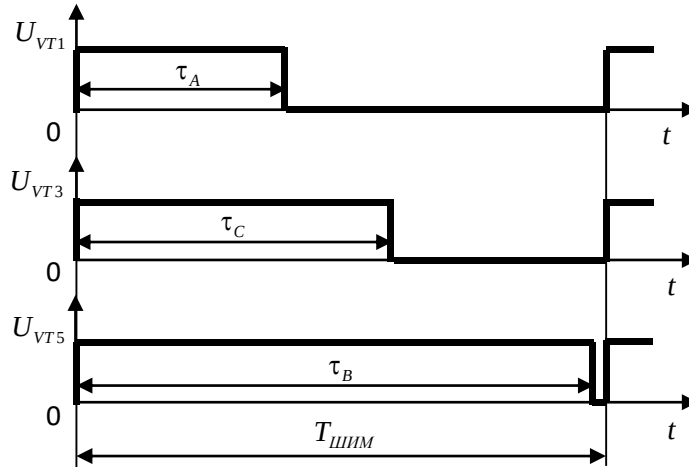


Рис. 2. Сигналы управления силовыми транзисторами при $\theta = \frac{\pi}{8}$

Длительности управляющих импульсов равны

$$\left. \begin{aligned} \tau_A &= N_U T_{ШИМ} \sin \theta; \\ \tau_B &= N_U T_{ШИМ} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ \tau_C &= N_U T_{ШИМ} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Анализ упрощенной принципиальной схемы и временных диаграмм, приведенных на рис. 1 и 2, показывает, что часть периода ШИМ транзисторы VT1 и VT3 подключают к плюсу источника постоянного напряжения фазы A и C статора асинхронного двигателя, а транзистор VT5 соединяет фазу B и минус этого источника. В результате, если пренебречь индуктивностью, напряжение относительно нулевой точки обмоток асинхронного двигателя, соединенных в «звезду», делится таким образом, что на фазах A и C выделяется $\frac{1}{3}$ напряже-

ния U_d линии постоянного тока, причем со знаком плюс, а на фазе B – $\frac{2}{3}$ – со знаком минус. Часть периода ШИМ, когда транзистор VT1 выключен и работают только VT3 и VT5, напряжение U_d делится пополам между фазами B и C. В остальное время периода ШИМ напряжение на всех обмотках равно нулю.

Проследив работу транзисторов за период синусоиды, можно сделать вывод, что напряжение на выходе частотного преобразователя представляет собой кусочно-постоянную функцию, принимающую значения 0, $\frac{1}{3}U_d$, $\frac{1}{2}U_d$ и $\frac{2}{3}U_d$. Поэтому максимальное среднеквадратическое (действующее) значение фазного напряжения будет определяться выражением

$$U_{rms,max}^{s1} = U_d \sqrt{Q}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} Q = & \frac{1}{v} \left\{ \sum_{h=1}^{\frac{v}{6}} \frac{1}{9} \sin(h\theta_1) + \sum_{h=\frac{v}{6}+1}^{\frac{v}{3}} \left\{ \frac{1}{9} \sin \left[\left(\frac{2}{3}v + h \right) \theta_1 \right] + \frac{1}{4} \left\{ \sin(h\theta_1) - \sin \left[\left(\frac{2}{3}v + h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} + \right. \\ & + \sum_{h=\frac{v}{3}+1}^{\frac{2v}{3}} \left\{ \frac{4}{9} \sin \left[\left(h - \frac{v}{3} \right) \theta_1 \right] + \frac{1}{4} \left\{ \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] - \sin \left[\left(h - \frac{v}{3} \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} + \\ & + \sum_{h=\frac{2v}{3}+1}^{\frac{5v}{6}} \left\{ \frac{4}{9} \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] + \frac{1}{4} \left\{ \sin \left[\left(h - \frac{v}{3} \right) \theta_1 \right] - \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} + \\ & \left. + \sum_{h=\frac{5v}{6}+1}^{\frac{v}{2}} \left\{ \frac{1}{9} \sin \left[\left(h - \frac{2}{3}v \right) \theta_1 \right] + \frac{1}{4} \left\{ \sin(h\theta_1) - \sin \left[\left(h - \frac{2}{3}v \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} + \sum_{h=\frac{2}{3}v+1}^{v-1} \frac{1}{9} \sin(h\theta_1) \right\} \end{aligned}$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi f_1}{f_{ШИМ}};$$

$$f_{ШИМ} = \frac{1}{T_{ШИМ}} - \text{частота широтно-импульсной модуляции};$$

$$v = \frac{f_{ШИМ}}{2f_1}.$$

Подсчет по формуле (2) показывает, что при $U_d = 515$ В, $f_1 = 50$ Гц, $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц и $v = 48$ максимальное действующее значение фазного напряжения на выходе частотного преобразователя при рассматриваемом способе коммутации силовых транзисторов составит $U_{rms,max}^{s1} = 186$ В. Это является большим недостатком, поскольку требует завышения мощности исполнительного двигателя на 40–50 %.

Тем не менее, поскольку большой интерес представляет гармонический состав выходного напряжения инвертора, найдем аналитическое выражение для коэффициентов высших гармоник при предлагаемой синусоидальной модуляции, не требующей введения «мертвого» времени:

$$\begin{aligned}
 b_n = & -\frac{2U_d}{n\pi} \left\{ \sum_{h=1}^{\frac{v}{6}} \frac{1}{3} \left\{ \cos[n\theta_1(h + \sin(h\theta_1))] - \cos(nh\theta_1) \right\} + \right. \\
 & + \sum_{h=\frac{v}{6}+1}^{\frac{v}{3}} \left\{ \frac{1}{3} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(\frac{2}{3}v + h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos(nh\theta_1) \right\} + \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 [h + \sin(h\theta_1)] \right\} - \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(\frac{2}{3}v + h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} \right\} + \\
 & + \sum_{h=\frac{v}{3}+1}^{\frac{2}{3}v} \left\{ \frac{2}{3} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(h - \frac{v}{3} \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos(nh\theta_1) \right\} + \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(h - \frac{v}{3} \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} \right\} + \\
 & + \sum_{h=\frac{2}{3}v+1}^{\frac{5}{6}v} \left\{ \frac{2}{3} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos(nh\theta_1) \right\} + \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(h - \frac{v}{2} \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(\frac{2}{3}v - h \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} \right\} + \\
 & + \sum_{h=\frac{5}{6}v+1}^{\frac{5}{3}v} \left\{ \frac{1}{3} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(h - \frac{2}{3}v \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} - \cos(nh\theta_1) \right\} + \right. \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \cos \left\{ n\theta_1 [h + \sin(h\theta_1)] \right\} - \cos \left\{ n\theta_1 \left\{ h + \sin \left[\left(h - \frac{2}{3}v \right) \theta_1 \right] \right\} \right\} \right\} + \\
 & \left. + \sum_{h=\frac{5}{3}v+1}^{v-1} \frac{1}{3} \left\{ \cos[n\theta_1(h + \sin(h\theta_1))] - \cos(nh\theta_1) \right\} \right\}, \tag{3}
 \end{aligned}$$

где n – номер коэффициента (гармоники).

Следует отметить, что выходное фазное напряжение при рассматриваемом способе коммутации транзисторов представляет собой нечетную функцию. Поэтому четные коэффициенты гармонического ряда Фурье равны нулю, а нечетные определяются по формуле (3). Расчет по полученному аналитическому выражению коэффициентов с номерами с 1 по 301 позволил построить график фазного напряжения с учетом процесса широтно-импульсной модуляции (рис. 3), причем численные значения коэффициентов с 1 по 39 приведены в табл. 2. На графике хорошо прослеживаются 96 импульсов за период синусоиды и получаемая амплитуда напряжения, что позволяет сделать вывод об адекватности формулы (3) реальным процессам, протекающим в силовой части инвертора.

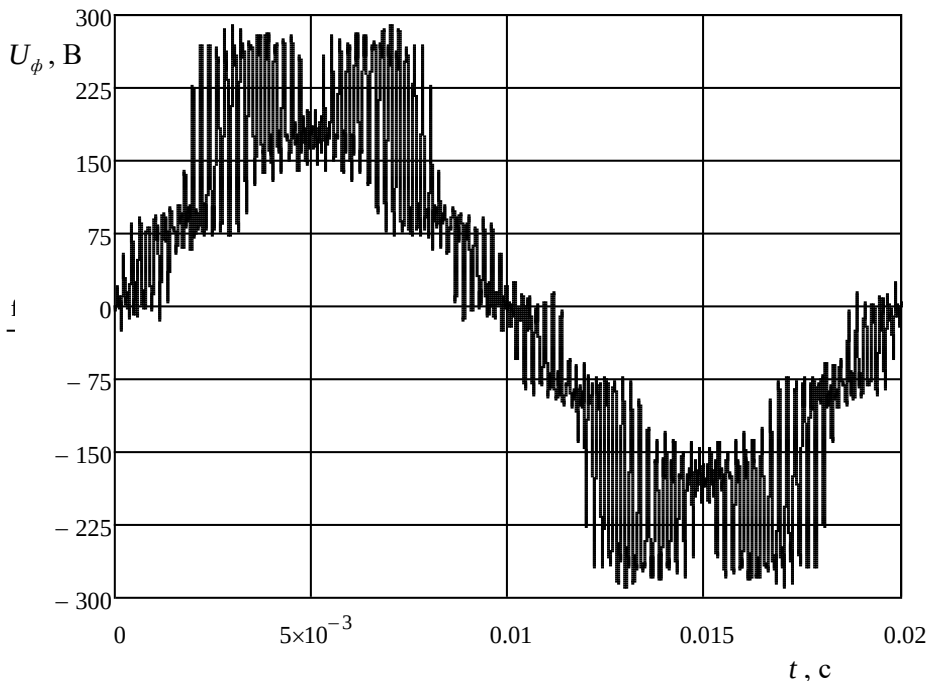


Рис. 3. Аппроксимация рядом Фурье фазного напряжения, формируемого широтно-импульсной модуляцией при законе коммутации, приведенном на рис. 2

Таблица 2

Значения коэффициентов ряда Фурье
при $f_1 = 50$ Гц, $f_{\text{ШИМ}} = 4,8$ кГц, $\nu = 48$, $U_1 = U_{1\text{max}}$

$b_1 = 214,5063$ В	$b_3 = -4,9196 \cdot 10^{-14}$ В	$b_5 = -23,071$ В	$b_7 = 11,3495$ В
$b_9 = -3,7158 \cdot 10^{-14}$ В	$b_{11} = 0,3268$ В	$b_{13} = -0,3196$ В	$b_{15} = -1,7593 \cdot 10^{-14}$ В
$b_{17} = -1,5449$ В	$b_{19} = 1,1498$ В	$b_{21} = 1,4674 \cdot 10^{-13}$ В	$b_{23} = 0,3071$ В
$b_{25} = -0,3059$ В	$b_{27} = 8,2658 \cdot 10^{-14}$ В	$b_{29} = -0,2323$ В	$b_{31} = 0,1426$ В
$b_{33} = 1,3091 \cdot 10^{-13}$ В	$b_{35} = 0,2995$ В	$b_{37} = -0,2976$ В	$b_{39} = -1,1842 \cdot 10^{-14}$ В

Анализ данных табл. 2 показывает, что действительно исключение «мертвого» времени при синусоидальной модуляции улучшает гармонический состав выходного напряжения инвертора, но незначительно, амплитуда 5-й гармоники уменьшается лишь до 10,8 %.

Если рассматривать частотный преобразователь как элемент системы электроснабжения, то также представляет интерес определение в соответствии с ГОСТ 32144-2013 суммарного коэффициента гармонических составляющих по формуле [15]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} b_n^2}}{b_1} \times 100, \% . \quad (4)$$

В соответствии с данными табл. 2 по выражению (4) подсчитан этот коэффициент, который оказывается равным $K_U = 12,03 \%$. Это позволяет сделать вывод, что в качестве источника системы электроснабжения инвертор с законом коммутации транзисторов, представленным на рис. 2, не соответствует требованию ГОСТ 32144-2013, по которому значение K_U для сетей 0,38 кВ не должно превышать 8 %. Следует также обратить внимание и на низкое действующее значение максимально достижимого фазного напряжения.

Анализ причин, приводящих к этому, позволяет сделать вывод, что часть периода ШИМ используется неэффективно, поскольку наблюдается состояние, когда оказывается включенным только один транзистор.

Однако система уравнений (1) и временные диаграммы, приведенные на рис. 2, показывают, что при $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ всегда соблюдается условие

$$\tau_B = \tau_A + \tau_C \text{ или } \gamma_B = \gamma_A + \gamma_C .$$

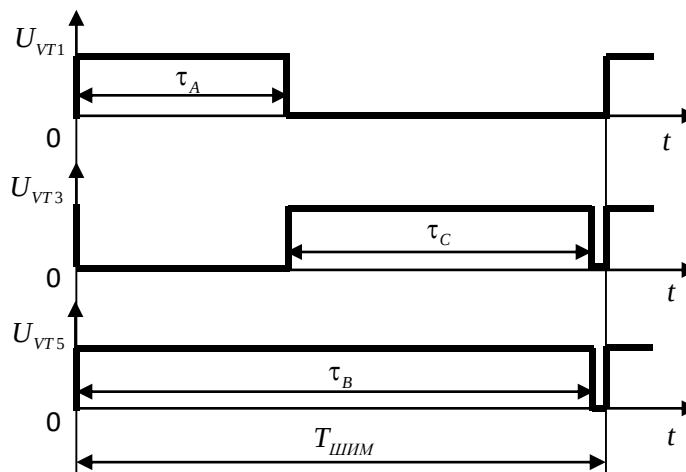


Рис. 4. Предлагаемый подход к подаче сигналов управления

силовыми транзисторами при $\theta = \frac{\pi}{8}$

Аналогичные соотношения могут быть получены для всего спектра возможных значений угла θ . Это позволяет предложить следующий подход к формированию синусоидальной ШИМ, представленный диаграммами сигналов управления силовыми транзисторами на рис. 4.

То есть предлагается в диапазоне углов $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$ импульс на открытие транзистора $VT3$ подавать при выключении транзистора $VT1$. При таком управлении транзисторными ключами синусоидальное фазное напряжение, формируемое с помощью ШИМ, представляет собой кусочно-постоянную функцию $f(\theta)$, принимающую только два значения 0 и $U_m^{s2} = \frac{U_d}{2}$ на различных участках угла θ (рис. 5).

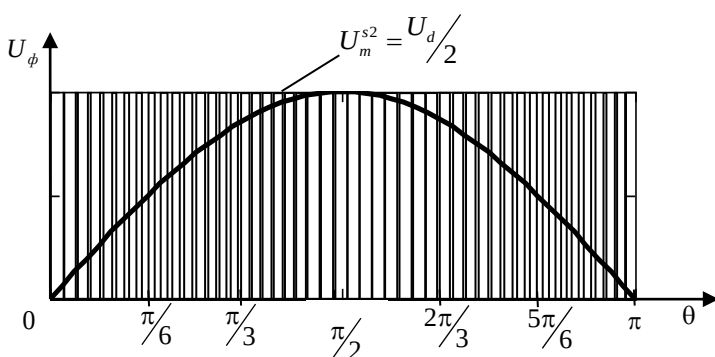


Рис. 5. Форма усредненного фазного напряжения на выходе частотного преобразователя при предлагаемом законе коммутации транзисторов, определенная на половине периода

Следует отметить, что на рисунке отражен случай, соответствующий максимальной величине амплитуды напряжения и отношению частот ШИМ и выходного напряжения, равному 96. То есть если максимальное напряжение соответствует номинальной частоте $f_{ном} = 50$ Гц, то при этом $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц.

Формула для определения среднеквадратического значения фазного напряжения

$$U_{rms.max}^{s2} = \frac{U_d}{2} \sqrt{\frac{1}{v} \sum_h^{v-1} \sin(h\theta_1)}. \quad (5)$$

Подсчет по формуле (5) при $f_1 = 50$ Гц, $f_{ШИМ} = 4,8$ кГц и $U_d = 515$ В показывает, что максимальная величина действующего значения фазного напряжения, которая может быть получена при предлагаемом способе коммутации силовых транзисторов, составляет $U_{rms.max}^{s2} = 215$ В. То есть за счет более эффективного использования периода ШИМ при работе силовых транзисторов действующее значение фазного напряжения возрастает, причем опять же не используется процедура введения «мертвого» времени при переключении транзисторов каждого полумоста.

Для определения гармонического состава выходного напряжения частотного преобразователя, формирующего фазное напряжение с помощью синусоидальной модуляции по законам, определяемым табл. 1 и рис. 4 и 5, найдено аналитическое выражение для нечетных коэффициентов гармонического ряда Фурье

$$b_n = -\frac{U_d}{n\pi} \sum_{h=1}^{v-1} \left\{ \cos \left[n\theta_1 (h + \sin(h\theta_1)) \right] - \cos(nh\theta_1) \right\}. \quad (6)$$

Следует отметить, что формула (1) справедлива именно для $U_1 = U_{1\max}$.

Для оценки адекватности формулы (6) по полученным с ее помощью коэффициентам построена аппроксимация фазного напряжения на выходе инвертора гармоническим рядом Фурье (рис. 6).

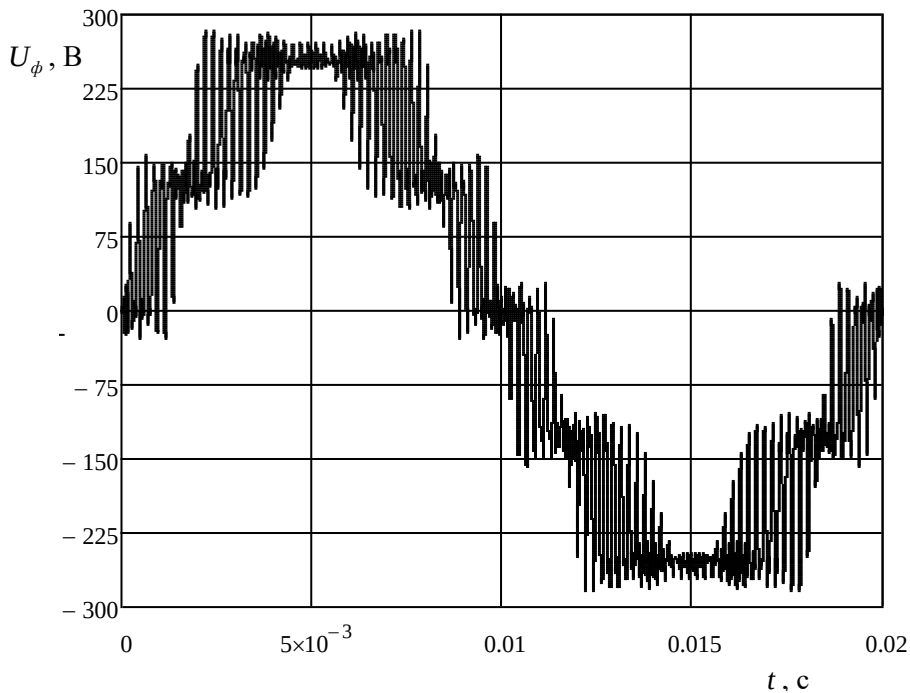


Рис. 6. Аппроксимация рядом Фурье фазного напряжения, формируемого инвертором при предлагаемом законе широтно-импульсной модуляции

Таблица 3

Значения коэффициентов ряда Фурье в случае применения предлагаемого закона коммутации силовых транзисторов при $f_1 = 50$ Гц, $f_{\text{ШИМ}} = 4,8$ кГц, $v = 48$,

$$U_1 = U_{1\max}$$

$b_1 = 257,362 \text{ В}$	$b_3 = 0,413 \text{ В}$	$b_5 = 1,531 \cdot 10^{-3} \text{ В}$	$b_7 = 7,334 \cdot 10^{-7} \text{ В}$
$b_9 = 3,983 \cdot 10^{-8} \text{ В}$	$b_{11} = 2,333 \cdot 10^{-10} \text{ В}$	$b_{13} = 1,333 \cdot 10^{-12} \text{ В}$	$b_{15} = 1,286 \cdot 10^{-13} \text{ В}$
$b_{17} = 1,194 \cdot 10^{-13} \text{ В}$	$b_{19} = 3,721 \cdot 10^{-13} \text{ В}$	$b_{21} = 1,852 \cdot 10^{-13} \text{ В}$	$b_{23} = 6,677 \cdot 10^{-14} \text{ В}$
$b_{25} = 8,063 \cdot 10^{-14} \text{ В}$	$b_{27} = 4,718 \cdot 10^{-14} \text{ В}$	$b_{29} = -7,154 \cdot 10^{-14} \text{ В}$	$b_{31} = -1,071 \cdot 10^{-13} \text{ В}$
$b_{33} = 6,453 \cdot 10^{-14} \text{ В}$	$b_{35} = -9,828 \cdot 10^{-14} \text{ В}$	$b_{37} = 1,968 \cdot 10^{-15} \text{ В}$	$b_{39} = 6,067 \cdot 10^{-14} \text{ В}$

Приведенная кривая является графическим отображением суммы из 301 члена ряда. Значения коэффициентов ряда Фурье с номерами с 1 по 39 приведены в табл. 3. Амплитуда первой гармоники фазного напряжения получилась равной 257,362 В, что на 20 % больше по сравнению с аналогичным параметром, представленным в табл. 2, а коэффициенты высших гармоник, наоборот, во много раз меньше. Действительно, суммарный коэффициент гармонических составляющих, посчитанный по формуле (4), равен $K_U = 0,16 \%$, что в 75 раз меньше полученного при неэффективном использовании периода ШИМ.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что предлагаемый закон коммутации транзисторов, представленный в табл. 1 и на рис. 4, является эффективным способом уменьшения амплитуд высших гармоник в выходном напряжении частотного преобразователя. Кроме того, следует отметить, что для его технической реализации необходимо только 2 широтно-импульсных модулятора, синхронизированных по времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
3. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). – М.: ЭФО, 2013. – 63 с.
4. Титяев Д.К., Мирошник Д.Н. Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции // Автоматизация технологических объектов и процессов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С. 301–306.
5. Герасимов И. Преимущества пространственно-векторной модуляции // Конструктор. Машиностроитель. – 2013. – № 4. – С. 24–25.
6. Коротков А.А., Виноградов А.Б. Новый алгоритм векторного формирования ШИМ высоковольтного преобразователя с минимизацией коммутационных потерь // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 1–7.
7. Паришин М.В., Самохвалов Д.В., Скурихин В.А. Сравнение КПД ШИМ синхронных электроприводов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2014. – № 4 (5). – С. 73–74.
8. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
9. Стариков А.В., Лисин С.Л., Рокало Д.Ю. Анализ качества выходного напряжения частотных преобразователей с простейшими законами коммутации силовых транзисторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – Самара: СамГТУ, 2018. – С. 128–134.
10. Кустов Д.А. Техническое диагностирование системы ПЧ-АД: магистерская диссертация. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017. – 89 с.
11. Стариков А.В., Кузнецов В.В., Рокало Д.Ю. Анализ гармонического состава трапецеидального фазного напряжения, формируемого частотным преобразователем // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2017. – № 3 (55). – С. 75–79.
12. Патент России № 2216850, МПК H03K7/08. Цифровой модулятор для преобразователя частоты асинхронного электродвигателя / А.В. Стариков, В.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.11.2003, Бюл. № 32.
13. Патент России № 2844070, МПК H03K7/08. Цифровой модулятор для преобразования частоты / С.Л. Лисин, Д.Ю. Рокало, А.В. Стариков (Россия) // Оpubл. 07.02.2018, Бюл. № 4.
14. Стариков А.В., Лисин С.Л., Рокало Д.Ю. Влияние широтно-импульсной модуляции на гармонический состав выходного напряжения частотного преобразователя // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 1 (61). – С. 153–166.
15. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2020 г.

METHOD FOR REDUCING THE AMPLITUDES OF HIGHER HARMONICS IN THE OUTPUT VOLTAGE OF THE FREQUENCY CONVERTER

A.V. Starikov, S.L. Lisin, O.S. Belyaeva, V.A. Kirdyashev

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

Abstract. Modern low-voltage frequency converters, built on the principle of stand-alone inverters with pulse-width modulation, have large amplitudes of higher harmonics in the output voltage. This adversely affects the operation of an asynchronous or synchronous motor connected to such a converter, since it causes a decrease in the efficiency of the AC machine. The analysis of the reasons for the poor harmonic composition of the output voltage of traditional inverters with sinusoidal pulse-width modulation is carried out and it is noted that the main one is the introduction of "dead" time when switching half-bridges every modulation period. The proposed method of sinusoidal modulation does not require the introduction of "dead" time. The modes of operation of power transistors with this switching method and control signal diagrams are considered. Analytical expressions are found that make it possible to determine the effective value of the output voltage of the frequency converter and the coefficients of higher harmonics for the proposed method of switching power transistors. The main reason for the low effective value of the phase voltage at the output of the inverter at sinusoidal pulse-width modulation is determined - the ineffective use of the switching period. The proposed method of sinusoidal modulation does not require the introduction of "dead" time, increasing the effective value of the output voltage and reducing the total harmonic component by 75 times. The diagrams of signals that control power transistors and provide a decrease in the amplitudes of higher harmonics at the output of the frequency converter are given. An approximation by the harmonic Fourier series of the output voltage of the inverter, obtained in the case of using the proposed method of switching power transistors, is made. It is noted that for the technical implementation of sinusoidal modulation, which provides small amplitudes of higher harmonics, only two pulse-width modulators are needed.

Keywords: frequency converter, phase voltage, pulse-width modulation, Fourier series, higher harmonics.

REFERENCES

1. Anuchin A.S. Control systems of electric drives. Moscow: Publishing house MEI, 2015. 373 p.
2. Sokolovsky G.G. AC Drives with Frequency Control, Moscow: Akademiya, 2006. 265 p.
3. Kalachev Yu.N. Vector regulation (practice notes), Moscow: Company "EFO", 2013. 63 p.
4. Tityaev D.K., Miroshnik D.N. Comparative analysis of vector and traditional pulse-width modulation. Automation of technological objects and processes, Donetsk: DonNTU, 2004. Pp. 301–306.
5. Gerasimov I. Advantages of Spatial Vector Modulation. Constructor. Machine builder, vol. 4, 2013. Pp. 24–25.
6. Korotkov A.A., Vinogradov A.B. A new algorithm for the formation of the PWM high-voltage converter with minimizing switching losses. Bulletin IGEU, vol. 4, 2013. Pp. 1–7.
7. Parsin M.V., Samokhvalov D.V., Ckurikhin V.A. Comparison of PWM efficiency of synchronous electric drives. Robotics and technical cybernetics 4 (5), 2014. Pp. 73–74.
8. Mikhailov O.P. Automated electric drive of machines and industrial robots. Moscow: Mechanical Engineering, 1990. 304 p.

Alexsandr V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Sergey L. Lisin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Olga S. Belyaeva, Graduate Student.
Viktor A. Kirdyashev, Graduate Student.

9. *Starikov A.V., Lisin S.L., Rockalo D.Yu.* The analysis of output voltage quality of frequency converters with the simple laws of power transistors switching, Bulletin of Samara State Technical University, Series: "Engineering sciences", vol. 2 (58), 2017. Pp. 128–134.
10. *Kustov D.A.* Technical diagnostics of the FC-AM system: master's thesis. Chelyabinsk: SUSU, 2017. 89 p.
11. *Starikov A.V., Kuznetsov V.V., Rockalo D.Yu.* Analysis of the harmonic composition of the trapezoidal phase voltage generated by the frequency converter, Bulletin of Samara State Technical University, Series: "Engineering sciences", vol. 3 (55), 2017. Pp. 75–79.
12. *Starikov A.V., Starikov V.A.* "Digital modulator for frequency converter of asynchronous motor", Patent of Russia No. 2216850, Date of publication: 20.11.2003, Bull. No 32.
13. *Lisin S.L., Rokalo D.Yu., Starikov A.V.* "Digital modulator for frequency conversion", Patent of Russia No. 2844070, Date of publication: 07.02.2018, Bull. No 4.
14. *Starikov A.V., Lisin S.L., Rockalo D.Yu.* Influence of the pulse-width modulation on the harmonic composition of the output voltage of a frequency converter, Bulletin of Samara State Technical University, Series: "Engineering sciences", vol. 1 (61), 2019. Pp. 153–166.
15. State Standard 32144-2013, Norms of power quality in general-purpose power supply systems, Moscow: Standardinform, 2014, 16 p.