



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021 Т. 29. №3

Самара

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021. Том 29. № 3

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

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

Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

В.К. Тянь (д.т.н., проф.)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2021. Том 29. № 3)

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

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

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

Подписано в печать 18.09.21
Выход в свет 30.09.21

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

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 22,5 п.л.
Уч.-изд. л. 22,0 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 151/21
Заказ № 551

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

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

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

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

© Авторы, 2021
© Самарский государственный
технический университет, 2021

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

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2021. Vol. 29. Issue 3

Founder – Samara State Technical University

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

Execute Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

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

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

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

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

The subscription index in Rospechat catalogue 18106
ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Батаев В.В.</i> Многофакторный анализ и оптимизация операций по реализации внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия.....	6
<i>Павлушин А.В.</i> Оптимизация конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной установки для закалки.....	38
<i>Плешивцева Ю.Э., Казаринов А.В., Деревянов М.Ю.</i> Многофакторный анализ процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки.....	52

Электротехника

<i>Абакумов А.М., Кузнецов П.К.</i> Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа.....	67
<i>Базаров А.А., Бондарева Н.В., Навардян А.А.</i> Устранение заклинивания запорной арматуры трубопровода.....	83
<i>Котенев В.И., Стулов А.Д.</i> Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и оценка его погрешности.....	98
<i>Кузнецов А.В., Юренков Ю.П., Аглиуллов А.И.</i> Технологические аспекты изготовления и подготовки макетных образцов жидкометаллических предохранителей к тепловым и коммутационным испытаниям.....	111
<i>Лысов В.Е., Поляков В.А.</i> Система автоматического управления мехатронным модулем.....	122

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 51-74

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИЙ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.В. Батаев

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

E-mail: bataev.63@mail.ru

***Аннотация.** Статья посвящена актуальной проблеме повышения эффективности внешнеэкономической деятельности предприятий металлургической и машиностроительной отраслей промышленности.*

Для повышения экономической эффективности функционирования промышленных предприятий в процессе реализации внешнеэкономической деятельности (ВЭД) предлагается алгоритм многофакторного анализа, включающий процедуру оптимизации системы взаимодействия предприятия с таможенными органами. При разработке и апробации алгоритма в качестве ключевых звеньев, определяющих повышение эффективности ВЭД предприятия, рассматриваются таможенные операции.

Для проведения многофакторного анализа сравнительной эффективности совершения импортных и/или экспортных таможенных операций формулируются задачи математического программирования на основе ССР модели ДЕА (Data envelopment Analysis) метода. Полученные в результате решения задач математического программирования относительные оценки эффективности позволяют выявить неэффективные или наименее эффективные экспортные и импортные таможенные операции.

На основе ориентированных взвешенных графов разработаны процедуры оптимизации следующих параметров таможенных операций: времени совершения таможенных операций, трудозатрат предприятия, финансовых издержек, связанных с соблюдением установленных запретов и ограничений внешнеторговой деятельности.

Апробация алгоритма осуществлена на примере промышленного предприятия металлургической отрасли промышленности АО «Арконик СМЗ», осуществляющего экспортные операции по реализации крышечной ленты собственного производства, а также импортные операции поставки лака, который является необходимым технологическим материалом для обеспечения производственного процесса ленты.

Принимаемые на основании сравнительных оценок полученных результатов оптимизации управленческие и операционные решения позволяют исключить неэффективные таможенные операции ВЭД промышленного предприятия.

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

Ключевые слова: ВЭД промышленного предприятия, таможенная операция, многофакторный анализ, DEA-метод, параметрическая оптимизация, метод графов, сравнительная оценка.

Введение

В условиях рыночной экономики осуществление промышленными предприятиями самостоятельной и независимой внешнеэкономической деятельности дает значительные преимущества. Внешнеэкономическая деятельность – это внешне-торговая, инвестиционная и иная деятельность, включая производственную кооперацию, в области международного обмена товарами, информацией, работами, услугами, результатами интеллектуальной деятельности (правами на них) [1].

Осуществляемая промышленными предприятиями ВЭД является неотъемлемой частью всей их финансово-хозяйственной деятельности. Внешнеэкономическая деятельность позволяет предприятиям расширять географию реализации на экспорт готовой продукции собственного производства за счет освоения новых внешних рынков. Кроме того, для целого ряда промышленных предприятий непрерывность производственного процесса достигается бесперебойными поставками импортного сырья, материалов и полуфабрикатов для производства готовой продукции, а своевременные закупки запасных частей, комплектующих и нового оборудования способствуют поддержанию в рабочем состоянии, модернизации и расширению производственных мощностей предприятий.

Однако осуществление ВЭД сопряжено с наличием административных барьеров в виде мер государственного регулирования внешнеэкономической деятельности. Одной из таких мер являются запреты и ограничения внешнеторговой деятельности, соблюдение которых участником ВЭД подтверждается посредством представления в таможенный орган разрешительных документов, выдаваемых федеральными органами исполнительной власти и иными уполномоченными организациями. Оформление и получение разрешительных документов, подтверждающих соблюдение установленных запретов и ограничений, влечет для предприятия – участника ВЭД непроизводственные издержки в виде дополнительных финансовых и временных затрат, в т. ч. трудозатрат на совершение персоналом предприятия дополнительных операций. Наличие административных барьеров негативно отражается на экономической эффективности производственной деятельности предприятия.

Для повышения экономической эффективности ВЭД промышленных предприятий в статье предлагается алгоритм многофакторного анализа и оптимизации отдельных таможенных операций, совершаемых должностными лицами предприятия во взаимодействии с таможенными органами.

1. Алгоритм многофакторного анализа и оптимизации

Разработанный алгоритм позволяет провести многофакторный анализ эффективности функционирования предприятия в процессе реализации ВЭД. Алгоритм включает процедуру оптимизации системы взаимодействия предприятия с таможенными органами, которая позволяет повысить эффективность выявленных неэффективных таможенных операций. При разработке и апробации алгоритма в качестве ключевых звеньев, определяющих повышение эффективности ВЭД предприятия, рассматривались таможенные операции, совершаемые сотрудниками предприятия во взаимодействии с таможенными органами.

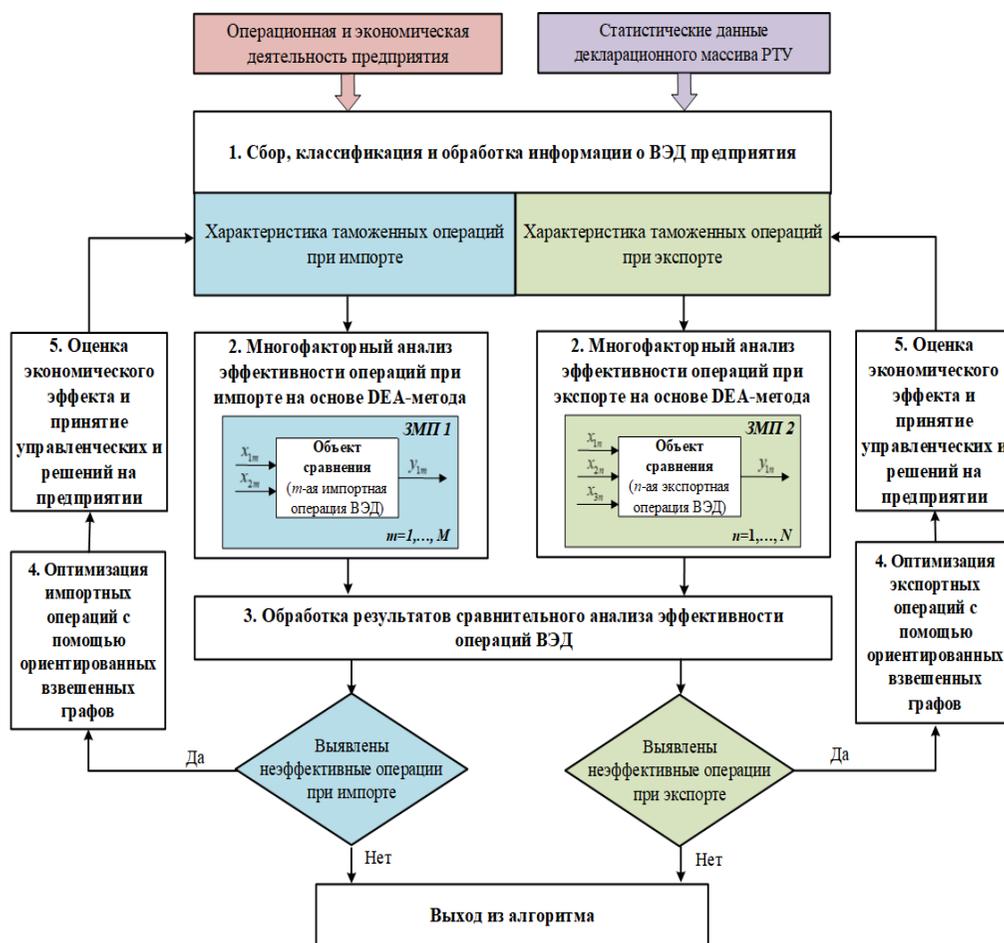


Рис. 1. Алгоритм многофакторного анализа и оптимизации эффективности операций ВЭД предприятия на основе метода графов и DEA-метода

Представленный алгоритм включает в себя следующие основные этапы (рис. 1):

1. Сбор, классификация и обработка информации о ВЭД предприятия. На данном этапе на основе изучения операционной и экономической деятельности промышленного предприятия и анализа статистических данных декларационного массива таможенных органов осуществляется сбор, классификация и обработка информации о внешнеэкономической деятельности промышленного предприятия. Для этого выделяются основные типы и характеристики совершаемых сотрудниками предприятия и должностными лицами таможенных органов таможенных операций. В зависимости от вида деятельности и отраслевой принадлежности исследуемого предприятия таможенные операции могут быть экспортными и/или импортными. В большинстве случаев крупные промышленные предприятия – участники ВЭД импортируют производственное оборудование и сырье (комплектующие) для производства продукции, а экспортируют готовую продукцию. В качестве анализируемых критериев могут быть выбраны такие характеристики та-

моженных операций, как количество товарных партий, масса и стоимость декларируемой продукции, сроки совершения таможенных операций, суммы трудовых затрат, величина финансовых расходов и др. Для проведения сравнительной оценки таможенные операции группируются по составу и количеству совершаемых действий и стадий, составляющих эти операции.

2. Многофакторный анализ эффективности операций ВЭД на основе DEA-метода. На следующем этапе оценивается сравнительная эффективность таможенных операций по реализации ВЭД промышленного предприятия, для чего проводится их многофакторный анализ на основе DEA (Data envelopment Analysis) метода [2]. Согласно методологии DEA-метода формулируются задачи математического программирования (ЗМП) с помощью ССR модели, результатом решения которых являются относительные оценки эффективности совершения импортных и/или экспортных таможенных операций.

3. На этапе обработки результатов сравнительного анализа эффективности таможенных операций выявляются неэффективные или наименее эффективные операции, которые необходимо оптимизировать для повышения общей эффективности внешнеэкономической деятельности предприятия. При этом выбранный метод DEA дает возможность получения сравнительных интегральных относительных многофакторных оценок и их визуализации в наглядной и легкой для понимания форме.

4. Для оптимизации выявленных неэффективных или наименее эффективных таможенных операций применяются ориентированные взвешенные графы, вершины которых представляют отдельные действия по совершению операций сотрудниками предприятия и должностными лицами таможенных органов. Весами ребер выступают анализируемые параметры, характеризующие таможенные операции (длительности совершения отдельных действий, величины трудовых затрат и финансовых издержек предприятия и т. п.) и рассматриваемые в качестве входов и/или выходов модели сравнительной оценки эффективности таможенных операций, построенной на основе DEA-метода на предыдущем этапе алгоритма. Задачи параметрической оптимизации решаются путем нахождения кратчайшего пути или максимального потока в графе от начальной вершины (регистрация ДТ) до конечной (выпуск (помещение) декларируемых товаров под заявленную таможенную процедуру). По результатам решения задач оптимизации разрабатываются предложения об исключении отдельных действий из операций или изменении их параметров (исключение отдельных вершин и изменение весовых значений ребер графа).

5. На заключительном этапе разработанного алгоритма многофакторного анализа проводится оценка экономического эффекта от внедрения предложений по оптимизации, по результатам которой на предприятии принимаются управленческие решения. Последовательная реализация этапов алгоритма при необходимости повторяется.

2. Анализ внешнеэкономической деятельности АО «Арконик СМЗ»

Апробация описанного выше алгоритма проведена на примере внешнеэкономической деятельности предприятия металлургической отрасли промышленности АО «Арконик СМЗ».

2.1. Сбор, классификация и обработка информации о ВЭД предприятия. Для оценки эффективности внешнеэкономической деятельности предприятия определены основные типы и характеристики совершаемых таможенных операций, связанных с осуществлением экспорта готовой продукции собственного производства и импорта технологических материалов, необходимых для обеспечения производственного процесса на АО «Аркионик СМЗ».

В качестве примера продукции собственного производства выбрана крышечная лента из алюминиевых сплавов для производства баночной продукции. Эффективность ВЭД, направленной на импорт технологических материалов, проанализирована на примере операций по импорту лака, предназначенного для лакирования крышечной ленты.

Технологической особенностью производства крышечной ленты является ее дополнительное покрытие (лакирование). Разработанная технология, подобранная оптимальная спецификация лака, режимы проката и сушки, проведение испытаний продукции на заводе и на стороне заказчиков позволяют сохранять необходимые механические свойства алюминиевой ленты. При этом затраты предприятия на лакирование крышечной ленты являются значительными, составляют до 15 % себестоимости продукции, уступая лишь стоимости сырья, и превышают расходы на такие технологические операции, как легирование, литье заготовок, нагрев и горячая прокатка, холодная прокатка и др. Именно доля технологического процесса лакирования в структуре себестоимости готовой продукции (крышечной ленты) послужила основанием для выбора данного вида лака в качестве примера для оценки эффективности совершения импортных таможенных операций.

2.2. Многофакторный анализ эффективности операций ВЭД на основе DEA-метода. Перечисленные в табл. 1 и 2 варианты совершения таможенных операций рассматриваются в качестве группы объектов для многофакторной сравнительной оценки эффективности в анализируемом календарном году.

Объектом многофакторного анализа при экспорте является n -ая таможенная операция, $n = \overline{1, N}$, где N – количество экспортных операций ВЭД в анализируемом году. Модель сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при экспорте товаров собственного производства (крышечная лента), разработанная согласно методологии DEA-метода [2], представлена на рис. 2.

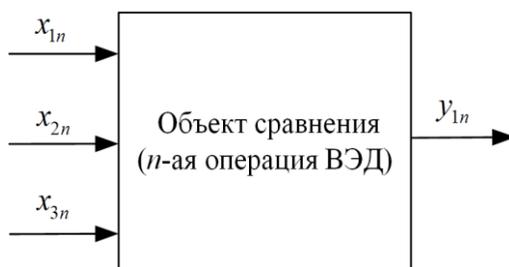


Рис. 2. Модель сравнительной оценки эффективности таможенных операций при экспорте

В результате анализа операционной и экономической деятельности исследуемого промышленного предприятия и статистических данных декларационного

массива Самарской таможни по учету внешнеторговых сделок в 2017–2020 гг. были определены 21 экспортная ($N=21$) и 10 импортных ($M=10$) таможенных операций. Варианты совершения операций отличаются между собой различными сочетаниями действий при таможенном декларировании и таможенном контроле товаров (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Структура и состав таможенных операций, совершаемых при импорте продукции

№	Варианты осуществления операций	Описание таможенных операций
1	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – форматно-логический контроль – выпуск товаров
2	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа – выпуск товаров
3	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрДокТО – Отв – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа – дополнительный запрос документов таможенным органом – ответ декларанта – выпуск товаров
4	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрРдокТО – ЗакрСВХ – ПредРдок – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа – дополнительный запрос разрешительных документов таможенным органом по результатам ответа декларанта – склад временного хранения закрытого типа – представление разрешительных документов – выпуск товаров
5	ПодДТ – ОтказАР ДТ – ОтказРегДТ – ЗакрСВХ	Подача ДТ – отказ в автоматической регистрации ДТ – отказ в регистрации ДТ должностным лицом таможенного органа – склад временного хранения закрытого типа – возврат на этап формирования и подачи ДТ
6	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – Вып	Подача ДТ – отказ в автоматической регистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – форматно-логический контроль – выпуск товаров
7	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – Вып	Подача ДТ – отказ в автоматической регистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа – выпуск товаров

№	Варианты осуществления операций	Описание таможенных операций
8	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – Вып	Подача ДТ – отказ в автоматической регистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта – выпуск товаров
9	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрРдокТО – ЗакрСВХ – ПредстРдок – Вып	Подача ДТ – отказ в автоматической регистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – форматно-логический контроль – запрос таможенного органа – ответ декларанта – дополнительный запрос разрешительных документов таможенным органом по результатам ответа декларанта – склад временного хранения закрытого типа – представление декларантом разрешительных документов – выпуск товаров
10	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – ЗакрСВХ – АТД – СведПодтв – Вып	Подача декларации на товары – отказ в автоматической регистрации декларации на товары – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – выявление профиля риска АТД – проведение таможенного досмотра – сведения, заявленные в ДТ, по результатам таможенного досмотра подтверждены – выпуск товаров

Таблица 2

Структура и состав таможенных операций, совершаемых при экспорте продукции

№	Варианты осуществления операций	Описание таможенных операций
1	ПодДТ – АР ДТ – АВ	Подача декларации на товары (ДТ) – автоматическая регистрация ДТ – автоматический выпуск товаров
2	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – форматно-логический контроль (ФЛК) – выпуск товаров
3	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – УслНеСобл – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – условия выпуска не соблюдены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
4	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа (ТО) – выпуск товаров
5	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – УслНе-	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос ТО – условия

№	Варианты осуществления операций	Описание таможенных операций
	Собл – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	выпуска не соблюдены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
6	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрДокТО – Отв - Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос ТО – дополнительный запрос документов таможенным органом – ответ декларанта – выпуск товаров
7	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрДокТО – Отв – УслНеСобл – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос ТО – дополнительный запрос документов таможенным органом – ответ декларанта – условия выпуска не соблюдены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
8	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрРдокТО – ПредстРдок – Вып	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос ТО – дополнительный запрос разрешительных документов ТО по результатам ответа декларанта – представление декларантом разрешительных документов – выпуск товаров
9	ПодДТ – АР ДТ – ОтказАВ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрРдокТО – НеПредстРдок – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – автоматическая регистрация ДТ – отказ в автоматическом выпуске товаров – ФЛК – запрос ТО – ответ декларанта на запрос ТО – дополнительный запрос разрешительных документов ТО по результатам ответа декларанта – разрешительные документы не представлены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
10	ПодДТ – ОтказАР ДТ – ОтказРегДТ	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – отказ в регистрации ДТ должностным лицом ТО – возврат на этап формирования и подачи ДТ
11	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос ТО – ответ декларанта на запрос ТО – выпуск товаров
12	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ОткВып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос таможенного органа – условия выпуска не соблюдены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
13	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрДокТО – Отв – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта на запрос ТО – дополнительный запрос документов таможенным органом по результатам ответа декларанта – ответ декларанта на запрос таможенного органа – выпуск товаров

№	Варианты осуществления операций	Описание таможенных операций
14	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрДокТО – Отв - УслНеСобл – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос ТО – ответ декларанта на запрос таможенного органа – дополнительный запрос документов таможенным органом по результатам ответа декларанта – ответ декларанта на запрос таможенного органа – условия выпуска не соблюдены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи декларации на товары
15	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв – ДопЗапрРДокТО – ПредстРдок – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос ТО – ответ декларанта – дополнительный запрос разрешительных документов таможенным органом по результатам ответа декларанта – представление декларантом разрешительных документов – выпуск товаров
16	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ФЛК – ЗапрТО – Отв - ДопЗапрРДокТО – НеПредстРдок – ОткВып (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – запрос таможенного органа – ответ декларанта – дополнительный запрос разрешительных документов ТО по результатам ответа декларанта – разрешительные документы не представлены – отказ в выпуске товаров – возврат на этап формирования и подачи ДТ
17	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – АД – СведПодтв – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – выявление профиля риска – проведение таможенного досмотра – сведения подтверждены – выпуск товаров
18	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – АД – ВыявлРасх – КДТ – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – ФЛК – выявление профиля риска – проведение таможенного досмотра – выявление расхождений в сведениях о товаре – корректировка ДТ – выпуск товаров
19	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – АД – ВыявлРасх – КДТ – ПредстРдок – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом таможенного органа – ФЛК – выявление профиля риска – проведение таможенного досмотра – выявление расхождений в сведениях о товаре – корректировка ДТ – представление разрешительных документов – выпуск товаров
20	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – АД – ВыявлРасх – КДТ – ПредстРдок – АП – Вып	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – выявление профиля риска – проведение таможенного досмотра – выявление расхождений в сведениях о товаре – корректировка ДТ – представление разрешительных документов – привлечение к административной ответственности – выпуск товаров
21	ПодДТ – ОтказАР ДТ – РегДТ – ВыявлПР – ФЛК – АД – ВыявлРасх – ОткВып – АП (возврат на предыдущий уровень)	Подача ДТ – отказ в авторегистрации ДТ – регистрация ДТ должностным лицом ТО – ФЛК – выявление профиля риска – проведение таможенного досмотра – выявление расхождений в сведениях о товаре – отказ в выпуске товаров – привлечение к административной ответственности – возврат на этап подачи ДТ

Характеристики таможенных операций внешнеэкономической деятельности в 2020 г. при импорте лака для производства крышечной ленты представлены в табл. 3, при экспорте крышечной ленты – в табл. 4. В первых столбцах табл. 3 и 4 приведены порядковые номера (см. табл. 1 и 2) выбранных для сравнительного анализа эффективности вариантов реализации ВЭД предприятием во взаимодействии с таможенными органами.

Таблица 3

Характеристики таможенных операций ВЭД при импорте лака для крышечной ленты за 2020 год

<i>m</i>	Количество товарных партий, шт.	Масса продукции, т	Прибыль от реализации продукции (крышечной ленты), тыс. руб.	Суммарное время совершения таможенных операций, час
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1	4	200.9	17875	6.4
2	3	155	13763	12
3	3	188.4	16615	21.6
4	3	149.1	13126	310.2
5	2	111.8	9846	11.2
6	3	117.1	10413	6
7	3	153.2	13570	13.2
8	2	149.5	13178	15.2
9	3	147.7	12969	311.4
10	1	35	3034	38.8
Σ	27	1407.7	124389	746
<i>m</i>	Трудозатраты предприятия на реализацию ВЭД, человеко-часы	Общие затраты на ВЭД, тыс. руб.		
		Затраты на ЗП сотрудников предприятия, реализующих ВЭД	Суммарные затраты, тыс. руб.	
<i>1</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>10</i>	
1	26	14.268	86.268	
2	21	11.601	83.601	
3	27	15.201	87.201	
4	36	19.935	115.935	
5	22	12.534	60.534	
6	19.5	10.701	58.701	
7	21	11.601	83.601	
8	18	10.134	82.134	
9	36	19.935	115.935	
10	13.5	7.545	31.545	
Σ	240	133.455	805.455	

**Характеристики таможенных операций ВЭД при экспорте
крышечной ленты за 2020 год**

п*	Количество товарных партий, шт.	Масса продукции, т	Прибыль от реализации продукции, тыс. руб.	Суммарное время совер- шения опера- ций, час	Трудозатраты предприятия на реализа- цию ВЭД, человеко- часы
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1	307	200.9	87691	540.7	1869
2	101	155	25208	671.6	554
4	39	188.4	7509	666	202
6	4	149.1	942	538.8	38
8	2	111.8	640	578.8	39
10	2	117.1	385	514.8	17
11	2	153.2	550	518.8	15
12	2	149.5	637	522.8	31
13	2	147.7	384	525.2	16
15	3	35	587	614.4	39
Σ	464	1407.7	124533	5692	2821
п*	Затраты на ЗП сотрудни- ков предпри- ятия, тыс.руб.	Дополнительные затраты предприятия на ВЭД, тыс. руб.			
		Заклучения ЦНИЭ, тыс.руб.	Простои трансп. средств, тыс.руб.	Суммарные затраты, тыс.руб.	
<i>1</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	
1	734.799	12	0	12	
2	217.915	96	0	96	
4	79.443	84	0	84	
6	16.462	36	0	36	
8	14.316	48	73	121	
10	5.927	24	0	24	
11	4.747	12	0	12	
12	12.578	24	0	24	
13	7.055	24	0	24	
15	16.021	36	110	146	
Σ	1109.263	396	184	80	

Входными параметрами x_{jn} , $j = \overline{1,3}$, $n = \overline{1,N}$ модели сравнительной оценки эффективности экспортных операций ВЭД являются следующие показатели:

– x_{1n} – трудозатраты сотрудников предприятия, осуществляющих операций ВЭД при экспорте [человеко-часы/год], характеризующие выполняемую сотрудниками предприятия работу за календарный год (табл. 4, столбец 6);

– x_{2n} – затраты на заработную плату сотрудников предприятия [руб./год], осуществляющих операции ВЭД при экспорте за календарный год (табл. 4, столбец 7);

– x_{3n} – дополнительные затраты предприятия, возникающие в связи с необходимостью оформления разрешительных документов в области экспортного контроля (экспертных заключений) и простоем транспортных средств перед погрузкой [тыс. руб./год], суммируемые по каждой n -ной таможенной операции ВЭД за календарный год (табл. 4, столбец 10).

Выходным параметром $y_{1n}, n = \overline{1, N}$ модели сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при экспорте крышечной ленты является отношение прибыли предприятия от экспорта данной продукции при осуществлении n -ной таможенной операции к суммарному времени технологических операций и операций [тыс. руб./час], осуществляемых сотрудниками таможни, за календарный год, определяемое по формуле

$$y_{1n} = \frac{P_n}{T_{1n}}, \quad (1)$$

где P_n – годовая прибыль предприятия от реализации товара по n -ной таможенной операции при экспорте крышечной ленты [тыс. руб./год] (табл. 4, столбец 4);

T_{1n} – суммарное время, учитывающее длительность технологических операций по производству крышечной ленты и сроки совершения таможенных операций, за год по n -ной таможенной операции ВЭД [час/год] (табл. 4, столбец 5).

Исходные численные данные для модели сравнительной оценки эффективности совершенных в 2020 году таможенных операций, связанных с экспортом крышечной ленты, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Исходные данные для модели сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при экспорте продукции в 2020 г.*

№ таможенной операции	Входные параметры			Выходной параметр
	x_{1n}	x_{2n}	x_{3n}	y_{1n}
1	1869,14	734799	12000	162,18
2	554,32	217915	96000	37,53
4	201,76	79443	84000	11,27
6	37,66	16462	36000	1,75
8	39,15	14316	121440	1,11
10	17,10	5927	24000	0,75
11	15,32	4747	12000	1,06
12	31,00	12578	24000	1,22
13	16,14	7055	24000	0,73
15	39,15	16021	146160	0,95

* В 2020 году не применялись операции №№ 3, 5, 7, 9, 14, 16–21.

Формулировка задачи математического программирования (ЗМП) для определения сравнительной оценки E_n эффективности таможенных операций ВЭД при экспорте крышечной ленты на основе базовой ССР модели DEA-метода может быть представлена в виде:

$$E_n = \frac{u_{1n}y_{1n}}{\sum_{i=1}^3 v_{in}x_{in}} \rightarrow \max_{(U,V) \in G}; \quad (2)$$

$$\frac{u_{1n}y_{1n}}{\sum_{i=1}^3 v_{in}x_{in}} \leq 1, \forall (n = \overline{1, N}; u_{1n} \geq 0; v_{in} \geq 0, i = \overline{1, 3}), \quad (3)$$

где $U = u_{1n}$; $V = (v_{in}), i = \overline{1, 3}$ – векторы весовых коэффициентов для входных и выходных параметров, характеризующих n -ную операцию в анализируемой группе.

Задача (2)–(3) при $n = \overline{1, N}$ представляет собой N ЗМП, решение которых позволяет определить относительные значения оценок эффективности E_n для N таможенных операций ВЭД при экспорте. Оценки E_n распределены на единичном интервале $[0, 1]$. Таможенные операции ВЭД с оценкой, равной $E_n = 1$, считаются наиболее эффективными в анализируемой группе.

Полученные в результате решения ЗМП (2)–(3) численные значения относительных оценок эффективности представлены в табл. 7 для 10 реализованных в 2020 году предприятием таможенных операций ВЭД при экспорте крышечной ленты. В соответствии с нумерацией в табл. 1 реализованные в 2020 году операции имеют порядковые номера $n = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 13, 15$.

Объектом многофакторного анализа при импорте является m -ная таможенная операция, $m = \overline{1, M}$, где M – количество импортных операций ВЭД в анализируемом году. Модель сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при импорте товаров, разработанная согласно методологии DEA-метода [2], представлена на рис. 3.

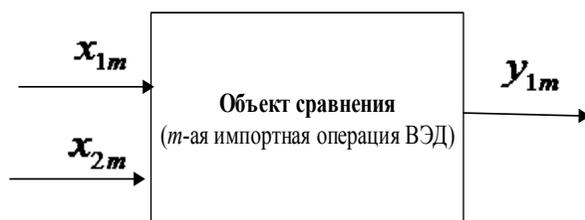


Рис. 3. Модель сравнительной оценки эффективности таможенных операций при импорте

Входными параметрами $x_{km}, k = \overline{1, 2}, m = \overline{1, M}$ модели сравнительной оценки эффективности импортных операций ВЭД являются следующие показатели:

– x_{1m} – трудозатраты сотрудников предприятия при осуществлении импортных операций ВЭД [человеко-часы/год], которые характеризуют работу, выполненную сотрудниками предприятия за календарный год (табл. 3, столбец 7);

– x_{2m} – общие затраты предприятия, включающие затраты на заработную плату сотрудников предприятия при осуществлении импортных операций ВЭД и дополнительные затраты предприятия при импорте товаров [тыс. руб./год], которые возникают в связи с необходимостью оформления разрешительных документов (деклараций о соответствии) и определяются путем суммирования всех дополнительных затрат по каждой m -ной таможенной операции ВЭД за календарный год (табл. 3, столбец 10).

Выходным параметром $y_{1m}, m = \overline{1, M}$ модели сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при импорте лака для крышечной ленты является отношение прибыли предприятия от экспорта крышечной ленты при осуществлении m -ной таможенной операции ко времени совершения импортных таможенных операций за календарный год [тыс. руб./час], определяемое по формуле

$$y_{1m} = \frac{P_m}{T_{1m}}, \quad (4)$$

где P_m – годовая прибыль предприятия от реализации товара по m -ной таможенной операции при экспорте крышечной ленты [тыс. руб./год] (табл. 3, столбец 5);

T_{1m} – суммарное время, учитывающее длительность технологических операций по производству крышечной ленты и время, затраченное сотрудниками таможни на оформление товарных партий за год по m -ной таможенной операции ВЭД [час/год] (табл. 3, столбец 6).

Исходные численные данные для модели сравнительной оценки эффективности совершенных в 2020 году таможенных операций, связанных с импортом лака для производства крышечной ленты, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Исходные данные для модели сравнительной оценки эффективности операций ВЭД при импорте продукции в 2020 г.

№ таможенной операции	Входные параметры		Выходной параметр
	x_{1m}	x_{2m}	y_{1m}
1	26,00	86268	2792,97
2	21,00	83601	1489,58
3	27,00	87201	827,55
4	36,00	115935	57,62
5	22,00	60534	1595,98
6	19,50	58701	2979,16
7	21,00	83601	1354,17
8	18,00	82134	1175,99
9	36,00	115935	57,40
10	13,50	31545	460,70

Формулировка задачи математического программирования (ЗМП) для определения сравнительной оценки S_m эффективности M таможенных операций ВЭД при импорте на основе базовой CCR модели DEA-метода может быть представлена в виде

$$S_m = \frac{u_{1m}y_{1m}}{\sum_{i=1}^2 v_{im}x_{im}} \rightarrow \max_{(U,V) \in G}; \quad (5)$$

$$\frac{u_{1m}y_{1m}}{\sum_{i=1}^2 v_{im}x_{im}} \leq 1, \forall (m = \overline{1, M}; u_{1m} \geq 0; v_{im} \geq 0, i = \overline{1, 2}), \quad (6)$$

где $U = u_{1m}$; $V = (v_{im})$, $i = \overline{1, 2}$ – векторы весовых коэффициентов для входных и выходных параметров, характеризующих m -ную операцию в анализируемой группе.

Задача (5)–(6) при $m = \overline{1, M}$ представляет собой M ЗМП, решение которых позволяет определить относительные значения оценок эффективности S_m для M таможенных операций ВЭД при импорте. Оценки S_m распределены на единичном интервале $[0, 1]$. Таможенные операции ВЭД с оценкой, равной $S_m = 1$, считаются наиболее эффективными в анализируемой группе.

Полученные в результате решения ЗМП (5)–(6) численные значения относительных оценок эффективности представлены в табл. 7 для 10 реализованных в 2020 году предприятием таможенных операций ВЭД при импорте лака для производства крышечной ленты.

Таблица 7

Оценки эффективности таможенных операций ВЭД за 2020 год*

При импорте лака для крышечной ленты		При экспорте крышечной ленты	
Номер операции m	S_m	Номер операции n	E_n
1	1	1	1
2	0.508	2	0.780
3	0.272	4	0.644
4	0.011	6	0.535
5	0.449	8	0.349
6	0.913	10	0.568
7	0.456	11	1
8	0.448	12	0.453
9	0.011	13	0.522
10	0.077	15	0.281

* В 2020 году не применялись экспортные операции № 3, 5, 7, 9, 14, 16–21.

2.3. *Обработка результатов сравнительного анализа эффективности таможенных операций.* Анализ представленных в табл. 7 результатов показывает, что в 2020 году наиболее эффективной с точки зрения соотношения полученной прибыли и затраченных трудовых и финансовых ресурсов экспортной операцией являлась операция № 1, характеризующаяся автоматической регистрацией декларации на товары (ДТ) и автоматическим выпуском декларируемого товара, с оценкой эффективности $E_1^{2020} = 1$. Такую же оценку эффективности имеет таможенная операция № 11 ($E_{11}^{2020} = 1$).

Самыми неэффективными таможенными операциями в 2020 году стали операции № 8 и № 15 с оценками $E_n < 0.4$. Низкие оценки объясняются тем, что данные операции сопряжены с необходимостью получения разрешительных документов в области экспортного контроля после регистрации ДТ. Соответственно, предприятие несет дополнительные временные и финансовые затраты, включая простои транспортных средств в ожидании выпуска товаров таможенными органами в соответствии с таможенной процедурой экспорта.

Анализ представленных в табл. 7 результатов показывает, что в 2020 году наиболее эффективной импортной операцией являлась операция № 1, которая характеризуется минимальными сроками выпуска ввозимого лака, включающими в себя лишь ФЛК, с оценкой эффективности $S_1^{2020} = 1$. Также высокую оценку эффективности ($S_6^{2020} = 0.913$) имеет таможенная операция № 6, отличающаяся от операции № 1 временем регистрации ДТ (1 час).

Самыми неэффективными импортными таможенными операциями в 2020 году стали операции № 4 и № 9 с оценками $S_m = 0.011$. Низкие оценки объясняются тем, что данные операции сопряжены с необходимостью получения разрешительных документов в области технического регулирования после регистрации ДТ. Соответственно, предприятие несет дополнительные временные и финансовые затраты, связанные со складским хранением ввезенной продукции.

Неэффективной также можно считать операцию № 10 с оценкой $S_m = 0.077$. Низкая оценка объясняется увеличенными сроками выпуска товаров в связи с проведением таможенными органами фактического контроля в форме таможенного досмотра.

Отличительной особенностью операций № 4 и № 9 при импорте и № 8 и № 15 при экспорте является необходимость представления в процессе таможенного контроля разрешительных документов, что значительно увеличивает сроки выпуска товаров.

Для повышения эффективности ВЭД предприятия разработаны процедуры оптимизации таможенных операций с помощью ориентированных взвешенных графов.

2.4. *Оптимизация таможенных операций с помощью ориентированных взвешенных графов.* Последовательность совершения технологических операций, связанных с производством крышечной ленты, и таможенных операций, совершаемых при таможенном декларировании и таможенном контроле импортируемого лака для производства крышечной ленты, схематично показана на ориентированном взвешенном графе (рис. 5). Числовые значения весов ребер графа образуют суммарную длительность совершения таможенных операций в часах. Вершины

графа в форме квадрата означают технологические этапы производственного процесса по изготовлению крышечной ленты, а в форме круга – таможенные операции, связанные с таможенным оформлением лака для производства ленты крышечной.

Таможенные операции, соответствующие путям графа с наибольшими весовыми значениями ребер, являются наиболее затратными по времени и нуждаются в оптимизации за счет сокращения отдельных стадий или их исключения из общей цепочки совершаемых действий. На графе такая оптимизация реализуется путем удаления по результатам расчетов графа соответствующих вершин и ребер или минимизации их весовых значений.

С помощью представленного графа проведены расчеты всех возможных путей от начальной вершины графа до конечной вершины. Проведенные расчеты позволили выявить кратчайшие пути, означающие эффективные операции, а расчет максимального потока выявил ребра и вершины графа, обозначающие стадии неэффективных операций № 4 и № 9.

В качестве предложений по оптимизации выявленных неэффективных таможенных операций предлагается исключить вершины и ребра, являющиеся самыми весомыми составляющими максимального потока.

Исключение двух вершин и четырех ребер (пунктирные линии на рис. 6) позволило значительно сократить суммарную длительность неэффективных таможенных операций № 4 и № 9.

Сравнение результатов проведенного на основе DEA-метода многофакторного анализа эффективности таможенных операций ВЭД до и после оптимизации представлено на диаграмме (рис. 4). Левые столбцы показывают оценки эффективности операций до оптимизации, правые – после оптимизации.

Результаты многофакторного анализа демонстрируют существенное повышение эффективности операций № 4 и № 9. При этом предлагаемая оптимизация касается всех вариантов совершения таможенных операций, т. к. исключаются затраты на оформление разрешительных документов (табл. 3, столбец 9).

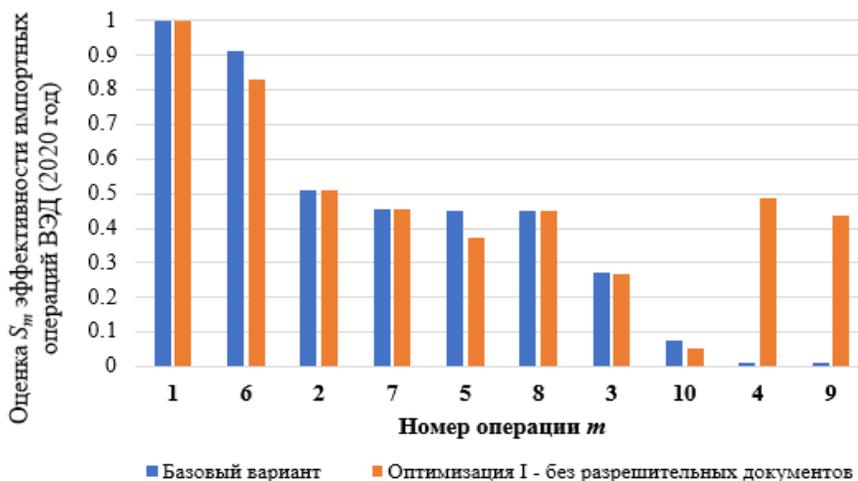


Рис. 4. Ранжированные оценки S_m относительной эффективности таможенных операций при импорте лака для крышечной ленты за 2020 год

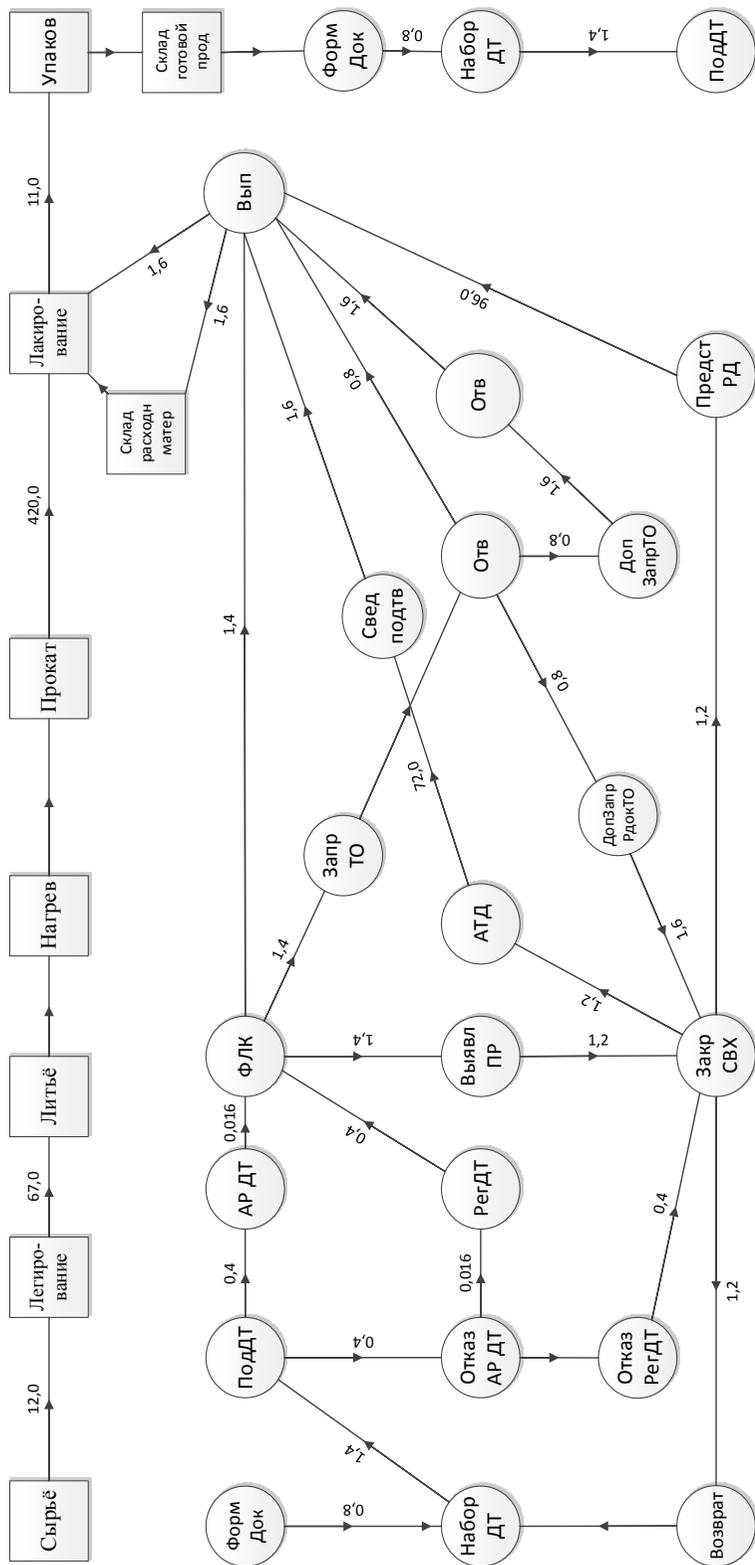


Рис. 5. Совершение импортных таможенных операций в отношении лака для крышечной ленты (исходное состояние)

Итоги оптимизации импортных операций в сравнении с их исходными (базовыми) состояниями в абсолютных показателях приведены на рис. 7 и 8. Для объективности оценок данные для расчетов взяты за 4 полных календарных года (2017–2020 гг.). Столбиками слева показаны исходные значения (базовый вариант), столбиками справа – расчетные данные, полученные в результате оптимизации.

Из диаграммы (см. рис. 7) видно, что по результатам оптимизации суммарные трудозатраты предприятия на осуществление внешнеэкономической деятельности, измеряемые в человеко-часах, снижаются на 11–12 %. Суммарные финансовые расходы предприятия после оптимизации уменьшаются в 6–7 раз.

И трудозатраты, и расходы предприятия на реализацию ВЭД в модели сравнительной оценки эффективности таможенных операций при импорте являются входными параметрами. Соответственно, уменьшение значений этих параметров оказывает положительное влияние на общую оценку эффективности.

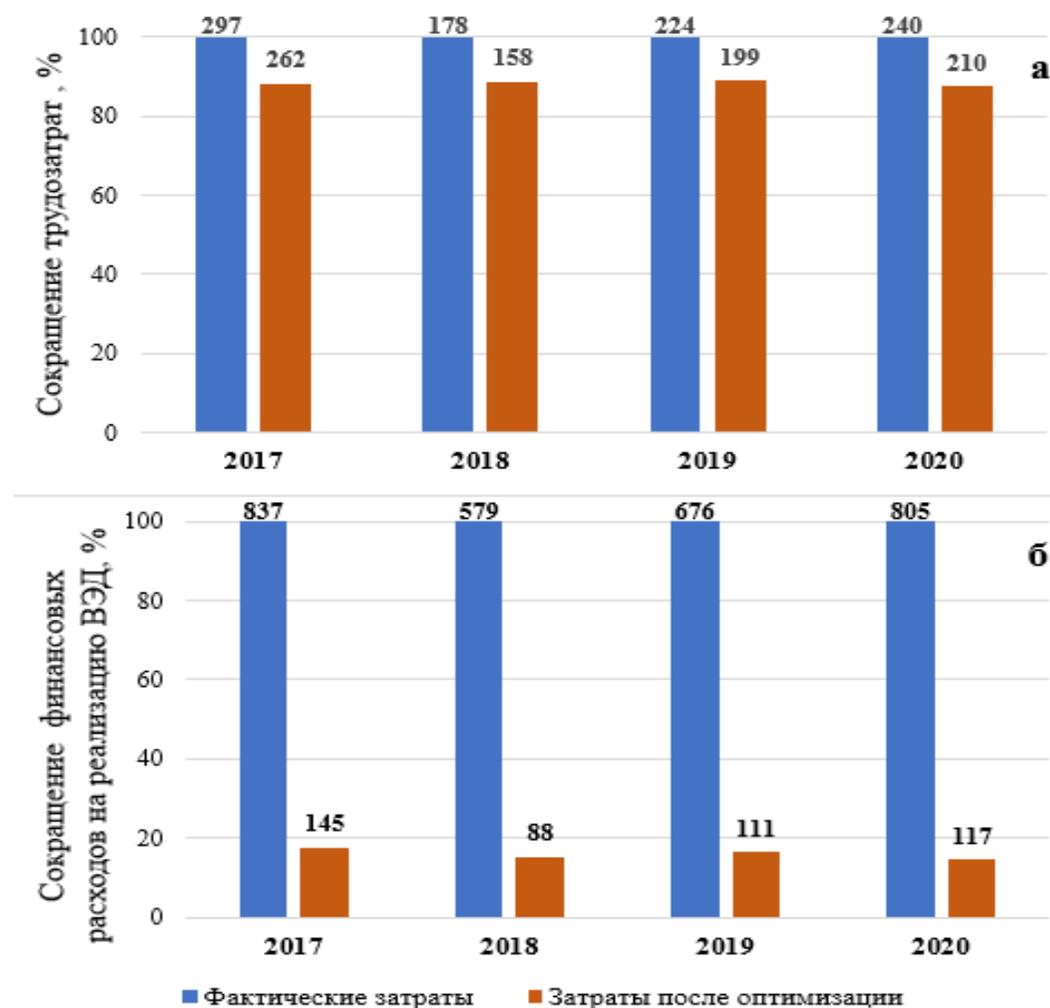


Рис. 7. Затраты на ВЭД при импорте лака для крышечной ленты:
а – трудозатраты, человеко-часы; *б* – расходы на реализацию ВЭД, тыс. руб.

Значение выбранного в качестве выходного параметра модели сравнительной оценки эффективности таможенных операций при импорте отношения прибыли промышленного предприятия от экспорта крышечной ленты к суммарным срокам совершения таможенных операций при декларировании лака для крышечной ленты за календарный год по результатам оптимизации увеличилось на 17–19 % за счет сокращения сроков совершения таможенных операций (см. рис. 8). Увеличение значения выходного параметра согласно базовой постановке DEA-метода свидетельствует об увеличении общей эффективности таможенных операций, совершаемых в процессе реализации ВЭД.

Таким образом, сравнительный анализ относительной эффективности таможенных операций, совершаемых при импорте продукции, и абсолютные оценки эффективности ВЭД исследуемого промышленного предприятия демонстрируют повышение эффективности ВЭД по результатам оптимизации импортных таможенных операций.

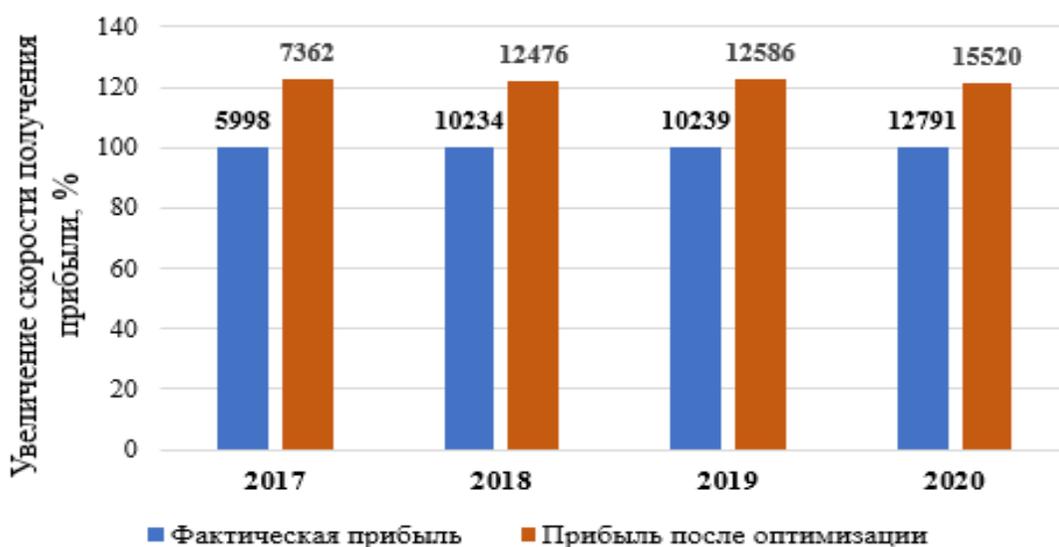


Рис. 8. Прибыль от ВЭД при импорте лака для ленты крышечной, тыс.руб./час

Последовательность совершения технологических операций, связанных с производством крышечной ленты, и вариантов таможенных операций, совершаемых при таможенном декларировании и таможенном контроле экспортируемой крышечной ленты, показана на графе (рис. 9). Числовыми значениями весов ребер графа обозначена длительность совершения операций в часах. Вершины графа в форме квадрата означают технологические этапы производственного процесса по изготовлению крышечной ленты, а в форме круга – таможенные операции, связанные с декларированием на экспорт крышечной ленты.

Экспортные операции № 8 и № 15 (табл. 2 и 4), являющиеся в 2020 г. неэффективными согласно многофакторному анализу на основе DEA-метода (табл. 7), характеризуются необходимостью представления в процессе таможенного контроля разрешительных документов, что влечет за собой увеличение сроков выпуска декларируемой экспортной продукции.

Оптимизация экспортных операций проводилась аналогично описанной выше процедуре оптимизации импортных операций с помощью ориентированных взвешенных графов путём исключения отдельных вершин и рёбер графа (пунктирные линии на рис. 11).

При этом предлагаемая оптимизация касается всех вариантов совершения таможенных операций, т. к. исключаются временные и финансовые затраты предприятия на оформление разрешительных документов (столбец 8 табл. 4).

В качестве дополнительных оптимизационных мер, способствующих повышению эффективности ВЭД предприятия, предлагается применять предусмотренную статьёй 115 ТК ЕАЭС [3] неполное таможенное декларирование экспорта готовой продукции собственного производства до ее фактического изготовления.

Изготовление крышечной ленты начинается с переплава полученного со склада основного сырья (первичный алюминий и лом) и легирующих элементов (медь и марганец). Длительность данной операции составляет 12 часов. Затем из полученного сплава в течение трех суток изготавливаются литые заготовки, которые перед тем, как попасть на прокатные станы, подвергаются фрезерованию и нагреву. После предварительной подготовки слитки подвергаются многократному горячему и холодному прокату, постепенно трансформируясь в ленту. После проката полученная лента подлежит термообработке (отжиг), резке и правке для достижения заданных геометрических параметров.

Из прокатного цеха лента попадает на линии лакирования, после которого доводится до окончательных размеров с помощью продольной и поперечной резки. Далее готовая крышечная лента поступает на склад готовой продукции.

Диапазон величины суммарного времени совершения таможенных операций может колебаться от нескольких минут при автоматической регистрации ДТ и автоматического выпуска товаров до нескольких дней в случае необходимости проведения таможенного досмотра или представления разрешительных документов.

На графе (рис. 12) схематично показана синхронизация времени совершения таможенных операций со временем производственного цикла. Ребра графа, показывающие синхронизируемые с технологическим процессом таможенные операции, выделены пунктирными линиями. Исключения составляют операции, связанные с предъявлением таможенным органам отдельных партий экспортируемой продукции для проведения таможенного досмотра (ребра графа, обозначенные сплошными линиями).

Оптимизация, связанная с синхронизацией технологических и таможенных операций (параллельное расположение квадратных и круглых вершин графа, рис. 12), позволяя, минуя склад, отгружать продукцию потребителю непосредственно после изготовления, за исключением случаев проведения таможенного досмотра и получения разрешительных документов.

В качестве третьего вида оптимизации предлагается объединение рассмотренных выше двух видов оптимизации. Синхронизация показана пунктиром; вершины и ребра, обозначающие получение разрешительных документов, удалены (рис. 13).

Исключение двух вершин и четырех ребер (пунктирные линии на рис. 10) значительно сокращает суммарную длительность неэффективных таможенных операций № 8 и № 15.

Диаграмма (рис. 10) демонстрирует результаты многофакторного анализа эффективности экспортных операций до оптимизации, после оптимизации по каждому из двух параметров, а также совместной оптимизации. Выявлено существенное повышение эффективности таможенных операций № 8 и № 15, которые до оптимизации являлись наименее эффективными по сравнению с иными операциями, совершаемыми при экспорте готовой продукции (крышечной ленты).

Результаты оптимизации экспортных операций в сравнении с их исходными (базовыми) состояниями в абсолютных показателях продемонстрированы на рис. 14 и 15. Данные для расчетов взяты за 4 полных календарных года (2017–2020 гг.). Левые столбцы показывают исходные значения (базовый вариант), правые – расчетные данные, полученные в результате оптимизации таможенных операций.

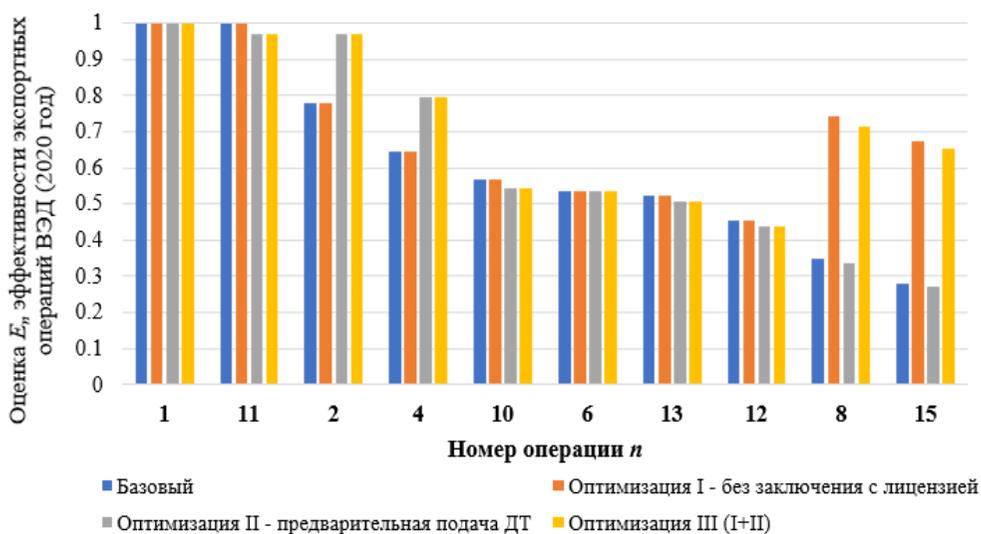


Рис. 10. Ранжированные оценки E_n таможенных операций при экспорте ленты крышечной за 2020 год с учетом трех видов оптимизации ВЭД

Данные диаграммы (рис. 14) демонстрируют по результатам оптимизации положительную динамику сокращения суммарных годовых трудозатрат предприятия на осуществление внешнеэкономической деятельности, измеряемые в человеко-часах. При этом наибольшие значения (5,7 %) достигнуты в 2018 году. Суммарные финансовые расходы предприятия после оптимизации уменьшаются на 30–40 %.

Трудозатраты и расходы предприятия на реализацию ВЭД выбраны в качестве входных параметров модели сравнительной оценки эффективности экспортных таможенных операций. Соответственно, уменьшение значений этих параметров оказывает положительное влияние на общую оценку эффективности ВЭД предприятия.

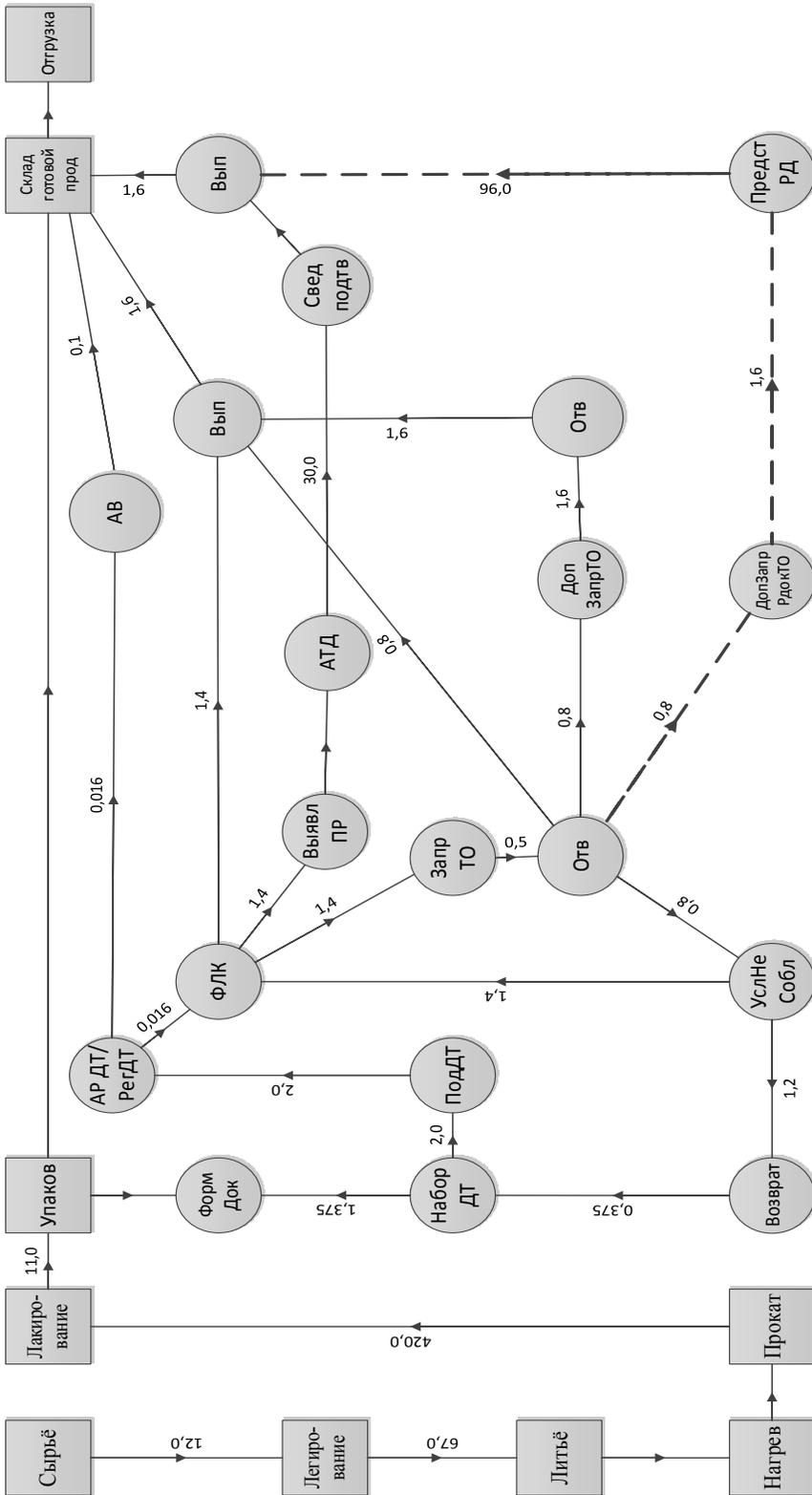


Рис. 11. Совершение экспортных таможенных операций в отношении крышечной ленты после оптимизации

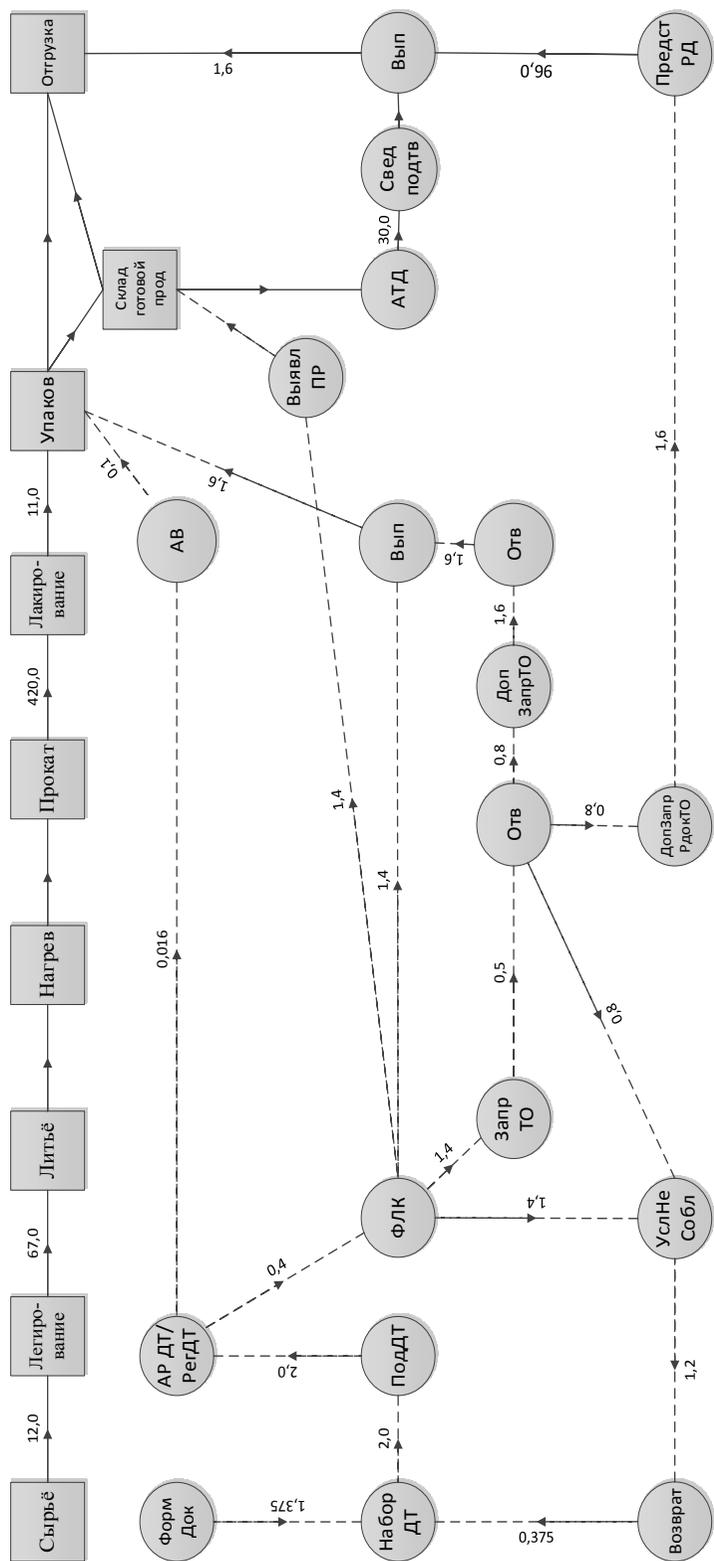


Рис. 12. Совершение экспортных таможенных операций в отношении крышечной ленты после оптимизации II

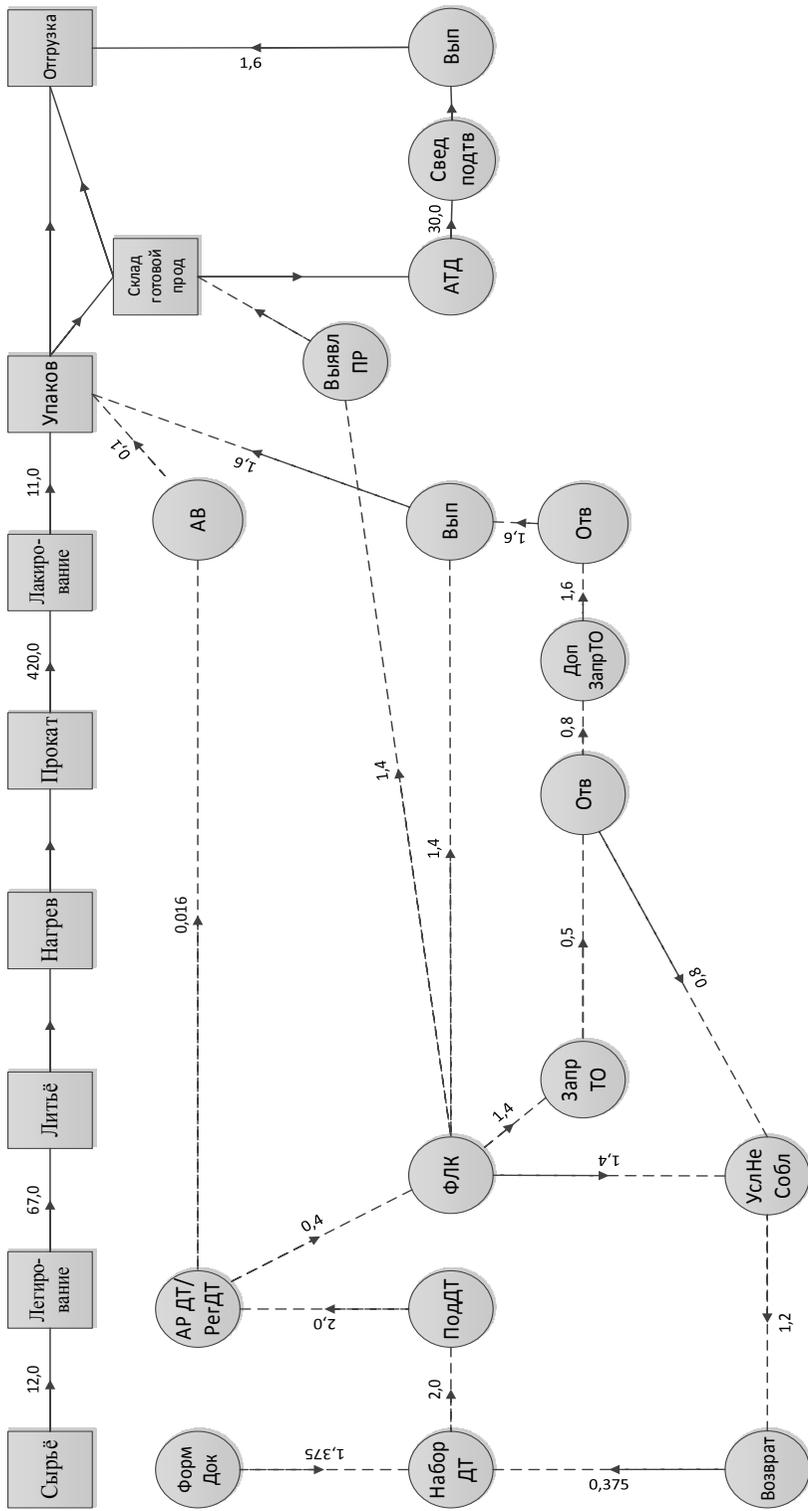


Рис. 13. Совершенные экспортных таможенных операций в отношении крышечной ленты после оптимизации III

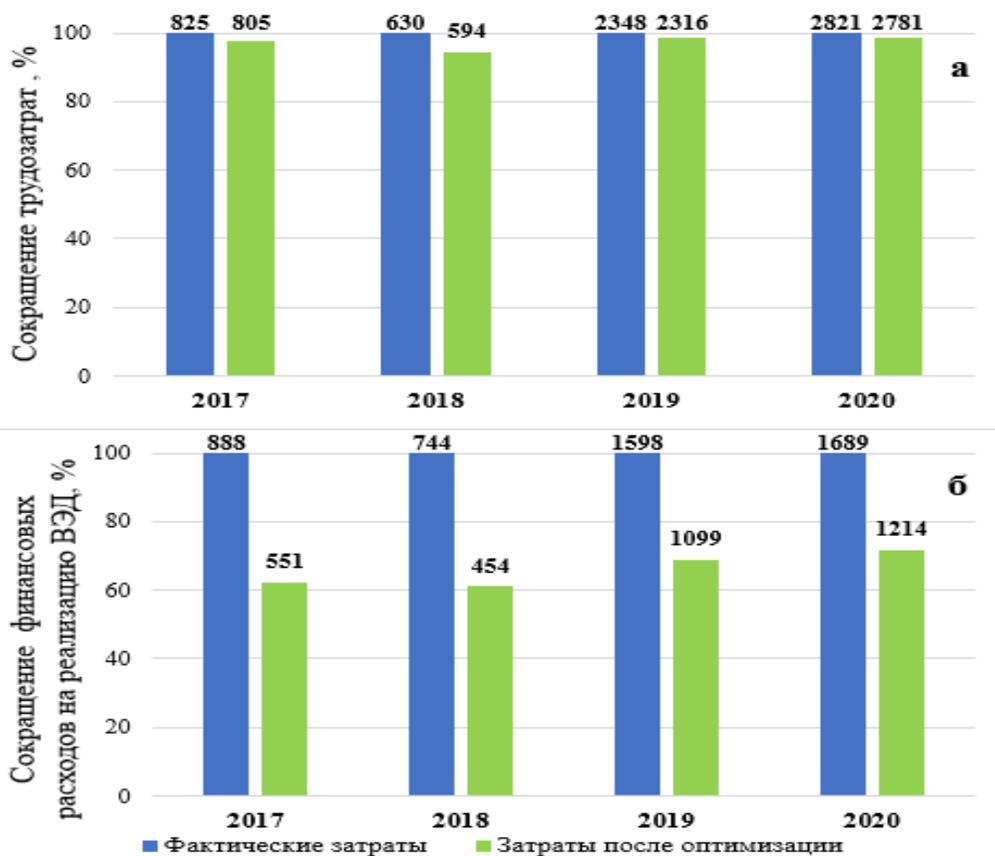


Рис. 14. Затраты на ВЭД при экспорте ленты крышечной:
 а – трудозатраты, человеко-часы; б – расходы на реализацию ВЭД, тыс. руб.



Рис. 15. Прибыль от ВЭД при экспорте ленты крышечной, тыс.руб./час

Значение выбранного в качестве выходного параметра модели сравнительной оценки эффективности экспортных таможенных операций отношения прибыли промышленного предприятия от экспорта крышечной ленты к суммарным срокам совершения таможенных операций при экспорте этой крышечной ленты показало наибольший рост (30 %) в 2019 году (рис. 15). Увеличение значения выходного параметра, практически характеризующего скорость получения прибыли от ВЭД, согласно базовой постановке DEA-метода и в остальные анализируемые годы свидетельствует об увеличении общей эффективности таможенных операций, совершаемых в процессе реализации ВЭД.

Заключение

В статье представлен алгоритм многофакторного анализа эффективности функционирования промышленного предприятия в процессе реализации ВЭД, включающий процедуру оптимизации системы взаимодействия предприятия с таможенными органами. Апробация алгоритма, осуществленная на примере промышленного предприятия металлургической отрасли промышленности АО «Арконик СМЗ», являющегося крупнейшим участником ВЭД, показала значительный экономический эффект от его применения.

Проведенный на основе метода DEA (Data Envelopment Analysis) многофакторный анализ выявил неэффективные импортные и экспортные таможенные операции в 2017–2020 гг. По результатам проведенного анализа предложены варианты параметрической оптимизации неэффективных операций с применением ориентированных взвешенных графов (просчет всех возможных путей, поиск кратчайших путей и максимальных потоков). Для оптимизации выбраны входные и выходные параметры: время совершения таможенных операций, трудозатраты предприятия, финансовые издержки, связанные с реализацией ВЭД.

Результаты расчетов, проведенных на основе метода DEA после параметрической оптимизации, показали повышение эффективности операций.

Таким образом, разработанные на основе DEA-метода алгоритм многофакторного анализа и процедуры многокритериальной оптимизации системы взаимодействия промышленного предприятия с таможенными органами могут использоваться для повышения эффективности ВЭД промышленного предприятия. Принятие на основании сравнительных оценок полученных результатов оптимизации управленческих и операционных решений позволят исключить неэффективные таможенные операции ВЭД промышленного предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 18.07.1999 № 183-ФЗ «Об экспортном контроле».
2. *Charnes A. Measuring the efficiency of Decision Making Units / A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes // European journal of operational research. – 1978. – Vol. 2. – Pp. 429–444.*
3. Таможенный кодекс Евразийского экономического союза (Приложение № 1 к Договору о Таможенном кодексе Евразийского экономического союза, принятому государствами – членами ЕАЭС 11 апреля 2017 года).
4. Указ Президента Российской Федерации № 1661 от 17.12.2011 «Об утверждении Списка товаров и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружений и военной техники и в отношении которых осуществляется экспортный контроль».
5. Федеральный закон от 03.08.2018 № 289-ФЗ «О таможенном регулировании в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

6. Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии № 294 от 25.12.2012 «О Положении о порядке ввоза на таможенную территорию Союза продукции (товаров), в отношении которой устанавливаются обязательные требования в рамках Союза».
7. *Барамзин С.В.* Управление качеством таможенной деятельности. – М.: Книга и бизнес, 2010. – 402 с.
8. *Макрусов В.В.* Теоретические положения и задачи системного анализа в таможенном деле // Заметки ученого. – Ростов-нД: Южный университет (ИУБиП), 2015. – С. 88–93.
9. *Макрусов В.В.* Системный анализ и управление в таможенном деле. – М.: Флинта, 2021. – 512 с.
10. *Афонин П.Н.* Системный анализ и управление в таможенном деле: Учеб. пособие. – СПб.: Интермедиа, 2017. – 372 с.
11. *Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W.* Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 1984. 30/9. Pp. 1078–1092.
12. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* *Data Envelopment Analysis: A comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Luxemburg: Springer Science & Business Media, LLC. 2007. 492 p.
13. *Дилигенский Н.В., Цапенко М.В.* Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений // Высшее образование, бизнес, предпринимательство 2001: Межвузовский сборник научных трудов – Самара: СамГТУ – ПИБ, 2001. – С. 149–159.
14. *Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М.* Анализ эффективности функционирования сложных систем // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1. – С. 2–7.
15. *Кривоножко В.Е., Лычев А.В.* Анализ деятельности сложных социально-экономических систем. – М.: Изд. отдел факультета ВМиК МГУ; МАКС Пресс, 2010. – 208 с.
16. *Киселев В.Г., Сухоедов Д.В.* Основы системного анализа и управления в таможенном деле: Учеб.-метод. пособие. – Н.Новгород, 2013.
17. *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.
18. *Анфилатов В.С.* Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика, 2017. – 368 с.
19. *Кобилев А.Г., Середин М.И.* Критерии оценки внешнеторгового потенциала промышленного предприятия // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2016. – С. 110–115.
20. *Родионова Е.С.* Особенности оценки эффективности внешнеторговой деятельности многоменклатурного предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2012.
21. *Bataev V.V.* System Analysis Methodology of an Industrial Enterprise for Managing the Foreign Economic Activity. *IEEE Xplore® Digital Library*. 2019. Pp. 719 – 723. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8962908/proceeding>.
22. *Батаев В.В.* Разработка системно-методических основ для повышения эффективности внешнеэкономической деятельности промышленных предприятий // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2021. – Т. 29. – № 1. – С. 6–18.
23. *Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A.* Simulation and evaluation of the efficiency of oil-contaminated wastes recycling system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 459 (2020) 042058 doi:10.1088/1755-1315/459/4/042058.
24. *Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Yu.E., Kordyukova L.S., Rapoport E.Ya.* Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 552 (2019) 012020 doi:10.1088/1757-899X/552/1/012020.

Статья поступила в редакцию 4 июня 2021 г.

MULTI-FACTOR ANALYSIS AND OPERATION OPTIMIZATION FOR THE IMPLEMENTATION OF FOREIGN ECONOMIC ACTIVITY AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

V.V. Bataev

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

Abstract. *The paper is devoted to the urgent problem of increasing the efficiency of foreign economic activity of enterprises of the metallurgical and machine-building industries. To increase the economic efficiency of industrial enterprises functioning in the process of implementing foreign economic activity, the paper proposes an algorithm for multivariate analysis, including the procedure for optimizing the system of interaction between an enterprise and customs authorities. When developing and testing the algorithm, customs operations are considered as critical links that determine the increase of the enterprise foreign economic activity efficiency. The mathematical programming problems are formulated on the basis of the CCR model of the DEA (Data envelopment Analysis) method to carry out a multivariate analysis of the comparative efficiency of import and/or export customs operations. The relative efficiency estimates obtained from solving mathematical programming problems make it possible to identify ineffective or least effective export and import customs operations. Based on directed weighted graphs, the special procedures have been developed to optimize the following parameters of customs operations: time of customs operations, labor costs of the enterprise, financial costs associated with compliance with the established prohibitions and restrictions of foreign trade. The algorithm was tested on the example of an industrial enterprise in the metallurgical industry – «Arkonik SMZ», which carries out export operations for the sale of lid tape of its own production, as well as import operations for the supply of varnish, which is a necessary technological material to ensure the production process of the tape. The administrative and operational decisions made on the basis of comparative evaluations of the obtained optimization results make it possible to exclude ineffective customs operations of foreign economic activity of an industrial enterprise.*

Keywords: *foreign economic activity of an industrial enterprise, customs operation, multi-factor analysis, DEA-method, parametric optimization, graph method, comparative assessment.*

REFERENCES

1. Federal Law No. 183-FZ dated July 18, 1999 «On Export Control».
2. Charnes A. Measuring the efficiency of Decision Making Units / A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes // European journal of operational research. – 1978. – Vol. 2. – Pp. 429–444.
3. The Customs Code of the Eurasian Economic Union (Annex No. 1 to the Treaty on the Customs Code of the Eurasian Economic Union, adopted by the EAEU Member States on April 11, 2017).
4. Decree of the President of the Russian Federation of December 17, 2011 No. 1661 «About approval of the List of goods and dual-use technologies which can be used during creation of arms and military equipment and concerning which export control is exercised».
5. Federal Law No. 289-FZ dated August 3, 2018 «On Customs Regulation in the Russian Federation and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation».
6. Decision of Board of the Eurasian Economic Commission of December 25, 2012 No. 294 «About Regulations on procedure for import to customs area of the Customs union of products (goods) concerning which mandatory requirements within the Customs union are established».
7. Baramzin S.V. Quality management of customs activity. M. Book and business. 2010. 402 p.
8. Makrusev V.V. Theoretical provisions and objectives system analysis in customs: a scientific paper. Rostov-on-Don: Southern University (IMBL), Notes of a scientist (journal), 2015. Pp. 88–93.
9. Makrusev V.V. System analysis and management in customs. Publishing House Flint, 2021. 512 p.

Vyacheslav V. Bataev, Associate Professor.

10. 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.
11. Banker R.D., Charnes A, Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30/9, 1984, pp. 1078–1092.
12. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. *Data Envelopment Analysis: A comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*. Luxemburg: Springer Science & Business Media, LLC, 2007, 492 p.
13. Diligensky N.V., Tsapenko M.V. DEA methodology: evaluation of the effectiveness of economic objects, analysis of the method and properties of solutions. Higher education, business, entrepreneurship 2001: Interuniversity collection of scientific papers – Samara: SamSTU – Volga Region Institute of Business (PIB), 2001. pp. 149–159.
14. Krivonozhko V.E., Propoy A.I., Senkov R.V., Rodchenkov I.V., Anokhin P.M. Performance analysis of complex systems. *Automation of design*. 1999. № 1. Pp. 2–7.
15. Krivonozhko V.E., Lychev A.V. Analysis of the performance of complex socio-economic systems. Moscow: Maks Press. 2010. 208 p.
16. Kiselev V.G., Sukhoyedov D.V. Fundamentals of system analysis and management in customs (Study guide); N.Novgorod, 2013; UDC 004.912(075), LBC 973. 2я7.
17. Suleymanova D.Y., Gumerov M.F. On the application of system analysis and modeling in solving problems of customs: scientific paper. M.: Publishing House «Science of Education». *Scientific Review (journal)*. 2014. pp. 933–935.
18. Anfilatov V.S. *System analysis in management*. M.: Finance and Statistics, 2017. 368 p.
19. Kobilev A.G., Seredin M.I. Criteria for assessing the foreign trade potential of an industrial enterprise. *Bulletin of the Rostov State University of Economics (RINH)*. 2016. pp. 110–115.
20. Rodionova E.S. Features of evaluating the effectiveness of foreign trade activities of a multi-nomenclature enterprise. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences*. 2012.
21. Bataev V.V. System Analysis Methodology of an Industrial Enterprise for Managing the Foreign Economic Activity. *IEEE Xplore® Digital Library*. 2019. Pp. 719 – 723. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8962908/proceeding>.
22. Bataev V.V. Development of system and methodological bases for improving the efficiency of foreign economic activity at industrial enterprises. *Bulletin of Samara State Technical University, Technical Sciences Series*, 2021. Vol. 29. № 1. Pp. 6–18.
23. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A. Simulation and evaluation of the efficiency of oil-contaminated wastes recycling system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 459 (2020) 042058 doi:10.1088/1755-1315/459/4/042058.
24. Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Yu.E., Kordyukova L.S., Rapoport E.Ya. Using DEA models to measure the efficiency of energy saving projects // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 552 (2019) 012020 doi:10.1088/1757-899X/552/1/012020.

УДК 621.785, 669.14, 519.6

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАКАЛКИ*

А.В. Павлушин

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

E-mail: alex1995i79@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается проблема оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки стального цилиндрического вала сложной геометрии, содержащего переход с малого диаметра на большой. Задача оптимального проектирования индуктора формулируется применительно к нелинейной двумерной численной модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей на стадии индукционного нагрева, разработанной в ППП ANSYS Mechanical APDL. Описаны этапы решения задачи оптимального проектирования на базе альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Алгоритм автоматической оптимизационной процедуры реализуется в ППП MATLAB, предоставляющем возможность интеграции численной ANSYS модели. Представлен сравнительный анализ результатов моделирования индукционной нагревательной системы с типовой квадратной формой витков и системы с витками индуктора усложненной геометрической формы, оптимизация которой позволила получить существенно более равномерное температурное распределение по границе закаливаемого слоя.

Ключевые слова: численное моделирование, альтернативный метод, оптимальное проектирование, индукционный нагрев, поверхностная закалка, электромагнитное поле, температурное распределение, ANSYS, MATLAB.

Введение

Шестерни, подшипники, валы и другие металлические детали различного назначения во время работы испытывают постоянные значительные осевые или радиальные нагрузки. Для повышения надежности и срока службы такие детали подвергаются термической обработке. Поверхностная закалка представляет собой один из наиболее распространенных способов термообработки, при котором металлическая деталь нагревается до определенной температуры, выдерживается заданное время при этой температуре и охлаждается со скоростью, необходимой для образования требуемых микроструктурных свойств. Поверхностное упрочнение позволяет получить сочетание требуемой твердости поверхностного слоя и необходимой прочности, ударной вязкости и пластичности сердцевины детали. Стадия нагрева технологии поверхностной закалки часто реализуется индукционным способом при использовании токов высокой частоты.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00232.

Павлушин Алексей Владимирович, инженер НИС кафедры «Автоматика и управление в технических системах», аспирант.

Основной целью исследования является оптимизация конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной установки для обеспечения максимально достижимой равномерности температурного распределения в поверхностном закаливаемом слое стального цилиндрического вала, содержащего переход с малого диаметра на большой [1].

Обеспечение равномерного заданного температурного распределения в поверхностном слое заготовок сложной геометрической формы является нетривиальной задачей, решение которой с требуемой точностью позволяет уменьшить растягивающие эквивалентные нагрузки и снизить риск появления микротрещин в процессе эксплуатации, что существенно улучшает качество изготавливаемых деталей в соответствии с постоянно возрастающими технологическими требованиями, предъявляемыми к ним.

Исследование влияния конструктивных и режимных параметров на равномерность температурного поля

Для исследования влияния конструктивных и режимных параметров на равномерность температурного поля в поверхностном слое заготовки, имеющей переход с одного диаметра на другой, в процессе ее нагрева под закалку были разработаны двумерные нелинейные численные модели в ППП ANSYS Mechanical APDL [1, 2].

Процесс моделирования включает несколько этапов. На первом этапе задаются необходимые физические свойства в ППП ANSYS Mechanical APDL [3, 4]. Далее по исходным данным (табл. 1) строится осесимметричная двумерная геометрия модели, выполняется присвоение заранее внесенных свойств материалов соответствующим областям, накладывается конечно-элементная сетка по специальному алгоритму, состоящему из набора инструментов и функций, предлагаемых программным пакетом. Далее решаются взаимосвязанные электромагнитная и тепловая задачи, которые в общем случае описываются известной системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье [1, 5–9]. Общий вид исходной геометрии системы «индуктор – заготовка» с типовой квадратной формой витков индуктора представлен на рис. 1.

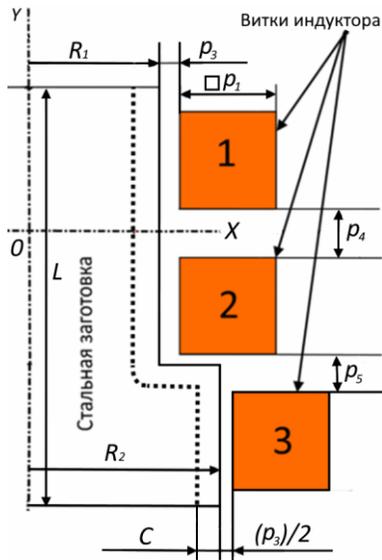
На рис. 1а показаны следующие конструктивные параметры, влияние которых на температурное поле исследуется в работе: p_1 (размер квадратного сечения витков), p_3 (расстояние, характеризующее положение витков относительно заготовки, – воздушный зазор), p_4 (расстояние между витками 1 и 2), p_5 (расстояние между витками 2 и 3). Кроме того, исследовалось влияние режимных параметров процесса нагрева: p_2 (силы тока на витках 1 и 3) и p_6 (силы тока на витке 2). Исходные данные для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

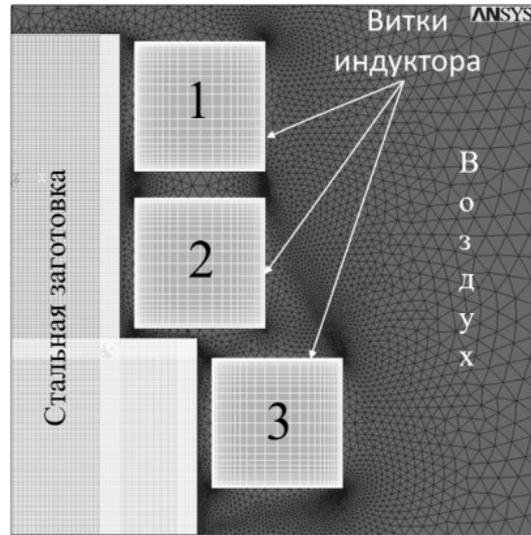
Исходные данные для моделирования

№	Наименование параметра	Значение
1	Начальная температура заготовки T_a , °C	20
2	Длительность стадии индукционного нагрева τ^0 , сек	10
3	Требуемая температура нагрева вдоль границы закаливаемого слоя T^* , °C	900
4	Высота заготовки L , мм	51

№	Наименование параметра	Значение
5	Длина границы закаливаемого слоя стальной заготовки, мм	60
6	Радиус заготовки $R1$, мм	11
7	Радиус заготовки $R2$, мм	19
8	Глубина поверхностного закаливаемого слоя C , мм	2
9	Типовая углеродистая сталь (марка)	C40



а



б

Рис. 1. Двумерная осесимметричная модель системы «индукционный нагреватель – стальная заготовка» с типовой квадратной формой витков:
 а – общий вид с обозначением конструктивных параметров;
 б – наложенная конечно-элементная сетка в ППП ANSYS

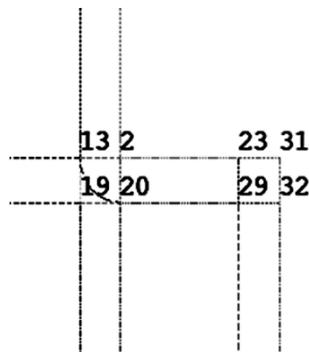


Рис. 2. Геометрия угловой зоны стальной заготовки с обозначениями точек в ППП ANSYS

Анализ результатов численного моделирования процесса индукционного нагрева заготовки, имеющей переход с одного диаметра на другой, демонстрирует сильное влияние угловой зоны на распределение электромагнитного поля, связанное с существенной вариацией плотности магнитного потока в указанной области, вследствие чего температурное распределение в этой области становится крайне неравномерным. При этом в области внутреннего угла заготовки, образованного границей закаливаемого слоя вдоль точек 13, 19 и 20 (рис. 2), наблюдается недопустимый недогрев, а внешний угол, образованный точками 23, 31 и 32 (рис. 2), недопустимо перегревается. При начальных значениях параметров $p_1 - p_6$ (табл. 2) максимальное отклонение температуры на границе закаливаемого слоя от требуемого значения T^* составило более 200 °С, что совершенно недопустимо.

Варьирование исследуемых параметров $p_1 - p_6$ в широком диапазоне позволило снизить температурное отклонение только до $\pm 156^\circ\text{C}$, что также совершенно не удовлетворяет технологическим требованиям. Соответствующие значения исследуемых параметров также представлены в табл. 2 (строка 2).

Таблица 2

Начальные и конечные значения исследуемых параметров

Значения	$p_1, \text{ мм}$	$p_2, \text{ А}$	$p_3, \text{ мм}$	$p_4, \text{ мм}$	$p_5, \text{ мм}$	$p_6, \text{ А}$
Исходные	13,00	1054,00	2,37	2,64	6,91	1079,00
Конечные	8,96	913,47	1,92	2,96	9,85	1221,13

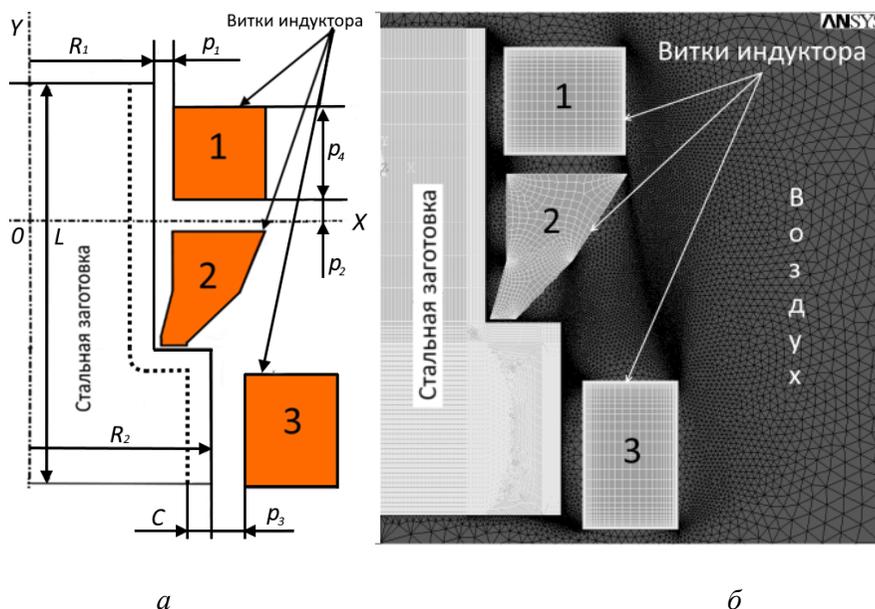


Рис. 3. Двумерная осесимметричная модель системы «индукционный нагреватель – стальная заготовка» с усложненной геометрией витка 2:
 а – общий вид с обозначением конструктивных параметров;
 б – наложенная конечно-элементная сетка в ППП ANSYS

Результаты моделирования привели к выводам, что квадратная форма геометрии витков, представленная на рис. 1, не дает возможности обеспечить требуемую равномерность нагрева закаливаемого поверхностного слоя стальной заготовки сложной формы. Поэтому предлагается перейти к более сложной геометрической форме витка 2 индуктора с выступающей внешней частью для уменьшения резкого отклонения температуры в угловой зоне заготовки. Общий вид системы «индуктор – заготовка» с витком усложненной формы представлен на рис. 3а. На рис. 3б представлена геометрия данной системы с наложенной конечно-элементной сеткой.

Для оптимизации конструктивных и режимных параметров ИНУ, представленной на рис. 3, далее формулируется задача оптимизации, которая решается на базе альтернативного метода оптимизации систем с распределенными параметрами [9].

Постановка задачи оптимального проектирования

Для формулировки задачи оптимизации стадии нагрева индукционная нагревательная система (рис. 3) рассматривается в качестве объекта управления с распределенными параметрами, который описывается представленной выше нелинейной двумерной численной моделью взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, разработанной в ППП ANSYS Mechanical APDL.

Оптимизируемый вектор \bar{P} параметров включает следующие конструктивные характеристики (рис. 3): p_1 – расстояние между витком 1 и заготовкой; p_2 – расстояние между витком 1 и координатой $Y=0$; p_3 – расстояние между витком 3 и заготовкой; p_4 – высота витка 1. Кроме того, вектор \bar{P} включает следующие режимные параметры процесса нагрева: p_5 – силу тока витка 2; p_6 – силу тока витка 1. Значение силы тока для витка 3 было найдено ранее и определено в качестве константы $I_3 = 1020,24A$.

Требование к результирующему температурному распределению в поверхностном слое заготовки в конце стадии предварительного нагрева металла под закалку целесообразно формулировать в виде задания максимально допустимой величины ε абсолютного отклонения результирующего температурного распределения от заданного значения T^* . В соответствии с этим в качестве критерия оптимизации предлагается рассматривать критерий, минимизирующий температурные отклонения в пределах границы закаливаемого слоя, показанного пунктирной линией на рис. 1а и 3а и находящегося на глубине $C=2$ мм от поверхности, который может быть записан в виде [10, 11]:

$$J = \max_{l \in [0, L]} \left| T(X, \tau^0, l_j, \bar{P}) - T^* \right| \rightarrow \min_{\bar{P}}, \quad (1)$$

где $T(X, \tau^0, l_j, \bar{P})$ – температура в конце стадии нагрева на границе закаливаемого слоя с координатой X , располагающейся на глубине C от поверхности заготовки;

τ^0 – время нагрева;

T^* – требуемая температура на границе поверхностного слоя [10, 11].

На выбранные оптимизируемые конструктивные и режимные параметры \bar{P} накладываются ограничения:

$$P_{1\min} \leq p_1 \leq P_{1\max}, P_{2\min} \leq p_2 \leq P_{2\max}, P_{3\min} \leq p_3 \leq P_{3\max}, P_{4\min} \leq p_4 \leq P_{4\max}, \quad (2)$$

$$I_{1\min} \leq I_1 \leq I_{1\max}, I_{2\min} \leq I_2 \leq I_{2\max}.$$

Задача оптимального проектирования индукционной нагревательной установки заключается в поиске таких значений параметров $\bar{P}^{\text{опт}} = (P_1^{\text{опт}}, P_2^{\text{опт}}, P_3^{\text{опт}}, P_4^{\text{опт}}, I_1^{\text{опт}}, I_2^{\text{опт}})$, на которые наложены ограничения (2), обусловленные характеристиками нагревательной системы, которые за установленное время τ^0 обеспечат перевод объекта, описываемого нелинейной численной двумерной ANSYS моделью, из исходного состояния в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (1) [10, 11].

Решение задачи оптимизации на основе альтернансного метода

Положительный опыт использования алгоритма на основе альтернансного метода для оптимизации температурного поля модели индукционного нагрева стальной заготовки цилиндрической формы позволяет сделать вывод о возможности его применения для работы с заготовкой сложной геометрической формы [1, 9, 10, 11, 12, 13]. Используемый метод в работе опирается на установленные свойства пространственных распределений температуры по объему заготовки в конце оптимальных процессов индукционного нагрева металла, подобные известным в математике свойствам наилучших приближений заданных функций к нулю. Теория альтернансного метода позволяет произвести процедуру точной редукции исходной задачи оптимизации к решению трансцендентных систем уравнений, замкнутых относительно всех искомым параметров [10, 11].

Согласно альтернансному методу, основное свойство распределения $T(X, \tau^0, l_j, \bar{P})$ состоит в том, что число K точек $l_j^{\text{опт}}$ в сечениях обрабатываемой заготовки вдоль границы закаливаемого слоя с координатой X , в которых достигаются предельно достижимые абсолютные отклонения конечной температуры от требуемой T^* , равные ε , всегда оказываются не меньше числа N искомым оптимизируемых параметров процесса, причем эти отклонения $T(X, \tau^0, l_j, \bar{P}) - T^*$ являются знакоперевающими в точках $l_j^{\text{опт}}, j = \overline{1, K}; \psi = \pm 1$, т. е. обладают альтернансным свойством [9].

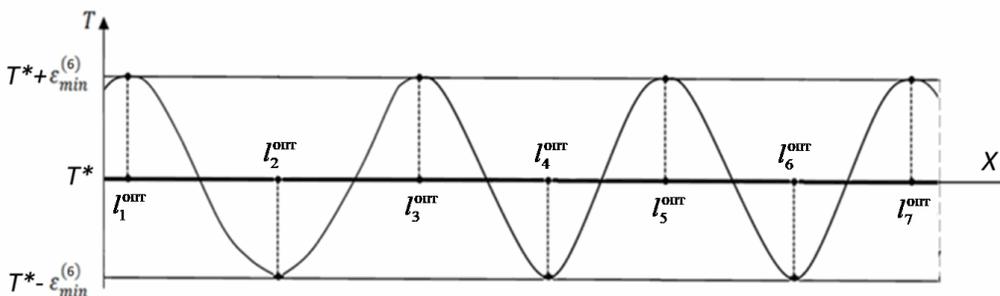


Рис. 4. Эталонная форма конечного температурного распределения в классе задач с шестью оптимизируемыми параметрами по критерию точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(6)}$

Для оптимального проектирования конструкции и нахождения оптимальных режимных значений параметров нагревательной установки скомпонован вектор из

шести оптимизируемых параметров, и, следовательно, прогнозируется формирование семи точек с максимальным отклонением температуры от требуемой. С учетом вышеописанного по данному методу за эталонную кривую принята форма конечного температурного распределения, которая представлена на рис. 4 [10, 11].

На основании альтернансного метода для сформулированной задачи составлена система из 14 уравнений, замкнутая относительно всех неизвестных:

$$\begin{aligned}
 T(X, \tau^0, l_j^{\text{опт}}, P^{\text{опт}}) - T^* &= (-1)^j \psi \varepsilon_{\min}^{(6)} j = 1, 7; \psi = \pm 1; \\
 \overline{P^{\text{опт}}} &= (p_1^{\text{опт}}, p_2^{\text{опт}}, p_3^{\text{опт}}, p_4^{\text{опт}}, I_1^{\text{опт}}, I_2^{\text{опт}}) \\
 0 &= I_1^{\text{опт}} \leq I_2^{\text{опт}} \leq I_3^{\text{опт}} \leq I_4^{\text{опт}} \leq I_5^{\text{опт}} \leq I_6^{\text{опт}} \leq I_7^{\text{опт}} = L; \\
 \frac{\partial T(I_m^{\text{опт}}, P^{\text{опт}})}{\partial l} - T^* &= 0; m = 1, 7,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где $I_1^{\text{опт}}, I_2^{\text{опт}}, I_3^{\text{опт}}, I_4^{\text{опт}}, I_5^{\text{опт}}, I_6^{\text{опт}}, I_7^{\text{опт}}$ – координаты точек экстремума, $\varepsilon_{\min}^{(6)}$ – значение предельно достижимой точности нагрева в классе задач с шестью неизвестными оптимизируемыми параметрами.

Система уравнений, составленная на основе альтернансного метода, решается в программном пакете MATLAB. Нахождение вектора оптимальных значений искомых параметров обеспечивается стандартной функцией MATLAB – LSQnonlin, которая позволяет решить задачу нахождения точки минимума некоторой целевой нелинейной функции $f(x)$ методом наименьших квадратов или подгонки кривой наименьших квадратов. При этом целевая функция формируется следующим образом:

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x (f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2), \tag{4}$$

где в общем случае $f(x)$ – вектор-функция; x – вектор-столбец искомых переменных [14, 15].

Численное решение задачи оптимизации

Исходные данные для численного решения задачи оптимизации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для решения задачи оптимизации

	Наименование параметра	Значение		
		Виток № 1	Виток № 2	Виток № 3
1	Сила тока, А	823,56	923,23	1020,24
2	Ширина витка, мм	12,72	-(табл. № 4)	10,00
3	Высота витка, мм	11,42	-(табл. № 4)	15,61
4	Расстояние между витками 1 и 2, мм	1,83		
5	Расстояние между витками 2 и 3, мм	6,51		
6	Частота тока, кГц	200		
7	Расстояние между витком 1 и заготовкой, мм	1,95		
8	Расстояние между витком 3 и заготовкой, мм	2,27		

Значения конструктивных параметров витка 2 сложной геометрической формы представлены в табл. 4.

Таблица 4

Геометрические характеристики витка сложной формы

Конструктивные размеры витка 2					
№	Расстояние от заготовки до точки по оси X, мм	Значение	№	Расстояние от заготовки до точки по оси Y, мм	Значение
1	до точки x12	2,19	7	до точки y12	15,67
2	до точки x34	2,19	8	до точки y34	6,64
3	до точки x11	14,76	9	до точки y11	15,67
4	до точки x10	9,17	10	до точки y10	6,64
5	до точки x35	0,37	11	до точки y35	0,44
6	до точки x36	3,16	12	до точки y36	0,44

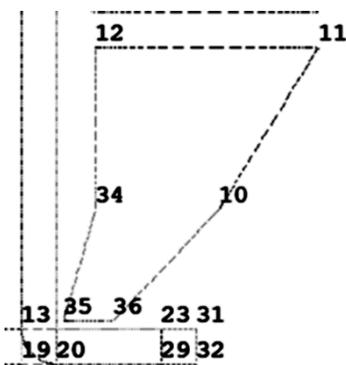


Рис. 5. Геометрия витка № 2 с обозначениями точек в ППП ANSYS

Следующим шагом производится запуск расчета оптимизационной процедуры, которая работает следующим образом (рис. 6). В ПП MATLAB алгоритм создает файлы и прописывает в них значения исходных параметров. Далее ANSYS считывает эти файлы, строит и рассчитывает модель. Формируется температурное распределение. Затем в MATLAB передается этот массив данных из ППП ANSYS, производится программный анализ и численное дифференцирование температурного распределения. Решается система из 14 уравнений по альтернативному методу и производится анализ результатов оптимизирующей функцией LSQnonlil.

Геометрия витка № 2 с обозначениями в ППП ANSYS представлена на рис. 5.

В процессе изменения значений координат витков может произойти наложение точек, определяющих геометрию, друг на друга, вследствие чего ANSYS выдает сообщение об ошибке построения геометрии. По этой причине, а также для

исключения выхода значений силы тока за пределы рабочего диапазона источников питания и корректного определения прогнозируемых координат точек экстремума на оптимизируемые параметры были наложены ограничения вида:

$$\begin{aligned}
 &0.01 \leq p_1 \leq 10, \quad 0.01 \leq p_2 \leq 20, \quad 0.01 \leq p_3 \leq 20, \quad 0.01 \leq p_4 \leq 10; \\
 &10 \leq I_1 \leq 1200, \quad 10 \leq I_2 \leq 1400; \quad 0.01 \leq l_0 \leq 10.189, \quad 10.189 \leq l_1 \leq 22.9, \\
 &22.9 \leq l_2 \leq 29.62, \quad 29.62 \leq l_3 \leq 36.36, \quad 36.36 \leq l_4 \leq 44.44, \quad 44.44 \leq l_5 \leq 54.9, \\
 &54.9 \leq l_6 \leq 59.8; \quad 10 \leq \varepsilon \leq 500.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

При нахождении целевой функцией локального минимума производится анализ сформировавшегося температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя, по которому определяется, удовлетворяет ли полученное решение системы уравнений условию существованию глобального оптимума. При этом для получения решения приходилось неоднократно изменять начальные значения компонент вектора оптимизируемых параметров.

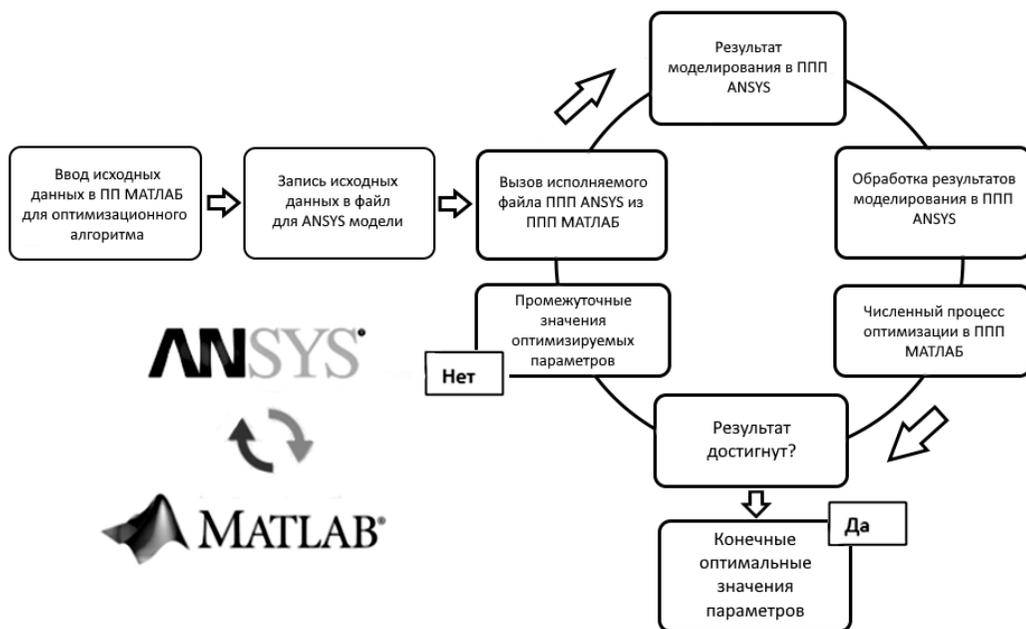


Рис. 6. Структура численной оптимизационной процедуры

В табл. 5 представлены оптимальные значения параметров конструкции индуктора со сложной геометрией витка № 2.

Таблица 5

Конечные оптимальные значения параметров

Значения	$p_1, мм$	$p_2, мм$	$p_3, мм$	$p_4, мм$	$p_5, А$	$p_6, А$
Оптимальные	1,91	2,27	2,15	11,31	923,14	831,53

Координаты точек экстремумов температурного распределения при использовании сложной формы витка представлены в табл. 6.

Таблица 6

Координаты точек экстремумов оптимального температурного распределения по длине закаливаемого слоя

Значения	$l_0^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_1^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_2^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_3^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_4^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_5^{\text{опт}}, \text{мм}$	$l_6^{\text{опт}}, \text{мм}$
Конечные	6,93	20,13	27,89	32,36	39,93	47,53	59,66

В результате решения системы уравнений по альтернансному методу максимальное температурное отклонение составило $\varepsilon_{\min}^{(6)} = 51,87^\circ\text{C}$.

На рис. 7 представлено температурное распределение по границе закаливаемого слоя стальной заготовки, имеющей переход с одного диаметра на другой, полученное в конце стадии нагрева в индукторе с квадратной формой витков (кривая 1), в сравнении с температурным распределением, достигаемым при оптимальных значениях конструктивных и режимных параметров (кривая 2) в индукторе с усложненной геометрической конструкцией витка № 2.

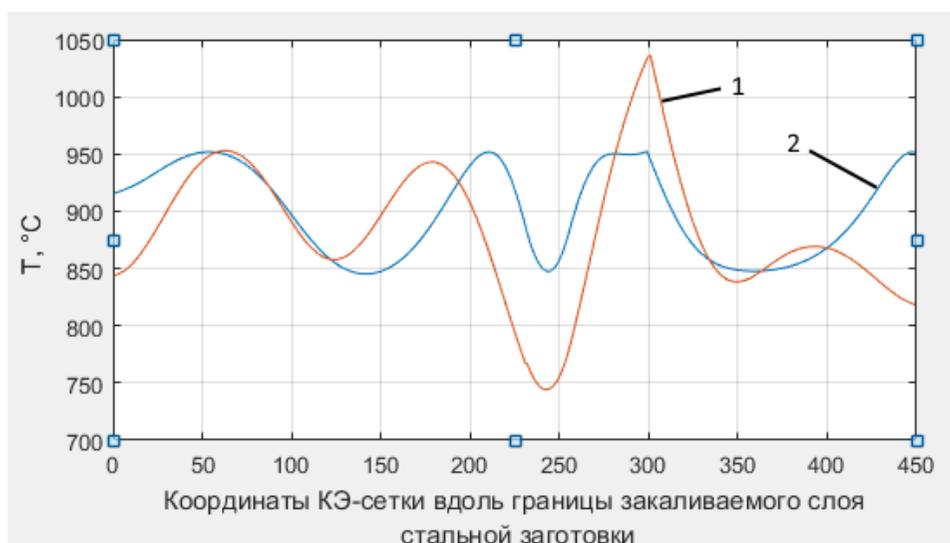


Рис. 7. Результирующее температурное распределение по границе закаливаемого слоя заготовки:

- 1 – для индуктора с квадратной формой витков;
- 2 – после оптимизации параметров индуктора со сложной с формой витка № 2

Сравнение двумерных температурных полей, полученных в конце стадии нагрева заготовки в продольном ее сечении, представлено на рис. 8.

Температурные поля (рис. 8 а, б) были получены в индукторе с квадратной формой витков с начальными и варьируемыми значениями конструктивных и режимных параметров.

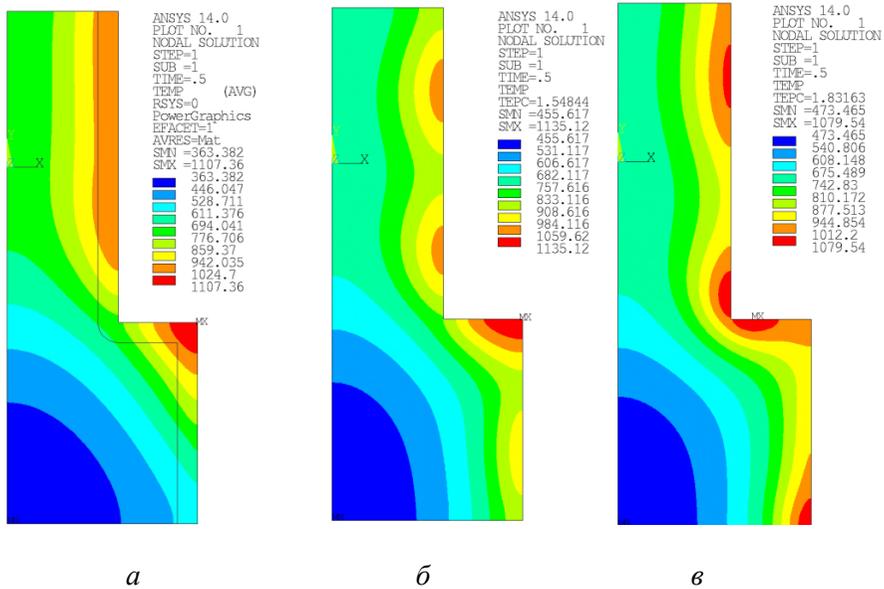


Рис. 8. Результирующее распределение температуры в продольном сечении заготовки:
a – для параметров индуктора, представленных в табл. 2 (строка 1);
б – для параметров индуктора, представленных в табл. 2 (строка 2);
в – для оптимальных параметров индуктора

Выводы

Анализ результатов моделирования выявил необходимость перехода к более сложной геометрической форме витка индуктора, находящегося в зоне наибольшей неравномерности электромагнитного поля в процессе поверхностного нагрева стальной заготовки, имеющей переход с одного диаметра на другой. Решение задачи оптимального проектирования позволило обеспечить значительное снижение максимального температурного отклонения от заданного значения на границе закаливаемого слоя $\pm 156\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\pm 51,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ при отсутствии перегрева поверхности.

Таким образом, оптимизация конструктивных и режимных параметров индуктора на базе альтернативного метода приводит к значительному увеличению равномерности распределения температурных полей в пределах упрочняемого слоя заготовки сложной геометрической формы в конце стадии нагрева, что значительно улучшает качество процесса закалки в целом.

Дальнейшее улучшение равномерности нагрева поверхностного слоя возможно путем решения сформулированной задачи при расширении вектора оптимизируемых параметров, в том числе за счет дальнейшего усложнения геометрической формы витков индуктора, применения локальных магнитных концентраторов и увеличения числа режимных технологических параметров стадии нагрева.

В этом случае оптимизируемый вектор \bar{P} параметров может включать в себя следующие конструктивные характеристики:

- пространственно-варьируемый зазор между заготовкой и индуктором;
- оптимальная частота;
- электрический ток индуктора;
- время нагрева;

– возможность применения локальных концентраторов, способных локально фокусировать электромагнитное поле.

Однако ожидаемые улучшения нетривиальны, нуждаются в подтверждении и могут являться темой отдельного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Павлушин А.В.* Оптимизация процесса индукционной закалки металлических заготовок с использованием численной ANSYS-модели // XIV Международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». В 3 т. Т. 1. Электроэнергетика и электроника: матер. конф. (Казань, 23–26 апреля 2019 г.) / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – Ч. 2. – С. 21–30.
2. *Павлушин А.В.* Двумерная численная нелинейная модель температурных и термонапряженных состояний стальной заготовки в процессе индукционного нагрева под закалку // Н34 Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 9 ч. / под ред. А.В. Гадюкиной. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. ISBN 978-5-7782-4288-3 Часть 5: С. 46–51.
3. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS. 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 14.05.2021).
4. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS. 2019 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/blog/how-to-make-matlab-apps-for-ansys/> (дата обращения: 14.05.2021).
5. *Pleshivtseva Yu., Korshikov S., Wipprecht S., Makarov E., Baake E., Nacke B.* Simulation of primary heating stage in resource efficient forging chain // Heat processing, 2015, № 1, Vol. 13, pp. 85–90.
6. *Pleshivtseva Y.E., Yakubovich E.A.* The influence of induction heating modes on thermal stresses within the billets // Advances in Automation, 2020 / Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8–14, 2019, Sochi, Russia. Book Series: Lecture Notes in Electrical Engineering Editors: Prof. Andrey A. Radionov, Alexander S. Karandaev. Publisher: Springer International Publishing Print. ISBN: 978-3-030-39224-6. Electronic ISBN: 978-3-030-39225-3. Part of: Springer Professional Wirtschaft+Technik", Springer Professional "Technik".
7. *Rudnev V. et al.* Handbook of induction heating // Manufacturing Engineering and Materials Processing, 2003. Vol. 61.
8. Источники питания. Математическое моделирование и оптимизация. Интенсивные курсы. Основы П. Учебное пособие / Бааке Э., Барглик Д., Долега Д., Лули С. и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 324 с.
9. *Понов А.В.* Оптимальное проектирование индукционного нагревателя для поверхностной закалки в условиях интервальной неопределенности параметров // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2020. – Т. 28. – № 3. – С. 139–154. doi: 10.14498/tech.2020.3.9
10. *Рапопорт Э.Я., Пleshивцева Ю.Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. – М.: Наука, 2012.
11. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – С. 336–336.
12. *Пleshивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Деревянов М.Ю.* Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 40–50. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-1-40-50.
13. *Pleshivtseva Y., Baldan M., Popov A., Nikanorov A., Rapoport E., Nacke B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2019, ISSN: 0332-1649, 39 (1), pp. 90–99.
14. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. 2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения: 25.01.2021).
15. MATLAB. Exponenta. Optimization Toolbox 2.2. Руководство пользователя / авт. А.Г. Трифонов [Электронный ресурс]. – URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/ (дата обращения: 02.04.2021).

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2021 г.

OPTIMIZATION DESIGN AND OPERATING PARAMETERS OF INDUCTION HEATING SYSTEM FOR HARDENING

A.V. Pavlushin

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

Abstract. *The paper deals with the problem of optimizing the design and operating parameters of an induction heating system for surface hardening of a steel stepped shaft. The problem of optimal design of an inductor is formulated based on a nonlinear two-dimensional numerical model of coupled electromagnetic and temperature fields, developed in the ANSYS Mechanical APDL software. Alternance method of parametric optimization of systems with distributed parameters is used to optimize induction hardening system. MATLAB software has been used for developing parametric optimization subroutine, which was incorporated into the numerical ANSYS model to simulate a process of induction heating. Commonly used a multi-turn solenoid-style coil fabricated from rectangular copper tubing has been used as a hardening inductor. Besides that, an application of profiled copper turns has been investigated. Optimization of induction hardening system described above allows one to substantially improve heating uniformity and enhance metallurgical characteristics of as-hardened stepped shaft. Localized temperature surplus at an upper diameter shoulder has been minimized. At the same time, sufficient austenitization in the fillet area near stepped region (diameter transition) has been obtained.*

Keywords: *numerical simulation, alternance method, optimal design, induction heating, surface hardening, stepped shaft, induction hardening, electromagnetic field, temperature distribution, ANSYS, MATLAB.*

REFERENCES

1. *Pavlushin A.V.* Optimization of the process of induction hardening of metal blanks using a numerical ANSYS model // XIV International Youth Scientific Conference "Tinchurin Readings". In 3 volumes. V. Power engineering and electronics: mater. conf. (Kazan, April 23–26, 2019) / under total. ed. Rector of KSPEU E.Yu. Abdullazyanov. – Kazan: Kazan. state energ. un-t, 2019. – Part 2. – Pp. 21–30 (In Russian).
2. *Pavlushin A.V.* Two-dimensional numerical nonlinear model of temperature and thermally stressed states of a steel billet in the process of induction heating for hardening // N34 Nauka. Technologii. Innovations // Collection of scientific papers in 9 hours / ed. Gadyukinoy A.V. – Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2020. ISBN 978-5-7782-4288-3 Part 5: Pp. 46–51 (In Russian).
3. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS. 2019. URL: <https://www.ansys.com/> (14.05.2021).
4. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS. 2019. URL: <https://www.ansys.com/blog/how-to-make-matlab-apps-for-ansys/> (14.05.2021).
5. *Pleshivtseva Yu., Korshikov S., Wipprecht S., Makarov E., Baake E., Nacke B.* Simulation of primary heating stage in resource efficient forging chain // Heat processing. 2015. № 1. Vol. 13. Pp. 85–90.
6. *Pleshivtseva Y.E., Yakubovich E.A.* The influence of induction heating modes on thermal stresses within the billets // Advances in Automation, 2020 / Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8–14, 2019, Sochi, Russia. Book Series: Lecture Notes in Electrical Engineering Editors: Prof. Andrey A. Radionov, Alexander S. Karandaev Publisher: Springer International Publishing Print ISBN: 978-3-030-39224-6. Electronic ISBN: 978-3-030-39225-3. Part of: Springer Professional Wirtschaft+Technik", Springer Professional "Technik".
7. *Valery R. et al.* Handbook of induction heating // Manufacturing Engineering and Materials Processing. 2003. T. 61.

Aleksey V. Pavlushin, Postgraduate Student.

8. Power supplies. Mathematical modeling and optimization. Intensive Basics Courses II. Tutorial / Baake E., Barglik D., Dolega D., Lupi S. et al. // SPB.: Publishing house of ETU "LETI", 2013. 324 p. (In Russian).
9. *Popov A.V.* Optimal inductor design for surface hardening under conditions of interval uncertainty of process parameters // Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2020. Vol. 28. № 3. Pp. 139–154. doi: 10.14498/tech.2020.3.9 (In Russian).
10. *Rapoport E.Ya., Pleshivtseva Yu.E.* Optimal control of temperature modes of induction heating. Moscow: Nauka, 2012. (In Russian).
11. *Rapoport E.Ya.* Alternative method in applied optimization problems. M.: Nauka, 2000. Pp. 336–336 (In Russian).
12. *Pleshivtseva Yu.E., Popov A.V., Popova M.A., Derevyanov M.Yu.* Optimal design of an inductor for surface hardening of cylindrical blanks on the basis of a numerical two-dimensional model. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2019. No. 1. Pp. 40–50. DOI: 10.24143 / 2072-9502-2019-1-40-50 (In Russian).
13. *Pleshivtseva Y., Baldan M., Popov A., Nikanorov A., Rapoport E., Nacke B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2019. ISSN: 0332-1649, 39 (1). Pp. 90–99.
14. MathWorks – Makers of MATLAB and Simulink – MATLAB & Simulink. 2021. URL: <https://www.mathworks.com/> (accessed: 25.01.2021).
15. MATLAB. Exponenta Vvedenie v sovremennyye metody optimizatsii system upravleniya [Introduction to modern methods of control systems optimization]. <http://matlab.exponenta.ru/op-tim-robast/book1/index.php> (accessed April 2, 2021).

УДК 665.637.88

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ ПУТЕМ ОКИСЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ*

Ю.Э. Плешивецца, А.В. Казаринов, М.Ю. Деревянов

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

Аннотация. На основе DEA-метода разработана методика многофакторного анализа процессов производства дорожных битумов, которая позволяет получить интегральные сравнительные оценки, обеспечивающие ранжирование процессов по различным разнородным критериям. Выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования. На основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода сформулированы и решены задачи многофакторного анализа эффективности процессов производства дорожных битумов для фактических значений характеристик сырья и параметров технологических процессов, проведен сравнительный анализ полученных оценок для 64 образцов битума. Результаты проведенных исследований позволяют существенно расширить область применения DEA-метода и создать на его основе программный комплекс для многофакторного анализа и оптимизации процессов производства битумов за счет улучшения качества конечного продукта, снижения ресурсов на его производство и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: Data Envelopment Analysis, многофакторный анализ, дорожный битум, нефтепереработка, технологический процесс, эффективность.

Введение

Нефтепереработка является одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации, поскольку нефть и нефтепродукты до настоящего времени остаются основным видом топлива, применяются практически во всех отраслях промышленного производства и в бытовых целях. Однако в настоящий момент в нефтяной промышленности Российской Федерации существуют глобальные проблемы, которые являются причинами технологического отставания страны в отдельных отраслях и вызывают серьезные негативные экологические последствия. Данные проблемы остаются нерешенными на фоне происходящего

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-08-00353, 20-08-00240.

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

Казаринов Артем Витальевич, магистрант.

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

в мире постепенного снижения запасов нефтяного сырья при увеличении спроса на нефть и нефтепродукты.

Важнейшими задачами Концепции национальной безопасности России [1] являются переход на рациональное применение невозобновляемых ресурсов энергии, разработка и внедрение безопасных с экологической точки зрения производств, уменьшение техногенного загрязнения окружающей среды за счет повышения эффективности и глубины процессов нефтепереработки. В связи с этим на нефтеперерабатывающих предприятиях проводятся реконструкции блоков вакуумной перегонки мазута с целью максимального увеличения отбора вакуумных газойлей, являющихся ценным сырьем вторичных процессов переработки нефти. Получаемые в условиях повышенного отбора газойлей нефтяные остатки кардинально меняют свои свойства, в том числе из-за увеличения вязкостных характеристик, повышения коксуемости, снижения содержания в углеводородном составе масляных компонентов, увеличения содержания смол и асфальтенов. Все эти изменения в процессах нефтепереработки существенно влияют на свойства дорожного битума, производимого путем окисления гудрона. От качества производимого битума во многом зависит состояние дорог в целом, а от них, в свою очередь, зависит нормальное функционирование предприятий промышленности, сельского хозяйства, снабжения и торговли.

В настоящее время потребность России в качественном дорожном битуме велика, и ожидается, что спрос на него постоянно будет только возрастать. В этой связи особенно актуальной представляется рассматриваемая в данной работе задача многокритериальной оценки технологического процесса производства окисленных битумов с целью повышения его эффективности. Решение этой задачи позволит углубить процесс переработки тяжелых нефтяных остатков при одновременном решении проблемы повышения качества дорожных покрытий и других побочных и конечных продуктов нефтепереработки при снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Анализ литературных источников показал, что как в зарубежных, так и в отечественных работах недостаточно полно представлены системные подходы к решению указанной проблемы, применение которых позволит повысить эффективность процессов нефтепереработки за счет улучшения качества конечного продукта при снижении ресурсопотребления и увеличении экологической безопасности при его производстве.

В работе предлагается новый подход к многофакторному анализу процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки, который позволяет получить их интегральные сравнительные оценки, обеспечивающие ранжирование процессов по различным разнородным критериям.

С целью проведения многофакторного анализа были выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования, сформулированных на основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода.

Методика многофакторного анализа на основе DEA-метода

В работе предлагается основанный на DEA-методе единый подход к решению задачи сравнительной оценки разнородных показателей (критериев), характеризующих процессы производства дорожных битумов путем окисления гудронов.

Выбор DEA-метода как основы для построения алгоритма многофакторной сравнительной оценки технологических процессов производства битумов объясняется прежде всего удобством его применения для решения аналогичных прикладных задач: возможностью получения сравнительных относительных многофакторных оценок и легкостью визуализации полученных результатов в наглядной форме. При этом DEA-метод широко применяется для получения сравнительных оценок эффективности сложных объектов, ключевые показатели функционирования которых определяются в терминах технико-экономических, эксплуатационных, логистических, энергетических и других разнородных характеристик.

Кроме того, данный метод обладает существенными преимуществами перед известными методами многофакторного анализа, сравнительная характеристика которых представлена на рис. 1. Указанные преимущества в основном сводятся к отсутствию необходимости учета субъективных экспертных мнений, которые могут приводить к противоречивым и необоснованным выводам при ранжировании анализируемых объектов по выбранным разнородным критериям эффективности. Кроме того, отдельного внимания заслуживает тот факт, что факторы, входящие в критерий эффективности и формирующие соответствующую целевую функцию, могут иметь совершенно разный физический смысл и измеряться в различных единицах.

Согласно теории DEA-метода, для сравнительного анализа численных оценок комплексного критерия (показателя) эффективности каждого из N объектов на основе ССР модели применяется следующий подход. Предполагается, что величины всех сравнительных оценок некоторого критерия эффективности f имеют конечные значения и необходимо проранжировать эти значения на числовом интервале $[0, 1]$. Тогда задача многофакторной сравнительной оценки группы образцов сводится к задаче математического программирования на максимум критерия эффективности f , который представляет собой отношение взвешенной суммы выходных факторов к взвешенной сумме входных параметров.

Выходные параметры Y_1, Y_2, \dots, Y_k подбираются так, чтобы каждый из них характеризовал положительный вклад в суммарный показатель эффективности объекта f . В качестве выходных параметров можно принять различные характеристики, которые характеризуют разнообразные аспекты функционирования объектов: производственно-технологические (объем и качество конечной продукции, надежность, долговечность), экономические (прибыль, доход, рентабельность), рыночные (емкость рынка, число связей с контрагентами) и другие.

Эти выходные факторы могут иметь существенно отличающиеся значения, быть несвязанными и несопоставимыми и даже противоречить друг другу. При этом требуется, чтобы выходные характеристики можно было охарактеризовать численным значением, а увеличение каждого из параметров Y_i приводило бы к возрастанию суммарного показателя эффективности f :

$$\frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_i} > 0, i = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

Входные параметры X_1, X_2, \dots, X_m подбираются так, чтобы уменьшение каждого из них увеличивало суммарный показатель эффективности f . В основном входными параметрами являются разнообразные характеристики задействованных в осуществлении производственно-технологического процесса ресурсов. Входные параметры могут характеризовать финансовые, материальные, энергетические, информационные, трудовые, сырьевые, капитальные и другие ресурсы.

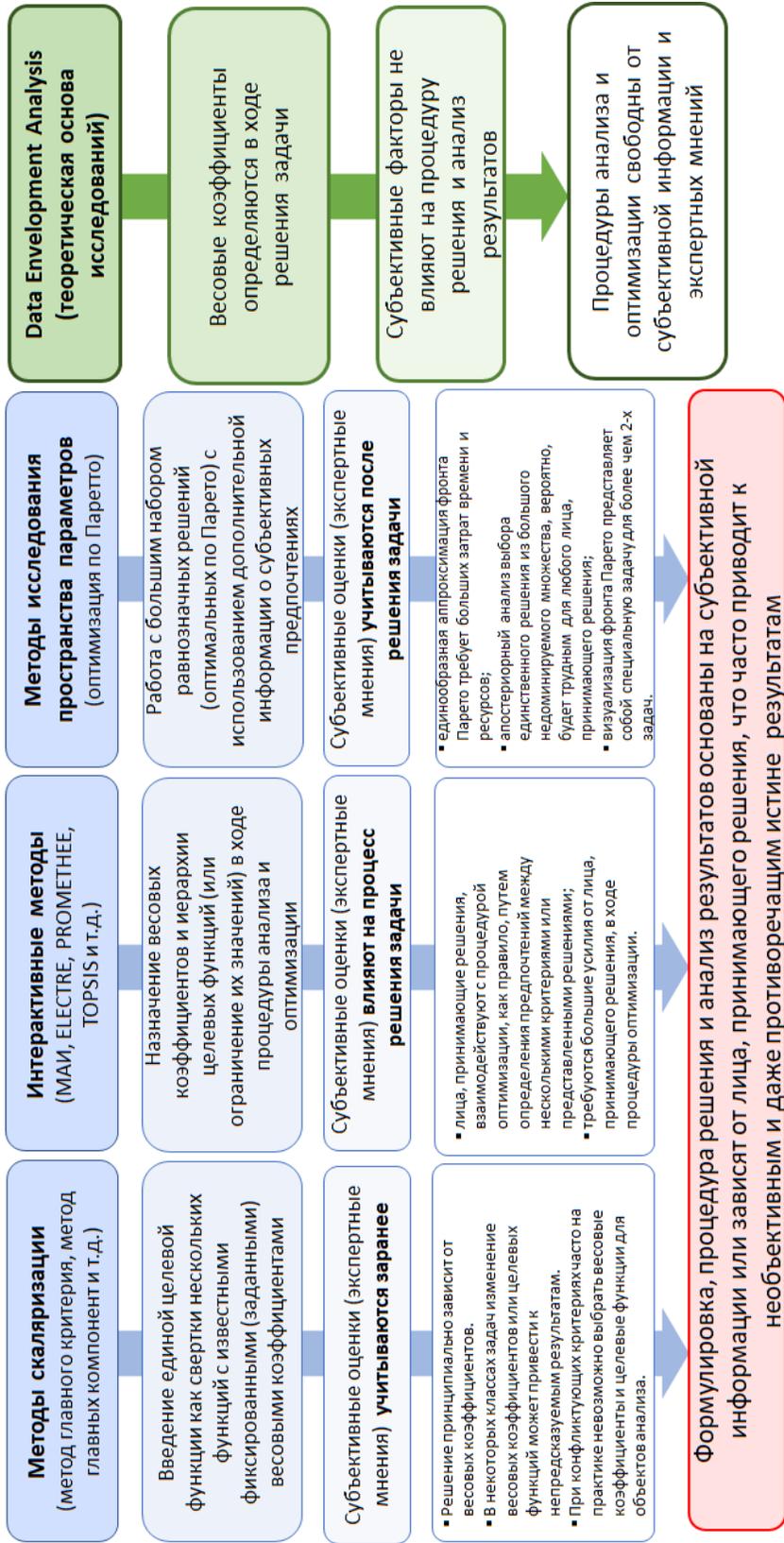


Рис. 1. Сравнение методов многофакторного анализа и многокритериальной оптимизации

Повышение затрат приводит к снижению эффективности анализируемых объектов сравнения, поэтому для входных параметров должны выполняться условия:

$$\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_l} < 0, l = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Конкретную численную величину оценки показателя эффективности f согласно ССР модели следует отыскивать для каждого из N объектов путем максимизации f на множестве значений весовых коэффициентов u, v , принадлежащих области определения G .

Тогда задача отыскания для j -го объекта оценки обобщенного показателя сравнительной эффективности f_j и соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} может быть сформулирована следующим образом:

$$f_j = \frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + u_{3j} \cdot Y_{3j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + v_{3j} \cdot X_{3j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \rightarrow \max_{u_{ij}, v_{lj} \in G} \quad (3)$$

при наличии ограничений:

$$\frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \leq 1, \forall \left(\begin{array}{l} j = \overline{1, N}; i = \overline{1, k}; l = \overline{1, m}; \\ \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \end{array} \right), \quad (4)$$

где u_{ij} и v_{lj} – весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных и входных параметров соответственно в суммарный показатель эффективности.

Система соотношений (1) и (2) представляет собой N задач математического программирования. В результате их решения определяются относительные показатели эффективности f_j для каждого из N объектов в виде ранжированных на единичном интервале $[0, 1]$ численных оценок, а также происходит определение соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} ($i = 1, 2, \dots, k, l = 1, 2, \dots, m$) в функционале (1).

Модель Super-efficiency (суперэффективности) применяется в случаях, когда несколько объектов сравнения имеют оценки эффективности, равные 1, при этом необходимо выделить наилучший объект сравнения в анализируемой группе. Предлагается подход, основанный на использовании базовой модели Super-efficiency DEA-метода, который заключается в исключении из ограничений вида (2) эффективных объектов с оценкой, равной 1.

Формулировка ЗМП на основе модели Super-efficiency для получения сравнительных оценок эффективности объектов может быть представлена аналогично базовой ССР модели, однако задача определения эффективности объектов сравнения будет заключаться в максимизации функционала при исключении из рассмотрения ряда ограничений:

$$S_j = \frac{\bar{u}_{1j} Y_{1j} + \bar{u}_{2j} Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj} Y_{kj}}{\bar{v}_{1j} X_{1j} + \bar{v}_{2j} X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj} X_{mj}} \rightarrow \max_{(\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{lj}) \in \bar{G}_j}; \quad (5)$$

$$\frac{\bar{u}_{1j} Y_{1j} + \bar{u}_{2j} Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj} Y_{kj}}{\bar{v}_{1j} X_{1j} + \bar{v}_{2j} X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj} X_{mj}} \leq 1, \forall \left(\begin{array}{l} j = \overline{1, N}; j \neq n; i = \overline{1, k}; \\ l = \overline{1, m}; \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \end{array} \right). \quad (6)$$

Результатом решения ЗМП (3) и (4) являются сравнительные оценки, находящиеся в интервале $[0, \infty)$, при этом объект сравнения, имеющий максимальную оценку эффективности, может считаться наилучшим в группе при заданных условиях. Неэффективные по базовой CCR модели объекты с оценкой меньше 1 не изменят свои сравнительные оценки по модели Super-efficiency.

Исходные данные для многофакторного анализа

Для проведения многофакторного анализа технологических процессов получения окисленного битума с помощью DEA-метода были собраны экспериментальные данные о 64 образцах битумов, произведенных путем окисления гудронов на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе (АНПЗ), в Ангарской нефтехимической компании (АНХК) и Рязанской нефтеперерабатывающей компании (РНПК) из нефтесмесей Восточносибирского и Ванкорского месторождений. Эти данные содержат детализированные сведения о свойствах исходной нефти, химических, физико-механических свойствах сырья, технологических параметрах проведения процесса и физико-механических и химических свойствах окисленного битума.

Свойства битума как сложного объекта исследования определяются как соотношением входящих в его компонентный состав масел, смол и асфальтенов и др., так и свойствами исходного сырья, подвергаемого процессу окисления, и многими другими параметрами. Например, повышение содержания асфальтенов и смол влечет за собой возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума.

В ходе исследования были выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования (3)–(4) и (5)–(6).

Вся собранная информация по указанным свойствам и технологическим параметрам проведения процесса окисления 64 образцов битумов была систематизирована и классифицирована так, как представлено в табл. 1–4 (для примера представлены 7 образцов).

Табл. 1 содержит следующие сведения о свойствах исходной нефти и физико-механических свойствах сырья для различных образцов: Сера общ. – содержание серы в нефти, %; Вязкость при 50 °С – вязкость нефти при 50 °С; Коксуемость по Конрадсону – коксуемость нефти, определяемая по методу Конрадсона по ГОСТ 19932-99, % мас; Ni – содержание никеля в нефти, ppm; V – содержание ванадия в нефти, ppm; Парафины – содержание парафинов в нефти, % мас; Плотность – плотность нефти, кг/м³; ВУ – условная вязкость нефти, с; Вязкость при 80 – вязкость нефти при 80 °С, мм²/с; КиШ – температура размягчения сырья, определяемая по методу кольца и шара, °С.

Табл. 2 содержит следующие данные о химических свойствах сырья и параметрах окисления для различных образцов: ПНУ – содержание парафино-нафтеновых углеводородов в сырье, %; Смолы – содержание смол в сырье, %; Асфальтены – содержание асфальтенов в сырье, %; Легкая ароматика – содержание моноциклоароматических углеводородов в сырье, %; Средняя ароматика – содержание бициклоароматических углеводородов в сырье, %; Тяжелая ароматика – содержание полициклоароматических углеводородов в сырье, %; Ароматика (общ) – общее содержание ароматических углеводородов в сырье, %; АУ/ПНУ – отно-

шение содержания в сырье ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам; Асф/См – отношение содержания в сырье асфальтенов к смолам; Т – температура проведения процесса окисления, °С; Расход воздуха – расход воздуха при проведении процесса окисления, м³/ч; Продолжительность – продолжительность проведения процесса окисления, ч.

В табл. 3 представлены следующие физико-механические свойства окисленного битума для различных образцов: Т_{хр} – температура хрупкости сырья, °С; ΔКиШ – изменение температуры размягчения сырья по методу кольца и шара после его прогрева, °С; Т_{хр} после прогр – температура хрупкости сырья после прогрева, °С; К η60 – коэффициент возрастания динамической вязкости; П25 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм; П0 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм; Д25 – дуктильность битума при 25 °С, см; Д0 – дуктильность битума при 0 градусах, см; η60 – динамическая вязкость битума, Па·с; ν135 – кинематическая вязкость битума, мм²/с; П25 – Остаточная пенетрация битума, %; Д25 после прогр – дуктильность битума при 25 °С после прогрева, см.

Табл. 4 содержит следующие данные о химических свойствах окисленного битума для различных образцов: ПНУ – содержание парафино-нафтеновых углеводородов в битуме, %; Смолы – содержание смол в битуме, %; Асфальтены – содержание асфальтенов в битуме, %; Ароматика (общ) – общее содержание ароматических углеводородов в битуме, %; АУ/ПНУ – отношение содержания в битуме ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам; Асф/См – отношение содержания в битуме асфальтенов к смолам; Легкая ароматика – содержание моноциклоароматических углеводородов в битуме, %; Средняя ароматика – содержание бициклоароматических углеводородов в битуме, %; Тяжелая ароматика – содержание полициклоароматических углеводородов в битуме, %.

Таблица 1

Свойства исходной нефти и физико-механические свойства сырья для различных образцов

Наименование образца	№ Образца	Нефть								Физ-мех свойства сырья		
		Выход, % от нефти	Сера общ, % мас.	Вязкость при 50 °С, мм ² /с	Коксуюемость по Конрадсо	Ni, ppm	V, ppm	Парафины, % мас.	Плотность, кг/м ³	ВУ ₈₀ , с	Вязкость при 80, мм ² /с	КиШ, °С
гудрон 17 с (обр №1)	1	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	17	339,8	21,5
гудрон 22 с (обр №2)	2	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	22	466,9	24
гудрон 29,7 с (обр №3)	3	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	29,7	625	22,4
Гудрон 34 с (обр №4)	4	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	34,1	778,67	25,6
Гудрон 38 с (обр №5)	5	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	38	882,1	25,7
Гудрон 59 с (обр №6)	6	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	58,7	1381	26,3
Гудрон 64,2 с (обр №7)	7	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	64,2	1411	26,5

Таблица 2

Химические свойства сырья и параметры процесса окисления для различных образцов

№ Образца	Химические свойства сырья									Параметры окисления, °С		
	ПНУ	Смолы	Асфальтены	Легкая ароматика	Средняя ароматика	Тяжелая ароматика	Ароматика (общ)	АУ/ПНУ	Асф/См	Т, °С	Расход воздуха, м ³ /ч	Продолжит., ч
1	30,1	18,9	3,1	14,8	6,6	26,5	47,9	1,59136	0,16402	250	5	11
2	29,8	19,9	3,2	12,8	6,5	27,8	47,1	1,58054	0,16080	250	5	10,5
3	28,4	21,8	5,4	7,3	5,6	31,5	44,4	1,56338	0,24771	250	5	9,2
4	27,1	20,9	3,4	14	4,9	29,7	48,6	1,79336	0,16268	250	5	9,5
5	25,3	22,2	4,3	9,5	5,9	32,8	48,2	1,90514	0,19369	250	5	9,4
6	18,3	29,6	6,1	6,7	5,1	34,2	46	2,51366	0,20608	250	5	9
7	18	31	6,5	6,2	3,8	34,5	44,5	2,47222	0,20968	250	5	8,5

Физико-механические свойства окисленного битума для различных образцов

№ Образца	Физико-химические свойства окисленного битума											
	Тхр, °С	$\Delta KuIII$, °С	Тхр после прогр, °С	К η_{60}	Π_{25} , 0,1 мм	Π_0 , 0,1 мм	Д25, см	Д0, см	η_{60} , Па·с	ν_{135} , мм ² /с	Π_{25} , % ост	Д25 после прогр, см
1	-28	8,5	-26	6	71	31	60	3,5	203	453	49	12
2	-27	8	-26	5,5	68	30	72	3,4	213	465	52	16
3	-26	7,3	-26	5	67	27	65	3,3	224	456	52	18
4	-26	8,1	-24	5,7	68	30	67	3,4	243	487	56	16
5	-26	7,8	-24	5,9	68	29	68	3,6	256	489	54	18
6	-25	6,8	-23	3,7	64	26	92	2	314	505	64	22
7	-24	6	-24	3	62	25	102	2	356	523	65	37

Таблица 4

Химические свойства окисленного битума для различных образцов

№ Образца	Химические свойства окисленного битума								
	ПНУ	Смолы	Асфальтены	Ароматика (всего)	Ау/ПНУ	Асф/См	Легкая ароматика	Средняя ароматика	Тяжелая ароматика
1	30	17,8	23,1	29,1	0,97000	1,29775	5	3,6	20,5
2	29,8	19,5	20,2	30,5	1,02349	1,03590	5,9	3,8	20,8
3	28	20,7	21,4	29,9	1,06786	1,03382	3,3	2,6	24
4	27	19,9	20,1	33	1,22222	1,01005	4	3,3	25,7
5	25,4	21,9	19,7	33	1,29921	0,89954	3,7	3,5	25,8
6	18,2	30	16,1	35,7	1,96154	0,53667	3,7	2,1	29,9
7	18	31,6	16,5	33,9	1,88333	0,52215	3,1	2,6	28,2

Многофакторный анализ влияния технологических параметров окисления на качество конечной продукции

На основе DEA-метода предлагается сформулировать задачу многофакторного анализа влияния технологических параметров процессов окисления на качество дорожного битума как ЗМП.

Для многофакторного анализа влияния параметров процессов окисления предлагается провести сравнение образцов с учетом температуры и длительности процесса окисления, поскольку эти параметры не только влияют на показатели качества конечного продукта, но и характеризуют затраты ресурсов на проведение процесса. Здесь и далее для оцениваемых по эффективности их функционирования объектов сравнения будет принято сокращение DMU (с англ. decision making unit) – единица принятия решения.

Для многофакторного анализа влияния технологических параметров окисления на качество конечной продукции каждый образец битума, являющийся объектом сравнения (DMU), может быть представлен в виде блока (рис. 2).

В качестве компонентов вектора входа, входящих в формулировку ЗМП, предлагается рассматривать следующие параметры, характеризующие затраты на реализацию технологического процесса:

X_1 – температура проведения процесса окисления, °С;

X_2 – продолжительность проведения процесса окисления, часы.



Рис. 2. Задача многофакторного анализа влияния технологических параметров процесса окисления на качество дорожного битума

В качестве выходных параметров, положительно влияющих на оценку эксплуатационных характеристик битума, предлагается рассматривать следующие параметры, которые наиболее существенно влияют на оцениваемое качество битума:

- Y_1 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм;
- Y_2 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм;
- Y_3 – дуктильность битума при 25 градусах, см;
- Y_4 – остаточная пенетрация после прогрева в тонкой пленке, %;
- Y_5 – температура хрупкости битума, °С.

Для указанных параметров были решены задачи многофакторного анализа, сформулированные согласно DEA-методу как ЗМП (3)–(4) и (5)–(6) на основе CCR модели и модели Superefficiency соответственно. Как показано выше, решение задачи многофакторного анализа сводится к решению N задач математического программирования, которые позволяют получить сравнительные оценки для каждого образца битума и соответствующие входным и выходным параметрам весовые коэффициенты, определяемые в ходе решения данной задачи.

Результаты расчетов сравнительных оценок образцов, полученные в ходе решения задачи (3)–(4) на основе модели CCR, представлены на рис. 3, а результаты решения задачи (5)–(6) на основе модели Superefficiency – на рис. 4.

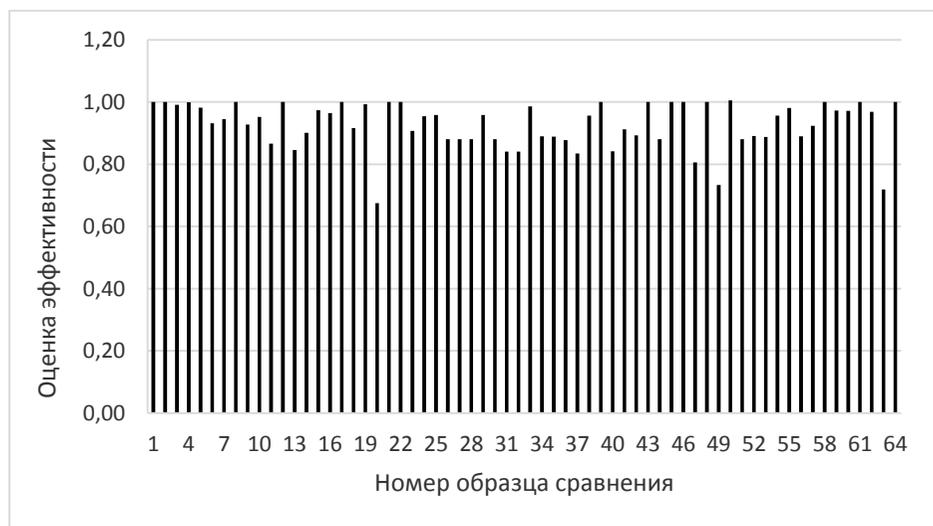


Рис. 3. Сравнительный анализ влияния параметров процесса окисления на качество готового битума на основе модели CCR



Рис. 4. Сравнительный анализ влияния параметров процесса окисления на качество готового битума на основе модели Superefficiency

Как видно из представленных выше диаграмм (рис. 3 и 4), модель Superefficiency гораздо более информативна для выявления наилучших образцов, поэтому в дальнейших расчетах применяется только эта модель.

Анализ полученных результатов показал, что лучшими образцами с точки зрения наименьших затрат ресурсов на реализацию технологических процессов при обеспечении требуемого качества готовой продукции являются образцы № 8, 12, 17, 22, 39, 45 и 64. При этом величина сравнительной оценки образца 64 свидетельствует о том, что соотношение затраченных на его производство ресурсов и качества конечного продукта является наилучшим по сравнению со всеми остальными образцами в анализируемой группе. Данный вывод можно объяснить оптимальным составом сырья и правильно подобранными параметрами технологического процесса. Это обеспечивает высокое качество продукции при наименьших затратах на проведение технологического процесса.

Представленные результаты позволяют определить, что образцы № 20, 49 и 63 имеют наименьшую сравнительную оценку, требуют пересмотра технологического режима и других модификаций производственного процесса.

Многофакторный анализ влияния состава исходного сырья на качество конечной продукции

Различные эксплуатационные показатели качества окисленного дорожного битума во многом зависят от его группового углеводородного состава, определяемого углеводородным составом вводимого в колонну окисления исходного гудрона.

На основе DEA-метода предлагается сформулировать задачу многофакторного анализа влияния физико-химических свойств сырья на качество дорожного битума.

Данная задача позволяет выявить многофакторные зависимости группового углеводородного состава сырья на качество образцов битума, при этом сравнение

может быть проведено по отклонениям от рекомендуемого состава сырья и свойствам готового продукта.

Для многофакторного анализа влияния состава исходного сырья процесса окисления на качество конечной продукции каждый образец битума, являющийся объектом сравнения (DMU), может быть представлен в виде блока (рис. 5).



Рис. 5. Задача многофакторного анализа влияния состава исходного сырья на качество дорожного битума

В качестве компонентов вектора входа, входящих в формулировку ЗМП для сравнительной оценки качества образцов в зависимости от свойств сырья, предлагается рассматривать следующие параметры, отрицательно влияющие на свойства битума:

X_1 – отклонение между оптимальным соотношением асфальтенов к смолам и их фактическим значением;

X_2 – отклонение между оптимальным соотношением ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам и их оптимальным значением;

X_3 – температура размягчения сырья по КиШ, °С.

В качестве выходных параметров, положительно влияющих на оценку эксплуатационных характеристик битума, предлагается рассматривать следующие параметры, которые наиболее существенно влияют на оцениваемое качество битума:

Y_1 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм;

Y_2 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм;

Y_3 – дуктильность битума при 25 градусах, см;

Y_4 – динамическая вязкость битума, Па·с;

Y_5 – температура хрупкости битума, °С.

Для многофакторного анализа влияния физико-химических свойств сырья на качество дорожного битума в соответствии с представленным на рис. 5 выбором параметров была сформулирована согласно DEA-методу ЗМП (5)–(6) на основе модели Superefficiency. В результате решения ЗМП (5)–(6) были получены сравнительные оценки в интервале $[0, \infty)$, которые представлены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что лучшими образцами с точки зрения соотношения качества исходного сырья и качества готовой продукции являются образцы под номерами № 1, 3, 8, 12, 15, 18, 25, 43, 48, 50 и 57. При этом образец № 57 является наилучшим в анализируемой группе, поскольку его сравнительная оценка равна максимальной величине 1,5. Этот результат объясняется оптимальным составом исходного сырья, включающим гудрон и введенный затемненный вакуумный газойль, что позволяет обеспечить высокие эксплуатационные характеристики получаемого битума.

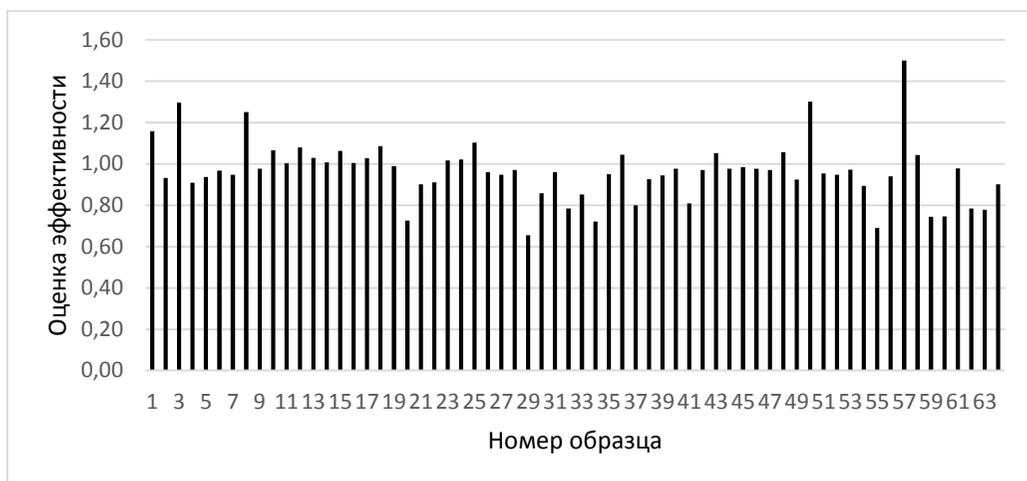


Рис. 6. Сравнительные оценки влияния состава сырья на качества готового битума на основе модели SE

Представленные результаты позволяют определить, что образцы № 20, 29, 34, 55, 59, 60 имеют наименьшую сравнительную оценку, следовательно, необходимо провести модификацию углеводородного состава, оптимизировать параметры технологического режима или принять другие меры.

Выводы

Результаты демонстрируют необходимость дальнейших модификаций и оптимизации технологий получения дешевого качественного дорожного битума из утяжеленного сырья.

Подтверждена эффективность применения DEA-метода для сравнения характеристик образцов битума по моделям многофакторного анализа при условии правильного подбора входных и выходных параметров.

Выявлено, что при большом количестве объектов и параметров сравнения анализ сравнительной характеристики рекомендуется выполнять на основе модели суперэффективности DEA-метода для получения наиболее показательных относительных оценок лучших образцов.

Выявлена необходимость дальнейших исследований влияния изменений параметров технологического процесса и свойств сырья на сравнительную оценку образцов битума в анализируемой группе.

В целом в работе получены следующие результаты:

- проведен комплексный анализ производства дорожных битумов; собрана, классифицирована и проанализирована информация по 64 образцам исходного сырья и получаемого из них окисленного битума;

- выбраны и обоснованы основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов нефтепереработки при производстве дорожных битумов;

- обоснована необходимость многофакторного анализа существующих процессов производства дорожных битумов на нефтеперерабатывающих предприятиях;

- разработана методика анализа процессов производства дорожных битумов на основе DEA-метода с целью выявления их принципиальных закономерностей, количественного и качественного оценивания их основных характеристик и свойств;

– на основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода сформулированы и решены задачи многофакторного анализа эффективности процессов производства дорожных битумов для фактических значений характеристик сырья и параметров технологических процессов, проведен сравнительный анализ полученных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О Концепции национальной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 10.01.2000 № 24.
2. Орлов В.П. Государство и недропользование // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2001.
3. Муртазин Т.М., Ризванов Т.М., Нигматуллин В.Р., Кутьин Ю.А., Теляшев Э.Г. Оперативное управление процессом компаундирования битумов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – С. 4–6.
4. Васильев А.В., Пименов А.А. Анализ динамики современных требований к нефтяным дорожным битумам // XV Всероссийская конференция «Химия и инженерная экология» с международным участием. – 2015. – С. 81–82.
5. Сибгатуллина Р.И., Абдуллин А.И., Емельянычева Е.А., Бикмухаметова Г.К. Влияние параметров окисления гудронов на свойства конечного битумного материала. Кинетические особенности окисления нефтяных остатков до битума // Вестник технологического университета. – 2016. – № 2. – С. 41–43.
6. Руденская И.М. Нефтяные битумы. – М.: Высшая школа; МАДИ, 1964.
7. Производство окисленных битумов: Метод. пособие. – Казань: Казанский федеральный университет, 2013.
8. Баннов П.Г. Процессы переработки нефти. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2001.
9. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. – М.: Химия, 1973.
10. Танашиев С.Т., Умбетов У.У., Токтагулова У.С., Дилдабаева М.С. Возможность прогнозирования оптимальной технологии производства окисленных битумов по химическому составу перерабатываемой нефти. – Шымкент: Юж.-Казахстанский госуниверситет, 2020.
11. Пажитова Н.П., Потанова Т.В. Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве. – М.: Труды СоюзДорНИИ, 1970.
12. Thierry Post, Jaap Spronk. Performance benchmarking using interactive data envelopment analysis. Eur. J. Opl. Res. 115. 1999.
13. Norio Hibiki, Toshiyuki Sueyoshi. DEA sensitive analysis by changing a reference set: regional contribution to Japanese industrial development. Omega, Int. J. Mgmt. Sci. 27. 1999.
14. Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1.
15. Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 156 с.
16. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. Management Science 30/9, 1984.
17. Лескин А.И. Улучшение качества дорожного вязкого нефтяного битума на стадии его производства при снижении температуры окисления: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Волгоград, 2006.
18. Тюкилина П.М. Производство нефтяных дорожных битумов на основе модифицированных утяжеленных гудронов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2015.
19. Евдокимова Н.Г., Лобанов В.В., Хивинцев А.В. Влияние параметров окисления гудронов на долговечность нефтяных битумов // Химия и технология топлив и масел. – 2000.
20. Рябов В.Г., Ширкунов А.С., Кудинов А.В., Нечаев А.Н. и др. Получение качественных дорожных битумов с использованием высоковязких гудронов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2008.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2021 г.

MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF ROAD BITUMEN PRODUCTION PROCESSES BY OXIDATION OF REFINED PETROLEUM PRODUCTS

Yu.E. Pleshivtseva, A.V. Kazarinov, M.Yu. Derevyanov

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

Abstract. *Based on the DEA method, an approach has been developed for the multivariate analysis of the road bitumen production processes, allowing obtaining integral comparative assessments that ensure the ranking of processes according to various heterogeneous criteria. The main quantitative characteristics, qualitative indicators, and technological parameters of the oxidation processes are selected to form target functions when solving mathematical programming problems. Based on the CCR and Super Efficiency models of the DEA method, the problems of multivariate analysis of the efficiency of road bitumen production processes for the actual values of the characteristics of raw materials and parameters of technological processes were formulated and solved, a comparative analysis of the estimates obtained for 64 bitumen samples was carried out. The results of the studies carried out make it possible to significantly expand the scope of the DEA method application and create on its basis a software package for multivariate analysis and optimization of bitumen production processes by improving the quality of the final product, reducing the resources for its production and reducing the negative impact on the environment.*

Keywords: *Data Envelopment Analysis, multivariate analysis, road bitumen, oil refining, technological process, efficiency.*

REFERENCES

1. On the Concept of National Security of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation No. 24 of 10.01.2000 (In Russian).
2. Orlov V.P. Gosudarstvo i nedropol'zovanie // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2001 (In Russian).
3. Murtazin T.M., Rizvanov T.M., Nigmatullin V.R., Kut'in Yu.A., Telyashev E.G. Operativnoe upravlenie processom kompaundirovaniya bitumov // Neftepererabotka i neftekhimiya. 2006 (In Russian).
4. Vasil'ev A.V., Pimenov A.A. Analiz dinamiki sovremennykh trebovaniy k neftyanym dorozhnym bitumam // XV vsrossijskaya konferenciya "Himiya i inzhenernaya ekologiya" s mezhdunarodnym uchastiem – 2015 (In Russian).
5. Sibgatullina R.I., Abdullin A.I., Emel'yanycheva E.A., Bikmuhametova G.K. Vliyaniye parametrov okisleniya gudronov na svoystva konechnogo bitumnogo materiala. Kineticheskie osobennosti okisleniya neftyanykh ostatkov do bituma // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – 2016 (In Russian).
6. Rudenskaya I.M. Neftyanye bitumy. M.: Vysshaya shkola. MADI, 1964 (In Russian).
7. Proizvodstvo okislennykh bitumov: Metodicheskoe posobie, Kazan: Kazanskiy federal'nyy universitet, 2013 (In Russian).
8. Bannov P.G. Processy pererabotki nefii. M.: CNIITeneftkhim, 2001.
9. Gun R.B. Neftyanye bitumy. M.: Himiya, 1973 (In Russian).
10. Tanashev S.T., Umbetov U.U., Toktagulova U.S., Dildabaeva M.S. Vozmozhnost' prognozirovaniya optimal'noy tekhnologii proizvodstva okislennykh bitumov po himicheskomu sostavu pererabatyvaemoy nefii. Shymkent, Kazahstan (In Russian).
11. Pazhitova N.P., Potapova T.V. Issledovanie svoystv bitumov, primenyaemykh v dorozhnom stroitel'stve. M.: Trudy SoyuzDorNII, 1970 (In Russian).

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

Artem V. Kazarinov, Graduate Student.

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

12. Thierry Post, Jaap Spronk. Performance benchmarking using interactive data envelopment analysis. *Eur. J. Opl. Res.* 115. 1999.
13. Norio Hibiki, Toshiyuki Sueyoshi. DEA sensitive analysis by changing a reference set: regional contribution to Japanese industrial development. *Omega, Int. J. Mgmt. Sci.* 27. 1999.
14. Krivonozhko V.E., Propoj A.I., Sen'kov R.V., Rodchenkov I.V., Anohin P.M. Analiz effektivnosti funkcionirovaniya slozhnykh sistem. *Avtomatizatsiya proektirovaniya.* 1999 (In Russian).
15. Sirazetdinov T.K. Metody resheniya mnogokriterial'nykh zadach sinteza tekhnicheskikh sistem. M.: Mashinostroenie, 1988 (In Russian).
16. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30/9, 1984.
17. Leskin A.I. Uluchshenie kachestva dorozhnogo vyazkogo neftyanogo bituma na stadii ego proizvodstva pri snizhenii temperatury okisleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.07. – Volgograd, 2006 (In Russian).
18. Tyukilina P.M. Proizvodstvo neftyanykh dorozhnykh bitumov na osnove modifitsirovannykh utyazhennykh gudronov (In Russian).
19. Evdokimova N.G., Lobanov V.V., Hivincev A.V. Vliyanie parametrov okisleniya gudronov na dolgovechnost' neftyanykh bitumov. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 2000 (In Russian).
20. Ryabov V.G., Shirkunov A.S., Kudinov A.V., Nechaev A.N. i dr. Poluchenie kachestvennykh dorozhnykh bitumov s ispol'zovaniem vysokovyazkikh gudronov. *Neftepererabotka i neftekimiya.* 2008.

Электротехника

УДК 621.3

КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ВЕНТИЛЯТОРОВ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

А.М. Абакумов, П.К. Кузнецов

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

Аннотация. Обсуждается задача управления температурой на выходе установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов. Для ее решения используется дискретное либо частотное управление электродвигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа. Отмечены проблемы электромагнитной совместимости, возникающие в типовых системах электроснабжения установок охлаждения газа при подключении электродвигателей вентиляторов через преобразователи частоты. Рассмотрена комбинированная система управления электродвигателями вентиляторов, в которой электродвигатели разбиты на две группы. Электродвигатели первой группы подключаются к сети напрямую, второй – через частотные преобразователи. За счет уменьшения количества электродвигателей, подключаемых к сети через преобразователи частоты, снижается негативное влияние частотно-регулируемых приводов на показатели качества потребляемой электроэнергии и уменьшаются затраты на проекты модернизации в сравнении с вариантом использования частотного преобразователя для каждого электродвигателя. Проанализированы энергетические характеристики системы комбинированного управления. Получены соотношения, устанавливающие взаимосвязи температурного перепада на установке охлаждения и мощности электродвигателей вентиляторов при различных способах регулирования. Предложен оптимальный по критерию максимума экономии мощности алгоритм управления, предусматривающий взаимосвязанное управление количеством включенных дискретно-регулируемых двигателей и скоростью частотно-регулируемых приводов. Обсуждаются варианты реализации оптимального алгоритма управления. Рассмотрены аналитические выражения для экономии мощности на валу двигателей вентиляторов в комбинированной системе по сравнению с дискретной и методика оценки экономии электроэнергии. Полученные результаты рекомендуется использовать для оценки технико-экономической эффективности проектов модернизации электротехнических комплексов установок охлаждения газа.

Ключевые слова: магистральные газопроводы, компрессорные станции, установки охлаждения газа, частотно-регулируемый привод, системы управления.

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

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

Введение

На компрессорных станциях магистральных газопроводов природный газ после компримирования охлаждается на установках охлаждения газа (УОГ) до требуемой температуры. Охлаждение газа позволяет повысить пропускную способность трубопровода, обеспечить экономию топливного газа на работу газоперекачивающих агрегатов, снизить температурные деформации трубопровода и повысить его продольную устойчивость. Для компрессорных станций, расположенных в районах вечной мерзлоты, охлаждение газа позволяет предотвратить недопустимые механические воздействия на трубопроводы, связанные с образованием зон протаивания в летний период и их замерзанием в зимний период.

Типовые УОГ содержат 10–20 параллельно включенных аппаратов воздушного охлаждения (АВО), основными элементами которых являются: теплообменник, выполненный из нескольких рядов оребренных труб, и вентиляторы с электроприводом, подающие наружный воздух на теплообменник.

На отечественных компрессорных станциях широко используются АВО типа 2АВГ-75, оснащенные двумя установленными под теплообменником вентиляторами, приводимыми в движение асинхронными двигателями мощностью 37 кВт. Электроснабжение электроприемников УОГ в типовой схеме осуществляется от двухтрансформаторной подстанции с установленной мощностью трансформаторов 630 или 1000 кВА.

При управлении режимами работы установок охлаждения необходимо обеспечить технологические требования по поддержанию требуемой температуры газа на выходе установки, а также энергосберегающие режимы работы УОГ, т. к. установленная мощность электроприводов УОГ, как правило, составляет около 1 МВт и на нужды охлаждения газа на компрессорных станциях с газотурбинным приводом приходится более 60 % расхода электроэнергии, потребляемой на производственные нужды.

В процессе работы УОГ создает температурный перепад (напор), определяемый как разность температур газа на входе θ_{inp} и выходе $\Delta\theta_{out}$ установки:

$$\Delta\theta = \theta_{inp} - \theta_{out}. \quad (1)$$

Задача управления режимом работы установки заключается в поддержании заданной в соответствии с технологическими требованиями температуры θ_r на выходе УОГ:

$$\theta_{out} = \theta_r \pm \delta = \theta_{inp} - \Delta\theta \pm \delta, \quad (2)$$

где δ – допустимая погрешность поддержания температуры.

Требуемый температурный перепад, который должна создавать установка для выполнения соотношения (2),

$$\Delta\theta_r = \theta_{inp} - \theta_r \pm \delta. \quad (3)$$

Возмущающими воздействиями, вызывающими отклонение температуры на выходе УОГ от заданного значения, являются: изменение расхода газа и его температуры на входе в УОГ, изменение температуры и влажности атмосферного воздуха и т. д.

Для решения задачи стабилизации температуры газа на выходе установки управляют температурным перепадом на УОГ за счет изменения режимов работы приводов вентиляторов АВО. На большинстве эксплуатируемых установок

используется дискретное управление – включение/выключение электродвигателей вентиляторов [1–3].

В последние десятилетия получает применение управление скоростью вентиляторов, реализуемое с помощью частотно-регулируемого привода (ЧРП) и обеспечивающее существенное повышение энергетической эффективности установок охлаждения, а также снижение динамических нагрузок на питающую сеть и кинематическую часть привода, возникающих в процессе пуска АД прямым включением в сеть [4–12].

В то же время оснащение всех двигателей УОГ преобразователями частоты (ПЧ) приводит в типовых схемах электроснабжения газотурбинных КС к существенному искажению синусоидальности формы потребляемого тока и возникновению проблемы электромагнитной совместимости ПЧ со смежными электроприемниками [13–15].

Для обеспечения электромагнитной совместимости ЧРП приходится дополнительно оснащать входными и выходными фильтрами, что увеличивает затраты на реализацию проектов модернизации. Наряду с установкой фильтров острота проблемы электромагнитной совместимости может быть снижена использованием комбинированного управления. В комбинированной системе управления часть двигателей вентиляторов подключается к ПЧ, а скорость второй части двигателей регулируется дискретно, тем самым уменьшается потребление несинусоидального тока от источника питания.

В связи с изложенным представляет интерес анализ энергетических показателей УОГ при совместном использовании дискретного и частотного регулирования в комбинированной системе.

1. Экономия мощности при частотном и комбинированном управлении

Введем допущения о равномерности распределения потоков газа по параллельно включенным АВО и идентичности тепловых характеристик аппаратов и оценим мощность на валу двигателей вентиляторов УОГ при дискретном, частотном и комбинированном способах управления в стационарных режимах.

В случае работы всех вентиляторов с номинальной частотой вращения на УОГ в определенных условиях создается некоторый номинальный температурный перепад $\Delta\theta_{nom}$, который далее принят за базовый для перехода к относительным величинам (о. е.).

Дискретное регулирование

При дискретном регулировании с учетом принятых допущений температурный перепад на УОГ, как следует из анализа уравнения теплового баланса, пропорционален количеству d_d включенных двигателей [2, 6, 7, 10] :

$$\Delta\theta = \Delta\theta_d = \Delta\theta_{nom} \frac{d_d}{N} = \Delta\theta_{nom} \beta_d, 0 \leq \beta_d \leq 1, d_d = \overline{0, 1, 2, \dots, N}, \quad (4)$$

где $\beta_d = d_d/N$ – относительное число включенных двигателей вентиляторов;
 N – общее количество двигателей вентиляторов.

Представим $\Delta\theta_d$ по (4) и требуемый температурный перепад в относительных единицах:

$$\Delta\theta^* = \Delta\theta_d^* = \Delta\theta_d / \Delta\theta_{nom} = \beta_d; \Delta\theta_r^* = \Delta\theta_r / \Delta\theta_{nom}; \quad (5)$$

$$0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1; \theta_{nom}^* = 1.$$

Относительный требуемый перепад $\Delta\theta_r^*$ целесообразно использовать в аналитических исследованиях в качестве обобщенной переменной, учитывающей как тепловые характеристики АВО, так и технологические требования.

Мощность дискретно-регулируемых приводов вентиляторов пропорциональна количеству d_d включенных двигателей:

$$P_d = P_{nom}d_d,$$

где P_{nom} – номинальная мощность двигателя вентилятора.

Примем суммарную мощность двигателей вентиляторов за базовую величину:

$$P_{\Sigma} = P_{nom}N.$$

Учтем выражение (5) и требование $\Delta\theta = \Delta\theta_r^*$, выразим мощность P_d в относительных единицах и установим зависимость мощности двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада:

$$P_d^*(\Delta\theta_r^*) = \frac{P_d}{P_{\Sigma}} = \frac{d_d}{N} = \beta_d = \Delta\theta_r^*, 0 \leq \Delta\theta_r^* \leq 1. \quad (6)$$

При достаточно большом количестве вентиляторов, что имеет место на практике, можно без существенной погрешности пренебречь дискретностью изменения числа вентиляторов и принять зависимость $P_d^*(\Delta\theta_r^*)$ линейной. Соответствующий график (прямая 1) показан на рис. 1.

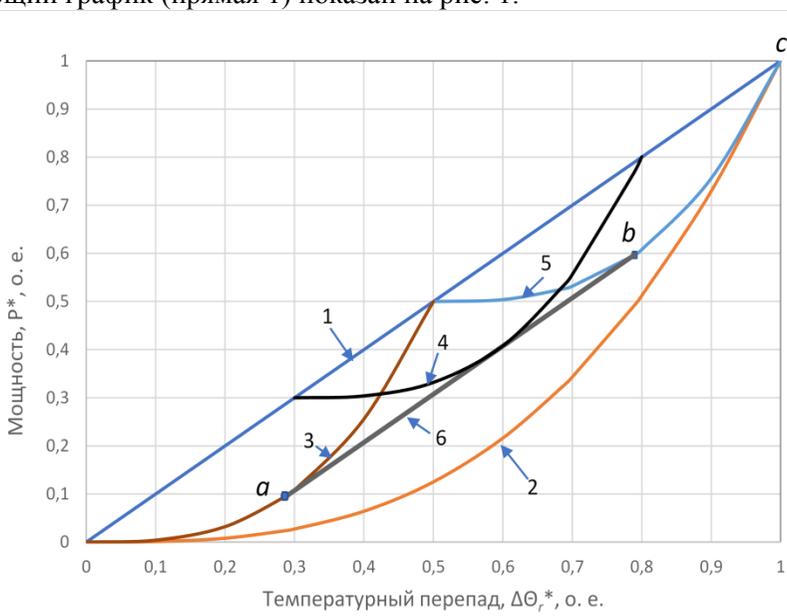


Рис. 1. Графики зависимости мощности P^* двигателей вентиляторов от требуемого температурного перепада $\Delta\theta_r^*$, о. е.: 1 – дискретное управление; 2 – частотное управление; 3–5 – комбинированное управление

Частотное управление

При частотном управлении всем N вентиляторам задается одинаковая скорость, а температурный перепад линейно зависит от относительной скорости n^* вентиляторов [4–7]:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_f = \Delta\Theta_{nom}n^*; n^* = \frac{n}{n_{nom}},$$

где n, n_{nom} – текущая и номинальная скорость соответственно.

В относительных единицах

$$\Delta\Theta^* = \Delta\Theta_f^* = n^*. \quad (7)$$

Мощность на валу частотно-регулируемых двигателей вентиляторов зависит от куба относительной скорости [7, 10–12]:

$$P_f = P_{nom}N(n^*)^3.$$

Или в относительных единицах:

$$P_f^* = \frac{P_f}{P_\Sigma} = (n^*)^3. \quad (8)$$

Приняв во внимание требование $\Delta\Theta_f^* = \Delta\Theta_r^*$ и формулы (7), (8), зависимость мощности ЧРП вентиляторов от требуемого температурного перепада в относительных единицах можно представить в виде:

$$P_f^*(\Delta\Theta_r^*) = \frac{P_f}{P_\Sigma} = (n^*)^3 = (\Delta\Theta_r^*)^3. \quad (9)$$

График зависимости $P_f^*(\Delta\Theta_r^*)$ приведен на рис. 1 (кривая 2).

Комбинированное управление

В этом случае одна часть вентиляторов установки приводится в движение ЧРП и регулирование осуществляется одновременным изменением частоты вращения вентиляторов. Вторая часть вентиляторов приводится в движение дискретно-регулируемыми приводами.

Обозначим относительное количество вентиляторов (долю), приводимых в движение ЧРП, – α , долю дискретно регулируемых приводов – β_0 :

$$\alpha = d_f/N, \beta_0 = d_{d0}/N, \alpha < 1, \beta_0 < 1, \alpha + \beta_0 = 1, \quad (10)$$

где d_f, d_{d0} – количество частотно- и дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов соответственно.

Как показал анализ, для достижения максимальной энергетической эффективности при комбинированном регулировании следует полностью использовать вентиляторы с ЧРП и варьировать количество d_{dc} включенных дискретно-регулируемых двигателей:

$$\alpha = const, n^* = var, \beta_c = d_{dc}/N = var, \beta_c \leq \beta_0.$$

Общий температурный перепад на УОГ, как показал анализ уравнения теплового баланса, можно представить в виде двух составляющих. Одна из них $\Delta\Theta_{dc}$ создается вентиляторами с дискретно-регулируемыми приводами, вторая $\Delta\Theta_{fc}$ – вентиляторами с ЧРП:

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{dc} + \Delta\Theta_{fc}.$$

Выразим температурные перепады в относительных единицах:

$$\Delta\Theta^* = \Delta\Theta_{dc}^* + \Delta\Theta_{fc}^*, \quad (11)$$

где

$$\Delta\theta_{dc}^* = \Delta\theta_{dc} / \Delta\theta_{nom}; \Delta\theta_{fc}^* = \Delta\theta_{fc} / \Delta\theta_{nom}.$$

С учетом (5) относительный температурный перепад, создаваемый вентиляторами с дискретно-регулируемыми двигателями,

$$\Delta\theta_{dc}^* = \beta_c.$$

Температурный перепад, создаваемый вентиляторами с ЧРП, определяется их количеством d_f и согласно (7) относительной частотой вращения:

$$\Delta\theta_{fc} = \Delta\theta_{nom} \frac{d_f}{N} n^* = \Delta\theta_{nom} \alpha n^*.$$

В относительных единицах

$$\Delta\theta_{fc}^* = \alpha n^*. \quad (12)$$

На основании выражения (12) относительная частота вращения ЧРП вентиляторов, соответствующая температурному перепаду $\Delta\theta_{fc}^*$,

$$n^* = \frac{1}{\alpha} \Delta\theta_{fc}^*.$$

Или, с учетом соотношения (11),

$$n^* = \frac{1}{\alpha} (\Delta\theta^* - \beta_c). \quad (13)$$

Мощность дискретно-регулируемых приводов вентиляторов согласно выражению (6) в относительных единицах

$$P_d^* = \frac{P_c}{P_\Sigma} = \frac{d_{dc}}{N} = \beta_c = \Delta\theta_{dc}^*. \quad (14)$$

Мощность на валу ЧРП вентиляторов при комбинированном регулировании зависит от их числа и куба относительной частоты вращения:

$$P_{fc} = P_{nom} d_{fc} (n^*)^3.$$

Приняв во внимание выражение (13) для относительной частоты вращения, мощность на валу ЧРП вентиляторов в относительных единицах представим в виде

$$P_{fc}^* = \frac{P_{fc}}{P_\Sigma} = \alpha (n^*)^3 = \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta^* - \beta_c)^3. \quad (15)$$

Мощность на валу двигателей вентиляторов при комбинированном управлении складывается из мощности на валу P_{dc}^* (14) дискретно-регулируемых приводов и мощности на валу P_{fc}^* (15) двигателей частотно-регулируемых приводов:

$$P_c^* = P_{dc}^* + P_{fc}^* = \beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta^* - \beta_c)^3.$$

С учетом технологического требования: $\Delta\theta^* = \Delta\theta_r^*$ мощность при комбинированном управлении

$$P_c^*(\Delta\theta_r^*, \beta_c) = \beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta_r^* - \beta_c)^3. \quad (16)$$

Графики, отражающие зависимость мощности на валу вентиляторов P_c^* от требуемого температурного перепада для $\alpha = 0,5$, приведены на рис. 1: кривая 3 – $\beta_c = 0$; кривая 4 – $\beta_c = 0,25$; кривая 3 – $\beta_c = 0,5$.

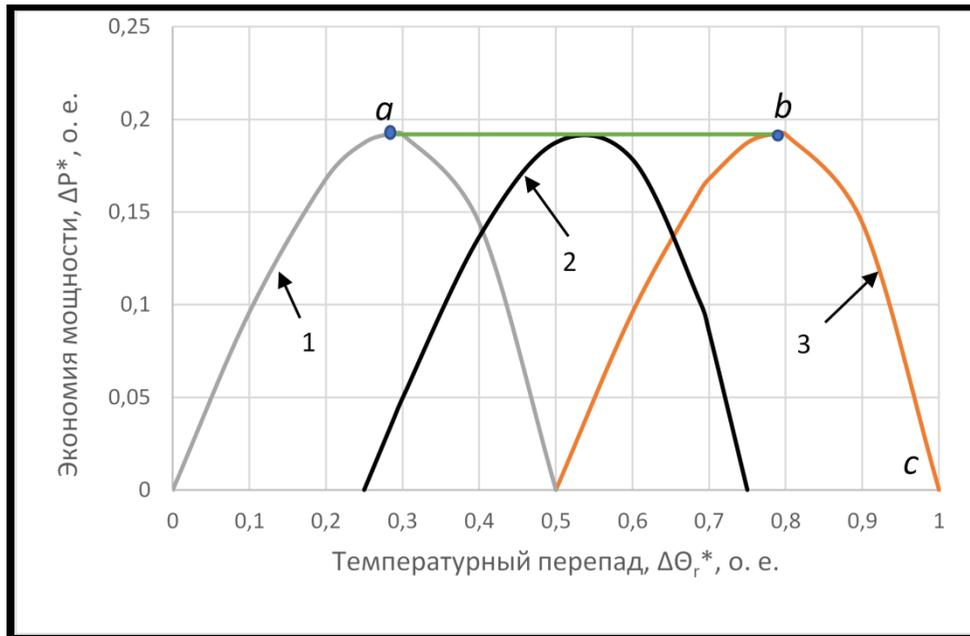


Рис. 2. Графики экономии мощности для $\alpha = 0,5$ при комбинированном управлении

На основе выражений (6), (16) оценим экономию мощности на валу двигателей вентиляторов при использовании комбинированного управления вместо дискретного:

$$\Delta P_{a-c}^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_c) = P_a^*(\Delta \Theta_r^*) - P_c^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_c) = \Delta \Theta_r^* - \left[\beta_c + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta \Theta_r^* - \beta_c)^3 \right]. \quad (17)$$

На рис. 2 показаны графики экономии мощности для $\alpha = 0,5$ и различных значений относительного числа включенных дискретно-регулируемых двигателей: $\beta = 0$ – кривая 1; $\beta = 0,25$ – кривая 2; $\beta = 0,5$ – кривая 3.

2. Оптимальный алгоритм комбинированного управления

Экономия мощности при фиксированном значении α , как следует из выражения (17), зависит от требуемого температурного перепада $\Delta \Theta_r^*$ и числа β_c включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов. Примем экономию мощности $\Delta P_{a-c}^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_c)$ в качестве критерия оптимизации и сформулируем задачу оптимизации стационарных режимов комбинированного управления в виде: найти оптимальное значение β_{opt} включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов, доставляющее максимум критерию оптимизации ΔP_{a-c}^* в условиях ограничений (10) и требований технологического режима $\Delta \Theta^* = \Delta \Theta_r^*$:

$$\Delta P_{opt}^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_{opt}) = \min \Delta P_{a-c}^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_c).$$

Экономия мощности при оптимальном комбинированном управлении

$$\Delta P_{opt}^*(\Delta\theta_r^*, \beta_{opt}) = \Delta\theta_r^* - \left[\beta_{opt} + \frac{1}{\alpha^2} (\Delta\theta_r^* - \beta_{opt})^3 \right]. \quad (18)$$

Исследование функции (18) показало, что она имеет три характерных интервала.

На первом интервале изменения требуемого температурного перепада

$$0 \leq \Delta\theta_r^* < \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

действует ограничение $\beta_c \geq 0$ и оптимальное число включенных дискретно-регулируемых двигателей $\beta_{opt} = 0$. Соответственно, регулирование температурного перепада на этом интервале следует вести только за счет изменения скорости частотно-регулируемых двигателей вентиляторов. На графике мощности P_c^* (рис. 1) и экономии мощности (рис. 2) это участки $0-a$. Экономия мощности на этом интервале определяется соотношением (18), а оптимальная частота вращения вентиляторов с учетом формулы (13)

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\alpha} \Delta\theta_r^*.$$

Максимум функции (18) достигается на втором интервале изменения требуемого значения температурного перепада

$$\frac{\alpha}{\sqrt{3}} \leq \Delta\theta_r^* \leq \beta_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{3}}. \quad (20)$$

Оптимальное относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей на этом интервале

$$\beta_{opt} = \Delta\theta_r^* - \frac{\alpha}{\sqrt{3}}. \quad (21)$$

Выражение для экономии мощности (18) на втором интервале изменения $\Delta\theta_r^*$ при оптимальном комбинированном управлении после преобразований приведено к виду

$$\Delta P_{opt}^* = \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Соотношение для оптимального значения относительной частоты вращения частотно-регулируемых двигателей вентиляторов получено подстановкой в формулу (13) $\beta_c = \beta_{opt}$ и $\Delta\theta^* = \Delta\theta_r^*$ и приведено к виду

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\sqrt{3}}. \quad (23)$$

Таким образом, на втором интервале изменения $\Delta\theta_r^*$ при фиксированном значении относительного числа α частотно-регулируемых двигателей вентиляторов экономия мощности остается неизменной.

График мощности P_c^* показан на рис. 1 (кривая 6). Рассматриваемому интервалу изменения $\Delta\theta_r^*$ соответствует участок графика $a-b$. Аналогичный участок показан на графике экономии мощности (рис. 2).

На третьем интервале изменения $\Delta\theta_r^*$

$$\beta_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{3}} < \Delta\theta_r^* \leq 1 \quad (24)$$

вступает в действие ограничение на максимальное число включенных дискретно-регулируемых двигателей. Все они должны быть включены: $\beta_{opt} = \beta_0$, и регу-

лирование температурного перепада осуществляется ЧРП.

На графиках мощности (рис. 1) и экономии мощности (рис. 2) этому интервалу соответствуют участки $b-c$. Экономия мощности определяется соотношением (18), а оптимальная частота вращения вентиляторов с учетом формулы (13)

$$n_{opt}^* = \frac{1}{\alpha} (\Delta\theta_r^* - \beta_0).$$

Экономия мощности в оптимальной комбинированной системе во всем допустимом интервале изменения требуемого температурного перепада на рис. 2 показывает кривая $0-a-b-c$.

Частотное управление может рассматриваться как частный случай комбинированного, когда $\alpha = 1$. Анализ выражения (17) показал, что максимальное значение экономии мощности в случае частотного управления достигается при $\Delta\theta_r^* \approx 0,6$ и составляет

$$\Delta P_{fmax}^* = \frac{2}{3\sqrt{3}} \approx 0,38.$$

Отношение экономии мощности по выражению (22) при комбинированном управлении на втором интервале изменения $\Delta\theta_r^*$ к максимальной экономии мощности при частотном управлении составляет

$$\frac{\Delta P_{opt}^*}{\Delta P_{fmax}^*} = \alpha.$$

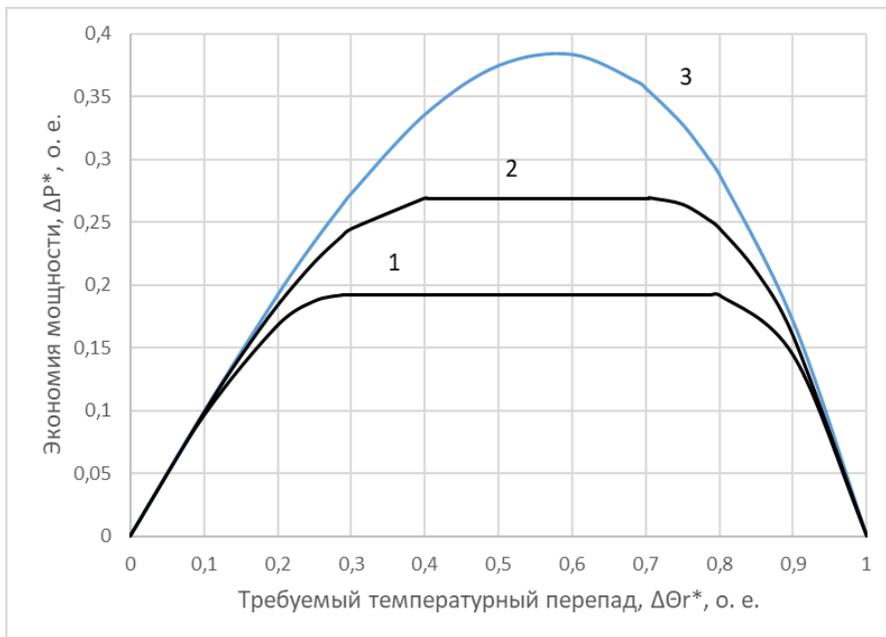


Рис. 3. Графики экономии мощности при оптимальном комбинированном и частотном управлении

Таким образом, частотное управление обеспечивает большую в $1/\alpha$ экономию мощности по сравнению комбинированным. Однако это имеет место только в случае работы системы со значением требуемого температурного перепада

$\Delta\theta_r^* \approx 0,6$. В реальных условиях, когда требуемый температурный перепад $\Delta\theta_r^*$ изменяется, значения экономии мощности будут отличаться менее существенно.

Графики зависимости экономии мощности от требуемого температурного перепада при оптимальном комбинированном управлении для значений $\alpha = 0,5$ и $\alpha = 0,7$ представлены на рис. 3 (кривые 1 и 2 соответственно). Там же показан график экономии мощности при частотном управлении (кривая 3).

Как следует из приведенных графиков, в случае оптимального комбинированного управления на участках ограничений по числу дискретно включаемых двигателей графики экономии мощности несущественно отличаются от графика, полученного для частотного управления. На втором интервале изменения требуемого температурного перепада экономия мощности в комбинированной системе остается постоянной, а ее значение снижается пропорционально α по сравнению с максимумом экономии при частотном управлении.

Например, в типовой УОГ с 12 АВО типа АВГ-75, содержащей $N = 24$ двигателя номинальной мощности $P_{nom} = 37$ кВт, в оптимальной комбинированной системе на втором интервале согласно выражению (22) будет достигаться экономия мощности

$$\Delta P = \Delta P_{opt}^* N P_{nom} = \frac{2\alpha}{3\sqrt{3}} N P_{nom} = 163 \text{ кВт.}$$

3. Реализация оптимального алгоритма комбинированного управления

Остановимся на вопросе построения системы оптимального комбинированного управления. Такую систему целесообразно выполнять в виде двух подсистем: дискретного и частотного управления.

Возможна реализация полученного оптимального алгоритма с использованием для дискретной подсистемы принципа управления по разомкнутому циклу.

В этом случае первая подсистема должна обеспечивать вычисление оптимального относительного значения числа включенных дискретно-регулируемых двигателей вентиляторов в соответствии с выражением (21) и ограничениями (10). Число включенных двигателей с учетом дискретности задается равным

$$d_{dc} = \left[d'_{dc} \right],$$

где $\left[d_{dc} \right]$ – наименьшее целое, большее или равное d'_{dc} , определяемое из соотношения

$$d'_{dc} = \beta_{opt} N.$$

Значение $\Delta\theta_{nom}$, необходимое для расчетов β_{opt} , может быть определено по результатам измерений температуры на входе и выходе АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов.

Вторую подсистему целесообразно выполнять в виде САУ, замкнутой по температуре газа на выходе УОГ, что обеспечит стабилизацию температуры на заданном уровне и поддержание оптимального значения частоты вращения вентиляторов, оснащенных ЧРП.

Более предпочтительным по сравнению с рассмотренным представляется вариант реализации алгоритма управления электроприводами в комбинированной системе с использованием информации о скорости частотно-регулируемых приводов вентиляторов.

Как следует из вышеизложенного, относительная скорость ЧРП на первом интервале оптимального управления меньше оптимальной n_{opt}^* по выражению (23): $n^* \leq n_{opt}^*$, а относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей $\beta_{opt} = 0$.

На втором интервале должно поддерживаться оптимальное значение скорости n_{opt}^* .

На третьем интервале $n^* \geq n_{opt}^*$, а относительное число включенных дискретно-регулируемых двигателей $\beta_{opt} = \beta_0$.

С учетом этих особенностей оптимальный алгоритм управления дискретно-регулируемыми двигателями может быть изложен в следующем виде.

Если текущее значение скорости ЧРП в замкнутой по температуре подсистеме частотного регулирования превышает оптимальное значение, дискретная подсистема формирует сигнал на подключение дополнительного двигателя; в противоположной ситуации вырабатывается сигнал на отключение двигателя. При выходе системы на ограничение $\beta_{opt} = 0$ или $\beta_{opt} = \beta_0$ число дискретно-регулируемых двигателей должно оставаться неизменным.

В такой системе будет исключена необходимость расчета β_{opt} , обеспечена стабилизация заданного значения температуры на выходе УОГ и автоматическое изменение числа включенных дискретно-регулируемых двигателей.

Учитывая инерционность объекта управления, следует в САУ задавать зону допустимых отклонений текущей скорости от оптимального значения (зону нечувствительности) и выполнять переключения с выдержкой времени, достаточной для выхода системы на стационарный режим работы.

4. Энергетическая эффективность комбинированного и частотного управления

Рассмотрим энергетическую эффективность использования ЧРП.

Она должна оцениваться сопоставлением затрат на реализацию проекта модернизации с сокращением эксплуатационных расходов, достигаемым прежде всего за счет снижения стоимости потребленной электроэнергии [16, 17].

Необходимые инвестиции в проект определяются стоимостью частотных преобразователей, затратами на их монтаж и наладку, а также при необходимости стоимостью дополнительного по условиям электромагнитной совместимости оборудования.

Стоимость сэкономленной за год электроэнергии при переходе от дискретного регулирования к частотному или комбинированному определяется экономией электроэнергии ΔW_{Σ} и тарифом на электроэнергию c_e или, при наличии электростанции собственных нужд, себестоимостью вырабатываемой электроэнергии:

$$C_e = \Delta W_{\Sigma} c_e.$$

Экономия электроэнергии в общем случае находится интегрированием по времени экономии мощности, которая при частотном и комбинированном управлении, в отличие от дискретного, нелинейно зависит от относительного требуемого температурного перепада $\Delta \theta_r^*$.

Значение $\Delta \theta_r^*$ изменяется на суточном и годовом интервалах времени, что обусловлено в основном суточными и сезонными вариациями температуры наружного воздуха. В этих условиях для детального расчета экономии электро-

энергии необходима информация о текущих значениях переменных, определяющих требуемое значение температурного перепада [7].

Для упрощения задачи оценки экономии электроэнергии целесообразно использовать широко применяемые в энергетике так называемые упорядоченные диаграммы, отражающие длительность работы установок и комплексов с неизменной требуемой производительностью за время цикла. За время цикла, как правило, принимается число часов работы установки в году.

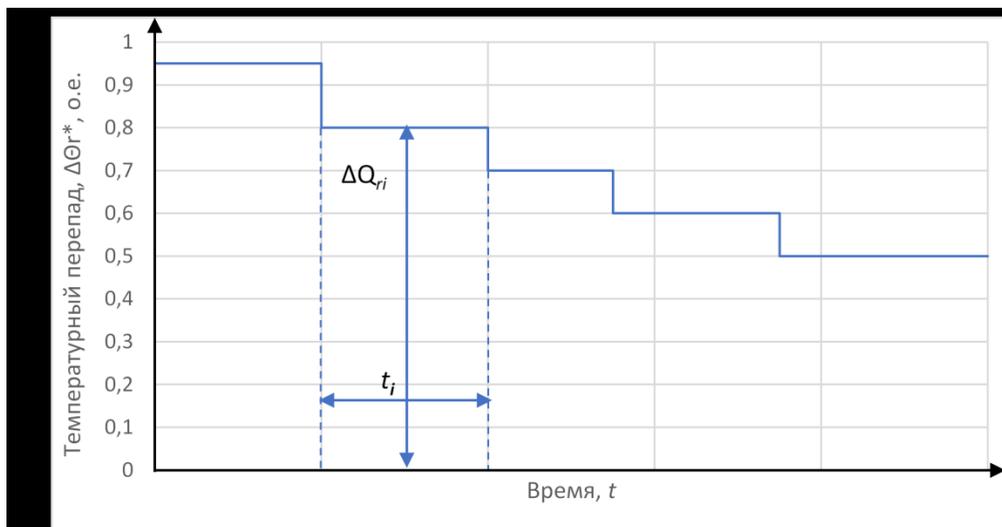


Рис. 4. Упорядоченная диаграмма требуемого температурного перепада

Применительно к рассматриваемой задаче упорядоченная диаграмма должна отражать длительность t_i работы установки с различными требуемыми постоянными значениями $\Delta\Theta_{r,i}^*$ за время цикла. Пример диаграммы приведен на рис. 4.

Подобные диаграммы могут быть получены из следующих соображений. В УОГ с дискретным регулированием согласно (6) относительная мощность на валу электродвигателей вентиляторов равна требуемому относительному перепаду температуры. Учитывая это, упорядоченные диаграммы, сформированные для мощности двигателей, можно рассматривать как упорядоченные диаграммы требуемого температурного перепада.

Информация для построения упорядоченных диаграмм мощности электроприводов УОГ может быть получена для действующих конкретных установок с дискретным регулированием по данным автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии или сведениям о длительности работы определенного количества двигателей установки.

Экономия электроэнергии при комбинированном управлении на каждом интервале постоянства требуемого температурного перепада определяется соотношением

$$\Delta W_{ic} = \Delta P_{iopt}^* P_{\Sigma} t_i.$$

Экономия электроэнергии за год находится суммированием экономии на отдельных интервалах:

$$\Delta W_{\Sigma c} = \sum_{i=1}^l \Delta W_{ic},$$

где l – количество интервалов упорядоченной диаграммы.

Простой срок окупаемости проекта [16, 17] использования комбинированного управления без учета дополнительных преимуществ использования ЧРП определяется выражением

$$T_c = \frac{k\alpha NC_f}{\Delta W_{\Sigma c} c_e},$$

где k – повышающий коэффициент, учитывающий затраты на монтаж и наладку ЧРП;

C_f – стоимость преобразователя частоты.

Для расчета срока окупаемости системы частотного управления следует в последнем выражении принять $\alpha = 1$, использовать соответствующее значение экономии электроэнергии и ввести дополнительный повышающий коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на мероприятия и оборудование, обеспечивающие электромагнитную совместимость.

Срок окупаемости систем оптимального комбинированного управления оказывается меньше, чем для частотных систем. Однако после окончания срока окупаемости прибыль от частотной системы выше за счет больших значений экономии электроэнергии.

Рассмотренная методика позволяет дать количественные оценки показателей энергетической эффективности конкретных систем частотного и комбинированного управления, работающих в определенных режимах.

Выводы

Задача управления температурой на выходе установки охлаждения газа может решаться использованием дискретного, частотного и комбинированного способов управления приводными двигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа.

Комбинированная система управления по сравнению с дискретной обеспечивает экономию мощности и электроэнергии, потребляемой на нужды охлаждения.

Оптимальный по критерию максимума экономии электроэнергии алгоритм комбинированного управления содержит интервал изменения требуемого температурного перепада, на котором осуществляется взаимосвязанное управление количеством включенных дискретно-регулируемых двигателей и скоростью ЧРП. Величина экономии мощности на этом интервале остается неизменной. На двух интервалах особого управления действуют ограничения на число включенных дискретно-регулируемых двигателей, и регулирование температурного перепада осуществляется только изменением скорости ЧРП.

Систему комбинированного управления, реализующую оптимальный алгоритм, целесообразно выполнять в виде замкнутой по температуре газа на выходе УОГ подсистемы частотного управления и взаимосвязанной с ней подсистемы дискретного управления.

Комбинированное управление по сравнению с частотным дает меньшую экономию мощности и электроэнергии. В то же время в комбинированной си-

стеме уменьшается количество ЧРП и требуемые затраты на реализацию проекта. Кроме того, могут быть уменьшены затраты на дополнительное оборудование, необходимое для решения проблем электромагнитной совместимости, возникающих в случае, когда мощность группы ЧРП соизмерима с мощностью питающего трансформатора.

Указанные факторы должны учитываться при технико-экономическом обосновании проектов модернизации электротехнических комплексов УОГ.

Полученные аналитические выражения экономии мощности и электроэнергии в оптимальной комбинированной системе управления могут быть использованы для сравнительной оценки энергетической эффективности альтернативных вариантов проектов систем регулирования температурных режимов УОГ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крайнов В.Г.* Оптимизация режимов работы электроприводов установок охлаждения газа при транспортировке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 24 с.
2. *Ванцин А.Г.* Расчет работы узла воздушного охлаждения газа в условиях компрессорной станции магистрального газопровода // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 3. – С. 164–179 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>
3. *Шаихутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланчев В.А.* Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. – 2010. – № 9. – С. 40–41.
4. *Абакумов А.М., Степашкин И.П.* Исследование систем автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения природного газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2018. – № 2 (58). – С. 92–101.
5. *Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П.* Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6. – С. 130–134.
6. *Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н.* Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 110–113.
7. *Абакумов А.М., Антропов В.Е., Абакумов О.А.* Энергетическая эффективность установок охлаждения природного газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2019. – № 3. – С. 95–104.
8. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* The Adaptive Automatic Control System of Natural Gas Air-Cooling Unit // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. С. 8602811.
9. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No 3. P. 49–56.
10. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Крылов И.П.* Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 1. – С. 33–36.
11. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В.* Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1 (54). – Вып. 3. – С. 25–32.
12. *Кумар Б.К., Выгонюк П.И.* Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. – 2011. – № 1 (83). – С. 67–71.
13. *Артюхов И.И., Аршакаян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин Н.В., Тримбач А.А.* Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – № 1 (100). – Вып. 1. – С. 20–29.
14. *Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А.* Качество электроэнергии в системе электропитания газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 4 (60). – Вып. 2. – С. 165–170.

15. Бочкарева И.И. Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемых установок охлаждения газа с источниками электроснабжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. – 19 с.
16. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. – М.: Академия, 2008. – 208 с. ISBN 978-7695-2849-1.
17. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. – М.: АО ВНИИЭ, МЭИ, 1997. – 13 с.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2021 г.

COMBINED CONTROL OF FANS OF GAS COOLING UNITS ELECTRIC DRIVES

A.M. Abakumov, P.K. Kuznetsov

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

Abstract. *The problem of the temperature control at the outlet of gas cooling units of compressor stations of main gas pipelines is discussed. To solve the problem, a discrete or frequency control of electric motors of fans of gas air cooling devices is used. The problems of electromagnetic compatibility that arise in typical power supply systems of gas cooling installations when connecting electric motors of fans through frequency converters are noted. A combined fan motor control system is considered, in which the electric motors are divided into two groups. The electric motors of the first group are connected to the network directly, the second – through frequency converters. By reducing the number of electric motors connected to the network through frequency converters, the negative impact of frequency-controlled drives on the quality of electricity is reduced and the costs of modernization projects are reduced in comparison with the option of the variant using a frequency converter for each electric motor. The energy characteristics of the combined control system are analyzed. The relations that establish the relationship between the temperature difference at the cooling unit and the power of the fan motors for various control methods are obtained. The optimal control algorithm according to the criterion of maximum power saving is proposed, which provides for the interconnected control of the number of discrete-controlled motors and the speed of frequency-controlled drives. The variants of the implementation of the optimal control algorithm are discussed. Analytical expressions for power saving on the fan motor shaft in a combined system compared with a discrete one and a method for estimating energy savings are considered. The obtained results are recommended to be used to assess the technical and economic efficiency of projects for the modernization of electrical complexes of gas cooling units.*

Keywords: *main gas pipelines, compressor stations, gas cooling units, frequency-controlled drive, control systems.*

REFERENCES

1. Krainov V.G. Optimization of operating modes of electric drives of gas cooling installations during transportation: Author's abstract. dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.09.03. Samar. state tech un-t, Samara, 2014. 24 p.

*Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Pavel K. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

2. *Vanchin A.G.* Calculation of the operation of the gas air cooling unit in the conditions of the compressor station of the main gas pipeline // Electronic scientific journal "Oil and Gas Business". 2013. Issue. No. 3. Pp. 164–179. <http://www.ogbus.ru>
3. *Shaikhutdinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Modern AVO gas – a resource of energy saving in the gas industry // Gas industry. 2010. No. 9. Pp. 40–41.
4. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* Investigation of automatic control systems for air cooling devices for natural gas // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences". No. 2 (58). 2018. Pp. 92–101.
5. *Abakumov A.M., Migachev A.V., Stepashkin I.P.* Investigation of the control system for a natural gas air cooling apparatus // Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2016. No. 6. Pp. 130–134.
6. *Abakumov A.M., Alimov S.V., Migacheva L.A., Mosin V.N.* Optimization of stationary operating modes of gas cooling units of compressor stations of main gas pipelines // Izvestiya vuzov. Electromechanics. 2011. No. 3. Pp. 110–113.
7. *Abakumov A.M., Antropov V.E., Abakumov O.A.* Energy efficiency of natural gas cooling installations with a frequency-controlled fan drive // Vestnik SamSTU, Series "Technical Sciences". 2019. No. 3. Pp. 95–104.
8. *Abakumov A.M., Stepashkin I.P.* The Adaptive Automatic Control System of Natural Gas Air-Cooling Unit // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. Pp. 8602811.
9. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. Pp. 49–56.
10. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Krylov I.P.* Automatic control of air cooling devices at gas transmission facilities // Mechatronics, automation, control. 2003. No. 1. Pp. 33–36.
11. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.Sh., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations // Bulletin of the Saratov State. tech. un-that. 2011. No. 1 (54). Issue 3. Pp. 25–32.
12. *Kumar B.K., Vygoniuk P.I.* Automatic control system for air cooling devices for raw natural gas // Bulletin of the Kazakh National Technical University. K.I. Satnaev. 2011. No. 1 (83). Pp. 67–71.
13. *Artyukhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabsky M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A.* Some aspects of using a variable frequency drive in compressed gas air cooling systems // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2006. No. 1 (100). Issue 1. Pp. 20–29.
14. *Artyukhov I.I., Bochkareva I.I., Trimbach A.A.* The quality of electricity in the power supply system of a gas turbine compressor station in the conditions of equipping gas cooling units with a frequency-controlled electric drive of fans // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2011. No. 4 (60). Issue 2. Pp. 165–170.
15. *Bochkareva I.I.* Ensuring electromagnetic compatibility of frequency-controlled gas cooling units with power supply sources: Author's abstract. dis. ... Cand. technical sciences: 05.09.03. Saratov: Sarat. state tehn. un-t, 2012. 19 p.
16. *Ilyinsky N.F., Moskalenko V.V.* Electric drive: energy and resource saving. M.: Academy, 2008. 208 p. ISBN 978-7695-2849-1.
17. Instructions for calculating the economic efficiency of using a variable frequency drive. M.: AO VNIIE, MEI. 1997. 13 p.

УДК 621.646.986

УСТРАНЕНИЕ ЗАКЛИНИВАНИЯ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ТРУБОПРОВОДА

А.А. Базаров, Н.В. Бондарева, А.А. Навардян

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

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования процессов термической деформации задвижек при снижении температуры окружающей среды. В некоторых видах клиновых задвижек происходит заклинивание, для устранения которого требуется подогрев корпуса. Указанная проблема характерна для задвижек с жестким клином, но причины явления до конца не объяснены. В связи со значительной мощностью электроприводов задвижки иногда наблюдается разрушение штока задвижки.

Целью работы является определение характера распределения напряжений между конструктивными элементами задвижки, приводящих к заклиниванию при снижении температуры окружающей среды, и поиск параметров процесса нагрева, обеспечивающих минимальные энергетические и временные затраты.

Для исследования тепловых процессов в корпусе задвижки разработана численная модель, описывающая передачу тепла в элементах конструкции и жидкости. С тепловой моделью объединена модель упругих деформаций. Это позволяет производить совместные расчеты без внесения дополнительных погрешностей. Возникающие в процессе охлаждения тепловые деформации приводят к непропорциональному изменению размеров задвижки и появлению термонапряжений, являющихся причиной заклинивания. Моделирование процессов тепловой деформации при снижении температуры показало, что в средней плоскости клина возникают силы давления разного знака. На средней по высоте горизонтальной линии возникает сжимающее давление, а в нижней и верхней точках – растягивающее. Для устранения сжимающих усилий произведен локальный подогрев в нескольких областях корпуса. В ходе исследований выяснено, что самым эффективным вариантом является нагрев нижней полусферической поверхности корпуса. Для рассматриваемой задачи нагрев в течение тридцати минут позволяет снизить термонапряжения в клине и, соответственно, сжимающие усилия до минимальных значений, что устраняет заклинивание задвижки. Для нагрева корпуса предусмотрен индукционный нагреватель полусферической формы, имеющий магнитопровод. Предложенная конструкция позволяет использовать напряжение промышленной частоты без понижающего трансформатора и компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: задвижка с жестким клином, заклинивание, тепловые деформации, метод конечных элементов.

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

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

Навасардян Ашот Александрович, аспирант.

Бондарева Наталья Викторовна, аспирант.

Введение

В качестве запорной арматуры на нефте- и газопроводах используются различные типы задвижек. Они успешно выполняют функции управления потоками, но имеют определенные недостатки, связанные с износом герметизирующих поверхностей.

Для клиновых задвижек, имеющих жесткий клин, характерна проблема, выражающаяся в заклинивании в условиях снижения температуры окружающей среды. Данное явление проявляется в задвижках с жестким клином одной разновидности конструкции, отличающейся сужением корпуса в нижней части.

Применение сплошного клина в стальных задвижках позволяет обеспечить хорошую герметичность за счет хорошей обработки поверхностей клина и седла [1]. При снижении температуры воздуха относительно значения, при котором произведено закрывание, возможно заклинивание [2]. Подобное явление исключено в задвижках с составным двухдисковым запирающим элементом. Кроме перепадов температуры причинами заклинивания могут быть коррозия и износ уплотняющих поверхностей [3].

Обеспечение герметичности запорного органа при использовании жесткого клина требует тщательной механической обработки прилегающих поверхностей клина и седла. Дополнительно требуется приложение значительных усилий с помощью редукторов и электроприводов [4]. В случае термических деформаций в зимнее время года происходит увеличение сдвигавшего усилия на отдельных участках поверхности клина. В результате для открытия задвижки требуется большее усилие. В таких ситуациях возможен выход из строя электропривода или обрыв штока (шпинделя) задвижки [2]. Кроме разрушения конструктивных элементов возможна перегрузка электропривода, что усугубляется с учетом длительности процесса открывания, достигающего пяти минут.

Проведенные исследования термодформационных процессов на упрощенной численной модели задвижки показали сложный характер процессов и неоднозначность при определении зон нагрева корпуса [5].

Целью работы является исследование процессов охлаждения и последующего локального нагрева, сопровождающихся напряжениями и деформациями конструкции, поиск параметров системы нагрева для эффективного решения проблемы устранения заклинивания задвижек.

На рис. 1 представлена модель конструкции задвижки с жестким клином, корпус которой имеет форму конической оболочки, ограниченной с нижней и верхней сторон фрагментами сферических оболочек. Для упрощения моделирования некоторые внутренние детали не представлены. В целях снижения времени расчета размеры задвижки приняты уменьшенными. Диаметр горизонтальной цилиндрической части модели равен 0,1 м.

Формулировка задачи

Исследованию надежности работы задвижек посвящены работы [6–14], в которых рассматриваются вопросы, связанные с методиками расчета [6; 7], анализом причин разрушения [8; 9], математическим моделированием термонапряжений и деформаций [10–13] и совершенствованием конструкции для улучшения характеристик [14].

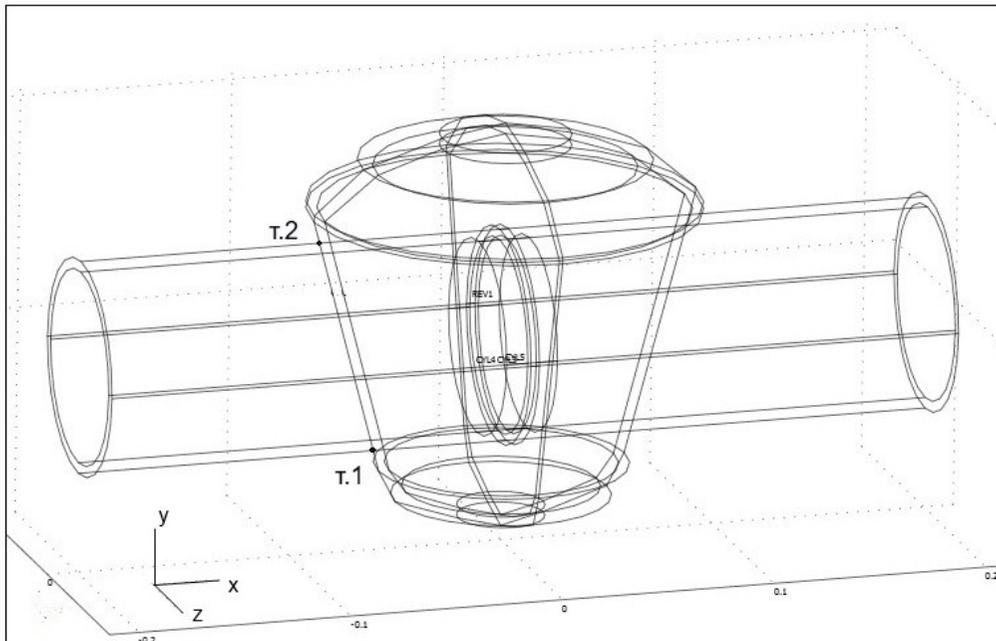


Рис. 1. Геометрическая модель задвижки с конусообразным корпусом

В работе [5] показано, что деформации корпуса и возникающие напряжения в системе «седло – клин» при изменении температуры в силу различия физических свойств и геометрической несимметрии зависят от места расположения рассматриваемых точек. В ходе анализа процессов возникновения напряжений в задвижке выполнено моделирование процессов деформации в симметричной и несимметричной конструкциях и исследование влияния формы на величины деформации и напряжений.

При поиске решения задачи устранения термонапряжений, приводящих к заклиниванию, требуется разработка математических моделей тепловых процессов и процессов упругой деформации в корпусе задвижки [15–17]. Использование связанных (мультифизических) моделей позволяет провести более точные расчеты, так как обеспечивается формирование внутренних источников тепловыделения и распределения температуры с учетом сложной геометрической формы. Для реализации связанной задачи использована программа Comsol.

Тепловые процессы в корпусе задвижки и жидкости внутри нее описываются дифференциальным уравнением в частных производных

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T, \quad (1)$$

которое дополнено граничными условиями на всех свободных поверхностях:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_L - T_{ext}).$$

Здесь λ – коэффициент теплопроводности;

Q – плотность внутренних источников тепла;

α – коэффициент конвективного теплообмена на поверхностях корпуса задвижки;

T_L – температура внешней поверхности задвижки;

T_{ext} – температура окружающей среды;

u – вектор скорости перемещения жидкости.

При использовании численного метода решения задачи наличие нескольких сред учитывается с помощью задания различных физических параметров для разных областей модели задвижки, заполненной жидкостью. Перенос тепла осуществляется не только за счет теплопроводности, но и за счет движения жидкости, обусловленного конвекцией. Включение в выражение (1) производных температуры по координатам с множителями в виде вектора скорости приводит к необходимости решения гидродинамической задачи. Связанная термодинамическая задача характеризуется большой ресурсоемкостью и плохой сходимостью вычислительного процесса даже для двумерной модели. Линеаризация данной задачи затруднена, так как сама природа возникновения конвективного движения жидкости связана с объемным расширением за счет нагрева. Для упрощения модели были проведены исследования процесса нагрева задвижки [5]. Было выяснено, что вихри жидкости имеют две области. В первой области, сосредоточенной в нижней части корпуса, под клином и седлом, вихри имеют небольшие размеры и не выходят за пределы указанной области. Посредством этих вихрей тепло переносится от основания корпуса к клину. Для нижней области допустимая погрешность расчетов достигается при замене конвективного процесса переноса тепла на процессы теплопроводности.

Вторая область расположена выше и характеризуется образованием крупных вихрей, распространяющихся до верхнего уровня жидкости. При расчете процессов переноса тепла между корпусом и внутренними элементами задвижки принято, что максимальное тепловыделение сосредоточено в нижней части. Это позволяет пренебречь погрешностью при упрощении расчетной схемы до односвязной тепловой задачи учета гидродинамических процессов.

Диапазон температур в задвижке при разогреве с помощью индукционных или резистивных нагревателей и одновременном охлаждении на воздухе составляет около 100 градусов, так как имеются ограничения, связанные с недопустимостью перегрева, парообразования или возникновения отложений на стенках.

В качестве материала задвижки используется сталь 35Л. Ее физические свойства приведены в табл. 1. Для процессов теплопередачи и упругой деформации в указанном диапазоне температур коэффициенты можно принять неизменными.

Для жидкости принят коэффициент теплопроводности нефти, равный $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. Неучет гидродинамики вносит погрешность в расчеты, однако компенсируется снижением теплового потока между стенкой корпуса и клином за счет конвективного теплопереноса в верхние слои жидкости. В работе [5] исследованы процессы переноса тепла с одновременным движением жидкости в задвижке. Условия одинаковы для обеих задач. При вертикальной скорости движения жидкости в пределах 2–4 см/с тепловые потоки от стенки в жидкость отличаются на 25 % от значений, полученных в модели без гидродинамики. Это позволяет упростить постановку задачи и сократить время расчета.

Основная проблема, требующая упрощения вычислительного процесса, связана с необходимостью совместного решения задач теплопроводности и упругой деформации [18, 19]. Объединение трех задач, включая гидродинамическую, ставит перед вычислителем нереально тяжелую проблему.

Физические свойства стали 35Л

Свойство	Ед.	Значения	
Температура	°C	- 20	100
Плотность	кг / м ³	7831	7804
Коэффициент теплопроводности	Вт / (м·°C)	55	51
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶	1 / °C	12	12.9
Теплоемкость	Джс / (кг·град)		470
Модуль Юнга, ×10 ¹¹	Па	2,12	2,06
Коэффициент Пуассона		0,287	0,292

Исследование термонапряжений в корпусе задвижки

Конструкция содержит клин с большей толщиной в верхней части. Поверхности клина и седла параллельны, что обеспечивает их хорошее прилегание друг к другу. Для исследования построена трехмерная модель.

В качестве геометрической модели принята конструкция, состоящая из горизонтальных участков цилиндрической оболочки (пустотелой трубы), между которыми располагается клин, и вертикальной конической оболочки. Вертикальная часть корпуса сверху и снизу ограничена полусферическими оболочками.

Жидкость в модели заполняет весь внутренний объем корпуса.

Расчет процессов охлаждения и деформации выполнен для диапазона температур окружающей среды от 20 до -20 °C. Модуль Юнга равен $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па. Возникающие деформации и напряжения обусловлены снижением температуры относительно начального значения 20 °C. На плоскости, проходящей через середину линии толщины клина, получено распределение давления, сжимающего клин с обеих сторон, для температуры окружающей среды, равной -20 °C (рис. 2).

Как видно из рис. 2, давление в плоскости клина имеет разную направленность. В верхней и нижней области давление на периферии направлено на создание зазора между клином и седлом, а в средней по высоте области сжимает клин прилегающими участками седла. В центральной части давления отсутствуют, так как клин имеет контакт не с металлическими участками корпуса, а с жидкостью.

Для более детального представления полученных давлений показаны диаграммы распределения на горизонтальной линии, проходящей в указанной плоскости на середине высоты клина при $y = 0$ (рис. 3).

На горизонтальной линии, проходящей через осевую линию клина (рис. 3), наблюдается симметричная картина давления для разных значений температуры.

Наблюдаемое на рис. 2 отрицательное давление в верхней и нижней областях клина не компенсирует давление в средней по высоте области, так как способствует созданию зазора без контакта с прилегающей поверхностью седла. Таким образом, для устранения заклинивающих напряжений и деформаций требуется разогрев всего корпуса или его отдельных участков.

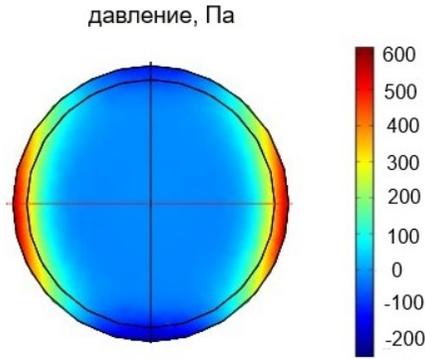


Рис. 2. Распределение давления в плоскости клина задвижки при $x = 0$

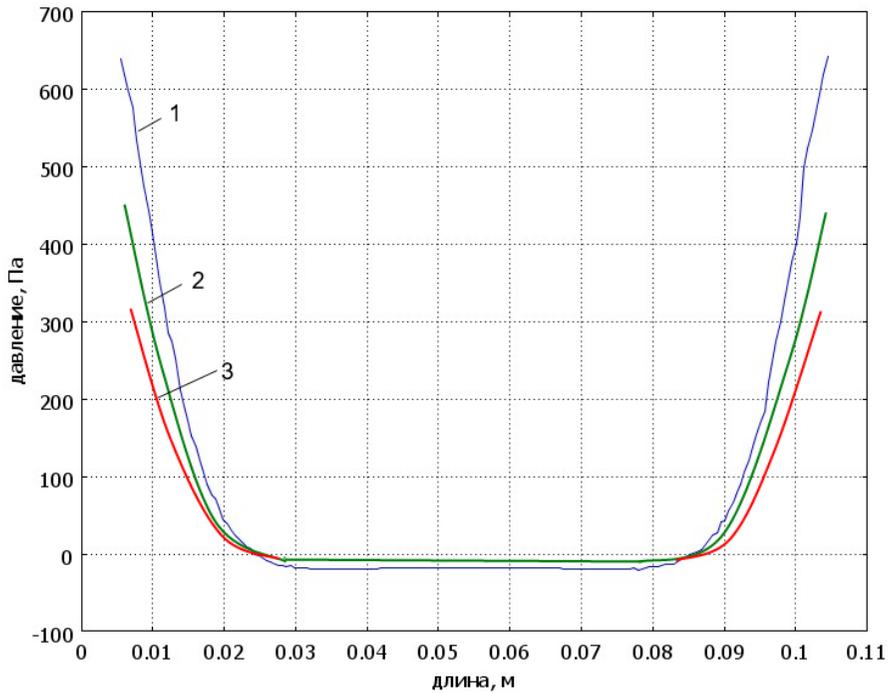


Рис. 3. Диаграммы давления на поперечной линии клина $x = 0, y = 0, z = [-0,5; 0,5]$ м при охлаждении с $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температуры среды: 1 – $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Моделирование нагрева корпуса с процессами теплопередачи между корпусом и жидкостью выполнено при задании источников тепловыделения в нижней части оболочки. Для управления процессом нагрева предусмотрено регулирование температуры в нижней точке, где достигается максимальное значение. Для реализации функции регулятора температуры использована ступенчатая функция H , которая позволяет в режиме релейного управления изменять мощность внутренних источников при достижении заданной температуры

$$Q = Q_{\max} \cdot (1 - H(T - T_z)).$$

Здесь T_z – температура задания.

Результаты решения задачи для задвижки с коническим корпусом представлены на рис. 4. Распределение температуры представлено в плоскостях для координат $x = -0,2$ м; $-0,1$ м; 0 ; $0,1$ м; $0,2$ м. Как видно из распределения температуры, средняя по высоте клина область прогрева до температуры 50 °С. Это позволяет гарантированно устранить эффект заклинивания.

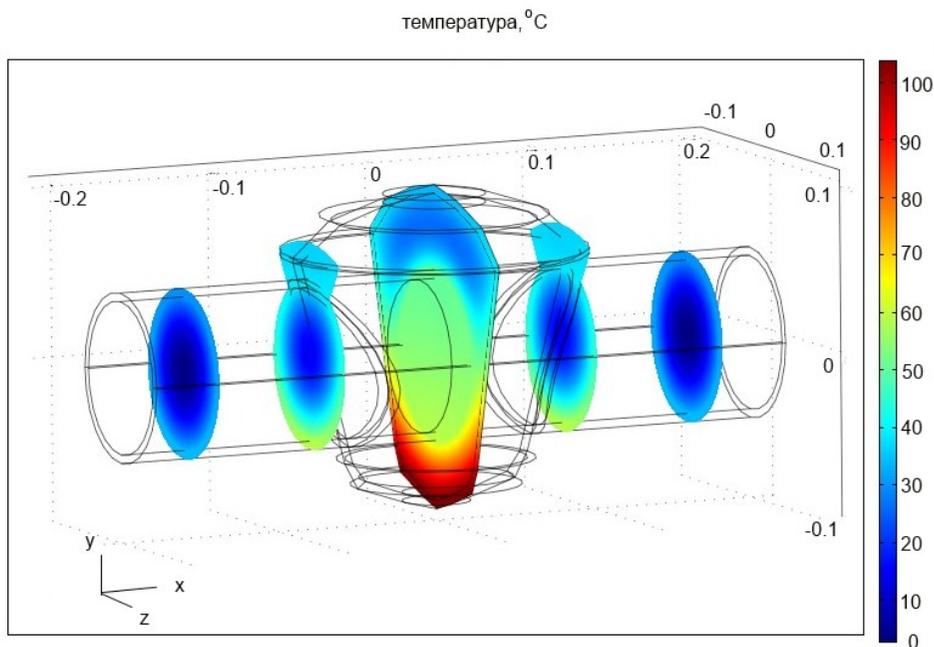


Рис. 4. Распределение температуры в слоях задвижки с трубой после нагрева в течение 2 часов

На рис. 5 представлены диаграммы температуры в нескольких точках, включая точку с датчиком температуры. Как видно из диаграмм, разогрев до исходного значения температуры при запирании задвижки, равного 20 °С, происходит в момент времени 2300 с. К сожалению, судить по температурам и деформациям в отдельных точках о достаточном снижении заклинивающих усилий в системе «клин – седло» сложно. Поэтому по мере прогрева корпуса задвижки целесообразно периодически подавать кратковременные импульсы на привод задвижки, чтобы проверить возможность открывания.

Мощность тепловыделения в корпусе задвижки при нагреве слабо зависит от температуры, так как диапазон изменения удельного сопротивления невелик, магнитная проницаемость также практически постоянна. Для предотвращения перегрева жидкости возле внутренней стенки используется система релейного регулирования температуры с использованием датчика температуры, прикрепленного к внешней поверхности корпуса. По мере прогрева корпуса и граничащих с ним слоев жидкости среднее значение мощности нагрева снижается. В зависимости от мощности нагревателя разогрев нижней поверхности корпуса происходит за разное время (рис. 6).

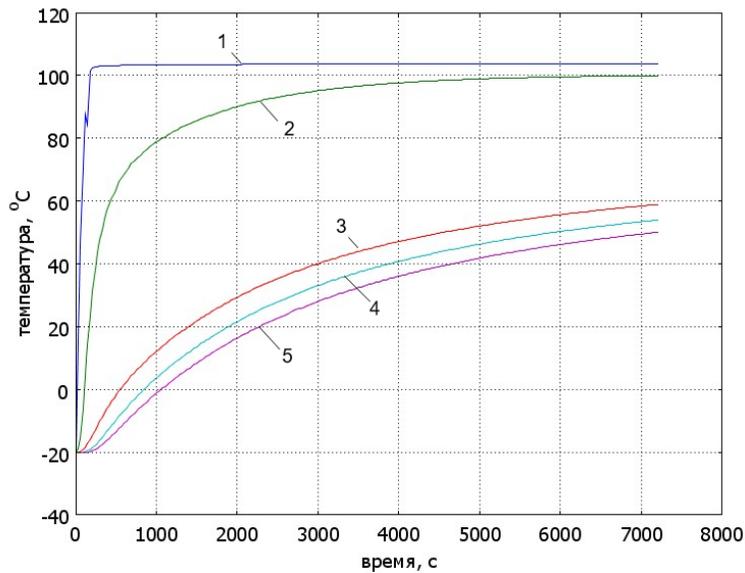


Рис. 5. Временные диаграммы температуры при нагреве задвижки в точках $x = 0, z = 0$: 1 – $y = -0,086$ м; 2 – $y = -0,08$ м; 3 – $y = -0,05$ м; 4 – $y = 0$; 5 – $y = 0,05$ м

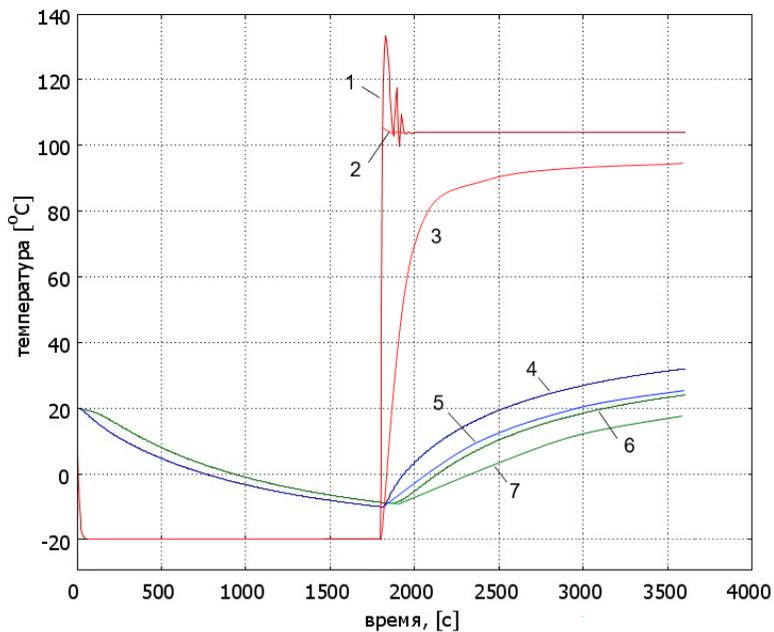


Рис. 6. Диаграммы температуры в точках задвижки при разной мощности тепловыделения:

1 – на поверхности при мощности 4900 Вт; 2 – на поверхности при мощности 2100 Вт; 3 – на поверхности при мощности 136 Вт; 4 – на нижней поверхности клина при мощности 4900 и 2100 Вт; 5 – на верхней поверхности клина при мощности 4900 и 2100 Вт; 6 – на нижней поверхности клина при мощности 136 Вт; 7 – на верхней поверхности клина при мощности 136 Вт

Достижение допустимого значения температуры, равного 100 °С, происходит одинаково быстро при максимальной мощности тепловыделения 4900 и 2100 Вт. Диаграммы температуры в точках на нижней и верхней поверхностях клина совпадают для этих мощностей. Снижение мощности нагрева до 136 Вт приводит к замедлению роста температуры нижней поверхности корпуса, но прогрев клина отстает во времени не столь существенно.

Электромагнитная задача описывается системой уравнений Максвелла, которые затем преобразуются в более удобный вид в терминах векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial rA}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rA}{\partial r} \right] - j\omega A - J_0 = 0; \quad (2)$$

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

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

В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области:

$$A|_{S_1 \in S} = 0,$$

где S_1 – удаленная граница расчетной области.

Так как задача осесимметричная, то на осевой линии задается равенство нулю производной потенциала.

Для корректного учета нелинейных свойств задачи задается кривая намагничивания. Отличие материала Fluxtrol A от электротехнической стали состоит в том, что максимальное значение индукции при напряженности поля 20000 А/м не превышает 0,8 Тл. Для стали при той же напряженности индукция достигает значения 1,6 Тл. В результате решения электромагнитной задачи определяются значения магнитного потенциала для каждого элемента, по которым производится расчет токов и других переменных.

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

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

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

Магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля, поэтому решение нелинейной задачи (2) выполняется итерационным способом.

В работах, посвященных аналогичным электромагнитным задачам, рассмотрены особенности распределения магнитного поля и внутренних источников тепловыделения в нагрузке [20, 21].

Для осуществления нагрева предложена конструкция индуктора, содержащая многослойную катушку и внешний магнитопровод (рис. 7).

Для питания индуктора выбрано напряжение частотой 50 Гц. При определении параметров индуктора были проведены расчеты для конструкции без магнитопровода и с магнитопроводом из разных материалов: электротехнической стали или феррита марки Fluxtrol A (табл. 2). Без магнитопровода энергетические характеристики (КПД и коэффициент мощности) являются неудовлетворитель-

ными и не обеспечивают необходимую мощность без принудительного охлаждения катушки индуктора, что в полевых условиях непрактично и ненадежно.

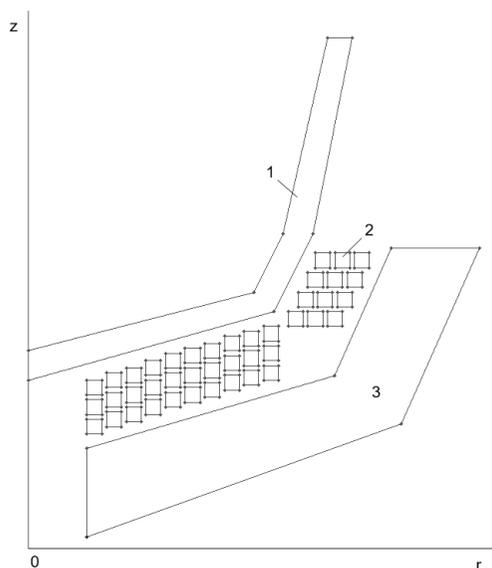


Рис. 7. Индуктор с фрагментом корпуса задвижки:
1 – корпус; 2 – катушка индуктора; 3 – магнитопровод

Таблица 2

Параметры индукторов с магнитопроводами

№ п/п	d , мм	I , А	U , В	$P_{заср}$, Вт	$P_{инд}$, Вт	S , ВА	$\cos \varphi$	η_3
1	–	400	22	305	2018	8800	0,23	0,151
2	10 (F1)	400	33	825	2552	13200	0,193	0,323
3	20 (F1)	400	34	888	2615	13600	0,192	0,34
4	20 (ст)	400	35	914	2643	14000	0,188	0,346
5	20 (F1)	200	18	210	642	3600	0,178	0,327
6	20 (ст)	200	18	216	648	3600	0,18	0,333

На рис. 8 показано распределение индукции в системе «индуктор – нагрузка – магнитопровод», где видно значительное ослабление поля рассеяния за пределами магнитопровода. Проведенные расчеты для магнитопровода из стали (ст) или феррита (F1) продемонстрировали слабое влияние материала на энергетические характеристики нагревателя. Толщина магнитопровода d больше 20 мм становится избыточной, так как дальнейшее повышение КПД и коэффициента мощности практически незаметно.

В расчетах получено минимальное значение магнитной проницаемости на поверхности корпуса задвижки, равное 120. На расстоянии 10 мм от поверхности проницаемость увеличивается до 1000. Аналогичные показатели наблюдаются в магнитопроводе, если он изготовлен из электротехнической стали. При замене

стали на феррит минимальное значение составляет 120, а максимальное 130, то есть при толщине магнитопровода 20 мм поле ослабляется не полностью и частично выходит за пределы магнитопровода. Однако полученные характеристики индуктора позволяют сделать вывод об эффективности магнитопровода даже с ограниченной толщиной.

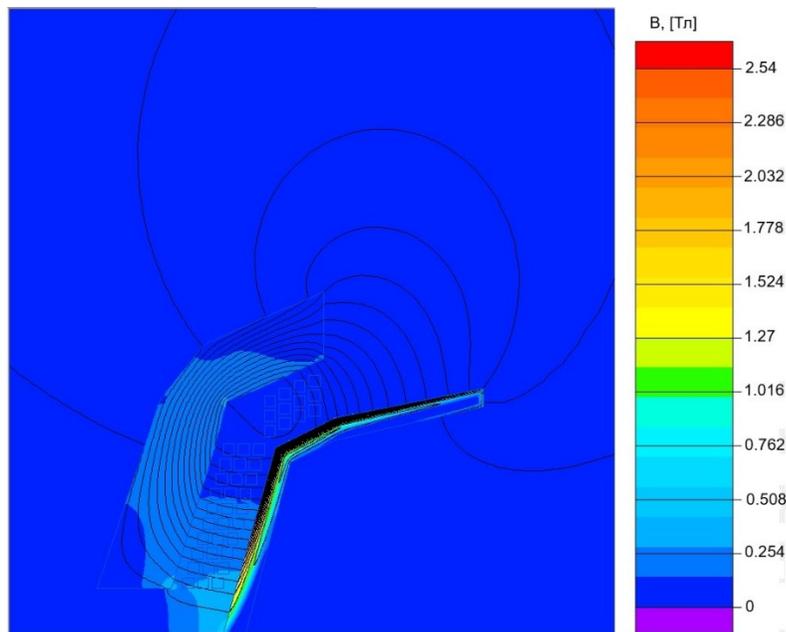


Рис. 8. Распределение индукции в системе «индуктор – корпус – магнитопровод» при токе 200 А и магнитопроводе из стали

Анализ результатов расчета показал степень влияния вида материала магнитопровода на энергетические характеристики системы нагрева. При одинаковых токах индуктора значение мощности тепловыделения в корпусе больше на 3 % при использовании магнитопровода из стали. Выбор материала для магнитопровода зависит от удобства сборки конструкции. При использовании электротехнической стали для предотвращения замыкания токов вдоль пластин требуется располагать пластины веером, что создает проблемы с их креплением. При использовании феррита предполагается применение прямоугольных пластин, которыми нужно выложить внутреннюю поверхность шаблона в виде полусферы.

Приведенные в табл. 2 значения напряжений индуктора соответствуют количеству витков на рис. 7. Для упрощения модели размеры проводников взяты больше, чем это возможно в реальной конструкции. Это позволяет за счет подбора сечения проводников обеспечить согласование с сетевым напряжением, изменяя количество витков.

Для упрощения системы подогрева задвижки целесообразно использование индуктора полусферической формы с внешним магнитопроводом из феррита марки Fluxtrol А. Активная мощность индуктора для задвижки с условным диаметром 100 мм с учетом КПД индуктора составляет 650 Вт. Для снижения реактивных токов в сети и цепях коммутации необходима установка компенсирующего конденсатора мощностью 3600 кВАр (емкость 23,3 мФ).

Выводы

Выполненный комплекс расчетов позволяет решить задачу устранения заклинивания задвижки. Выявленной причиной является возникновение непропорциональных деформаций и напряжений в системе «седло – клин». Разогрев отдельных областей задвижки до определенной температуры позволяет уменьшить напряжения и сдавливающие силы до минимальных значений, не препятствующих подъему клина. Некоторая неопределенность параметров для внешней и внутренней среды (температура воздуха, скорость ветра, вязкость жидкости, наличие полости с газом) не позволяет найти точно мощность и время нагрева. Поддержание максимального значения температуры в точке контроля предотвращает перегрев, но этой информации недостаточно для построения полной картины распределения температуры внутри задвижки.

Заключение

Исследование процесса охлаждения задвижки и возникновения термонапряжений, приводящих к заклиниванию, выявило основную причину заклинивания и определило пути его устранения с помощью подогрева нижнего участка корпуса. Ввиду сложности общей картины термонапряжений в системе «клин – седло» для ускорения процесса открывания задвижки целесообразно периодически подавать напряжение питания на электропривод задвижки. Для подогрева корпуса задвижки разработана система индукционного нагрева с контролем температуры корпуса.

Предлагаемые мероприятия позволят повысить быстродействие систем управления задвижками и их надежность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жук Д.И., Гаффанов Р.Ф., Щенятский А.В.* Анализ влияния механических воздействий на уплотнительные поверхности запорно-регулирующей трубопроводной арматуры / Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 2. С. 27–29.
2. *Подрезова И.С., Шутова Л.В., Ульянова Ю.Е., Пугачева О.Ю., Елжов Ю.Н.* Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 4 (13). – С. 32–37.
3. *Настека В.В., Коренякин А.Ф., Низамов Н.Ф., Чирков Е.Ю., Кушнаренко В.М., Каменев С.В.* Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 1 (150). С. 212–218.
4. *Какузин В.Б., Филиппов Н.Г. и др.* Проблемы настройки электроприводов задвижек // Арматуростроение. – 2008. – № 4 (55). – С. 74–76.
5. *Bazarov A.A., Bondareva N.V., Navasardyan A.A.* Heat System for Rigid Wedge Valves / Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). 2021. Vol. II. Pp. 1277–1287.
6. *Кузнецова Н.В.* Трубопроводная арматура. Конструирование и расчет задвижек стальных клиновых: Монография. – М.: Спутник, 2010. – С. 175.
7. *Гаффанов Р.Ф., Сериков Д.Ю.* Недостатки методики расчета наплавки на примере клиновых задвижек и сифонных клапанов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2019. – № 7. – С. 38–41.
8. *Муратаев Ф.И.* Исследование разрушения литого корпуса задвижки магистрального нефтепровода // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Под общ. ред. С.В. Юдиной. – М.: Перо, 2017. – С. 27–32.

9. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М., Чернова А.Ю.* Оценка напряженно-деформированного состояния запорной арматуры с учетом рабочих параметров на примере клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М.: Тест-зл, 2016. – Т. 82. – № 11. – С. 61–66.
10. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М.* Особенности расчета ресурса безопасной эксплуатации клиновых задвижек с учетом рабочих параметров в технологических трубопроводах // Нефтегазовое дело. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2016. – Т. 14. – № 4. – С. 121–125.
11. *Барботько М.А.* Численное моделирование термических напряжений и деформаций в цилиндре с упругопластической оболочкой и вязкоупругим наполнителем // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2018. – № 4 (37). – С. 16–23.
12. *Глухов В.И., Шалай В.В., Гриневич В.А., Панин Ю.Н.* Геометрическое моделирование деталей клинового затвора для обеспечения герметичности задвижек // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 8-й Международной научно-технической конференции. – Омск: Омский государственный технический университет, 2018. – С. 193–194.
13. *Майский Р.А., Чернова А.Ю.* Возможности программных комплексов на основе метода конечных элементов при оценке работоспособного состояния элементов трубопроводной арматуры // Информационные технологии. Проблемы и решения. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2014. – № 1–2. – С. 47–49.
14. *Васильев А.С., Суханов Ю.В., Щукин П.О., Галактионов О.Н.* Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южный федеральный университет, 2014. – № 3 (30). – С. 14.
15. *Лыков А.В.* Теплообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
16. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
17. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
18. *Берникер Е.И.* Посадки с натягом в машиностроении: Справ. пособие. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 168 с.
19. *Алферов В.И., Стешенкова Н.А.* Применение МКЭ для решения тепловой и деформационной задач расчета сварочных деформаций судовых корпусных конструкций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2010. – № 56 (340). – С. 147–162.
20. *Глушко А.В., Логинова Е.А., Астахова Е.В.* Новая задача термоупругости в плоскости с разрезом // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Физика. Математика. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2018. – № 2. – С. 156–172.
21. *Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Чаплыгин Е.А., Сабокарь О.С.* Индукционный нагрев ферромагнетиков плоским круговым многовитковым соленоидом // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2015. – Вып. 70. – С. 113–118.
22. *Mannafov E., Galunin S., Yermekova M., Nikanorov A., Nacke B.* Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating of disks with complex profile // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, pp. 606–608, 8656912.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2021 г.

RIDDANCE JAMMING OF PIPELINE SHUT-OFF VALVES

A.A. Bazarov, N.V. Bondareva, A.A. Navardyan

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

Abstract. *The paper considers the problems of modeling the processes of thermal deformation of valves with an ambient temperature decrease. Some type of wedge valves are exposed to jamming. Heating the valve body is used to eliminate jamming. This problem is common for rigid wedge valves but the reasons not fully explained. Sometimes the valve stem is destroyed due to the significant power of the gate valve electric drives. The aim of the study is to determine the nature of the stress distribution between the structural elements of the valve, which are the cause of jamming with an ambient temperature decrease, and to search for the parameters of the heating process that ensure minimum energy consumption and time.*

To study the thermal processes in the valve body, a numerical model describing the heat transfer in the structural elements and the fluid is developed. The thermal model is combined with the elastic deformation model. That allows to make compatible calculations without introducing additional errors. The thermal deformations appear in the cooling process and give rise to disproportionate changes in valve dimensions and thermal stresses. Thermal stresses are the cause of jamming. Modeling of the processes of thermal deformation with a decrease in temperature showed that pressure forces of different signs arise in the middle plane of the wedge. At the average height of the horizontal line, there is a compacting pressure and at the lower and upper points there is a stretching pressure. To eliminate the compacting forces local heating was performed in several areas of the body. It was found that the most effective option is to heat the lower hemispherical surface of the body. Heating for thirty minutes reduces the thermal stresses in the wedge and compressive forces to minimum values. For this reason, jamming of the valve is eliminated. For heating the body, a hemispherical induction heater with a magnetic core is provided. The proposed design allows the use of industrial frequency voltage without a step-down transformer and reactive power compensation.

Keywords: *Rigid wedge valve, jamming, thermal deformation, finite elements method.*

REFERENCES

1. Zhuk D.I., Gaffanov R.F., Shchenyatskiy A.V. Analiz vliyaniya mekhanicheskikh vozdeystviy na uplotnitelnye poverkhosti zaporno-reguliruyushchey armatury / Vestnik IZhGTU imeni M.T. Kalashnikova. Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. M.T. Kalashnikova, 2016. Vol. 19, № 2. Pp. 27–29.
2. Podrezova I.S., Shutova L.V., Ulyanova Yu.Ye., Pugacheva O.Yu., Yelzhov Yu.N. Analiz prichin zaklinivaniya i obryvov shtokov truboprovodnoy elektroprivodnoy armatury // Globalnaya yadernaya bezopasnost. 2014. № 4(13). Pp. 32–37.
3. Nasteka V.V., Korenyakin A.F., Nizamov N.F., Chirkov Ye.Yu., Kushnarenko V.M., Kamenev S.V. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metalla krpusa fontannoy armatury do i posle naplavki / Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Orenburg: Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet, 2013. № 1 (150). Pp. 212–218.
4. Kakuzin V.B., Filippov N.G. i dr. Problemy nastroyki elektroprivodov zadvizhek // Armaturstroenie. 2008. № 4 (55). Pp. 74–76.

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Nataliya V. Bondareva, Postgraduate Student.
Ashot A. Navardyan, Postgraduate Student.*

5. *Bazarov A.A., Bondareva N.V., Navasardyan A.A.* Heat System for Rigid Wedge Valves // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Vol. II. 2021. Pp. 1277–1287.
6. *Kuznetsova N.V.* Truboprovodnaya armatura. Konstruirovaniye i raschet zadvizhek stalnykh klinovykh. Moscow: Sputnik, 2010. 175 p.
7. *Gaffanov R.F., Serikov D.Yu.* Nedostatki metodiki rascheta naplavok na primere klinovykh zadvizhek i silfonnykh klapanov. Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut organizatsii, upravleniya i ekonomiki neftegazovoy promyshlennosti, 2019. № 7. Pp. 38–41.
8. *Muratayev F.I.* Issledovaniye razrusheniya litogo korpusa zadvizhki magistralnogo nefteprovoda. Professionalnye kommunikatsii v nauchnoy srede – faktor obespecheniya kachestva issledovaniy. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod obsch. red. S.V. Yudinoy. Moscow: Pero, 2017. Pp. 27–32.
9. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M., Chernova A.Yu.* Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zapornoy armatury s uchedom rabochikh parametrov na primere klinovoy zadvizhki ZKL2 300-25. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Moscow: Test-zl, 2016. Vol. 82. № 11. Pp. 61–66.
10. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M.* Osobennosti rascheta resursa bezopasnoy ekspluatatsii klinovykh zadvizhek s uchedom rabochikh parametrov v tekhnologicheskikh truboprovodakh. Nefte-gazovoe delo. Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet, 2016. Vol. 14, № 4. Pp. 121–125.
11. *Barbotko M.A.* Chislennoe modelirovaniye termicheskikh napryazheniy i deformatsiy v tsilindre s uprugoplasticheskoy obolochkoy i vyazkouprugim zapolnitelem // Vestnik inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta. Vladivostok: Dalnevostochnyy federalnyy universitet, 2018. № 4 (37). Pp. 16–23.
12. *Glukhov V.I., Shalay V.V., Grinevich V.A., Panin Yu.N.* Geometricheskoe modelirovaniye detaley klinovogo zatvora dlya obespecheniya germetichnosti zadvizhek // Tekhnika I tekhnologiya neftekhimicheskogo I neftegazovogo proizvodstva. Materialy 8-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2018. Pp. 193–194.
13. *Mayskiy R.A., Chernova A.Yu.* Vozmozhnosti programnykh kompleksov na osnove metoda konechnykh elementov pri otsenke rabotodosobnogo sostoyaniya elementov truboprovodnoy armatury // Informatsionnye tekhnologii. Problemy I resheniya. Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet, 2014. № 1–2. Pp. 47–49.
14. *Vasilyev A.S., Sukhanov Yu.V., Shchukin P.O., Galaktionov O.N.* Sovershenstvovaniye ekspluatatsionnykh pokazateley zapornoy truboprovodnoy armatury // Inzhenernyy vestnik Dona. Rostov-na-Donu: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professionalnogo obrazovaniya Yuzhnyy federalnyy universitet, 2014. № 3 (30). P. 14.
15. *Lykov A.V.* Teplomassooben. Moscow: Energiya, 1971. 560 p.
16. *Seeger L.* Primeneniye metoda konechnykh elementov. Moscow: Mir, 1979. 392 p.
17. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike. Moscow: Mir, 1975. 541 p.
18. *Alferov B.I., Steshenkova N.A.* Primeneniye MKE dlya resheniya teplovy i deformatsionnoy zadach rascheta svarochnykh deformatsiy sudovykh korpusnykh konstruksiy. Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova. Saint Petersburg: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr, 2010. № 56 (340). Pp. 147–162.
19. *Glushko A.V., Loginova Ye.A., Astakhova Ye.V.* Novaya zadacha termouprugosti v ploskosti s razrezom // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2018. № 2. Pp. 156–172.
20. *Gnatov A.V., Argun Sh.V., Chaplygin E.A., Sabokar O.S.* Induktсионnyy nagrev ferromagnetikov ploskim krugovym mnogovitkovym solenoidiv // Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilnodorognogo universiteta. 2015. Vol. 70. Pp. 113–118.
21. *Mannanov E., Galunin S., Yermekova M., Nikanorov A., Nacke B.* Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating of disks with complex profile // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, El-ConRus 2019. Pp. 606–608, 8656912.

УДК 62–83(075.8)

МЕТОД РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ И ОЦЕНКА ЕГО ПОГРЕШНОСТИ

В.И. Котенев, А.Д. Стулов

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

E-mail: kotenev.viiv@gmail.com, ads260391@mail.ru.

Аннотация. Предложен более простой метод определения сопротивлений асинхронного двигателя (полного индуктивного сопротивления, активного сопротивления статора и приведенного активного сопротивления ротора) по справочным данным. Из уравнений реактивной мощности рассеяния и электромагнитной мощности в номинальном режиме и уравнения электромагнитной мощности в критическом режиме получены три алгебраических уравнения: первое – относительно трех сопротивлений, второе – уравнение зависимости активного сопротивления статора относительно полного индуктивного сопротивления, третье – уравнение зависимости активного сопротивления ротора относительно полного индуктивного сопротивления. Предложен метод итераций для решения данной системы уравнений, который дает малую погрешность уже на втором шаге вычислений.

При оценке погрешности метода использованы уточненные значения электромагнитной мощности и кратности максимального момента, которые выражены относительно справочных сопротивлений контрольных двигателей. Дана оценка суммарной погрешности от несовершенства метода и несовпадения справочных величин кратности максимального момента и мощности на валу двигателя с их уточненными значениями, рассчитанными по сопротивлениям из справочника.

По рассчитанным сопротивлениям в номинальном режиме построены зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя точным и приближенным методом.

Ключевые слова: метод, расчет, сопротивление, асинхронный двигатель, оценка, погрешность.

Введение

Применение автоматических систем управления реактивной мощностью систем электроснабжения на промышленных предприятиях [1, 2], функционирующих в условиях действия большого числа возмущений (пуск, самозапуск асинхронных и синхронных двигателей, короткие замыкания и т. д.), позволяет значительно сократить потери электроэнергии при ее транспортировке и обеспечить работу электроприемников с рациональным коэффициентом реактивной мощности.

Одним из сдерживающих факторов в построении таких систем управления является отсутствие эффективных и более простых методов расчета сопротивле-

Котенев Виктор Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Стулов Александр Дмитриевич, аспирант.

ний асинхронных двигателей, необходимых также и при выборе контакторов, магнитных пускателей, различного рода защит от перегрузок и коротких замыканий. Поэтому разработка таких методов относится к актуальным проблемам.

Степень разработанности проблемы

Проблеме разработки методов расчета сопротивлений асинхронных двигателей уделяется достаточно большое внимание как в отечественной [3–9], так и в зарубежной литературе [10–14].

Значения этих сопротивлений известны лишь для отдельных двигателей – машин серии 4А [15]. Для остальных двигателей они неизвестны. Поэтому возникает необходимость в их определении, что можно сделать двумя основными методами – экспериментальным и аналитическим.

К экспериментальным относятся методы, разработанные на основе: нейронных сетей [10], генетических алгоритмов [11], алгоритмов фазы-логики [12], алгебраических алгоритмов [13] и частотных характеристик [14]. Основной их недостаток – невозможность ими воспользоваться на этапе проведения аналитических исследований, когда отсутствует рассматриваемый двигатель.

Из числа аналитических методов наиболее востребованным является метод идентификации по каталожным данным двигателей. При таком подходе входными параметрами для исследований являются: номинальные значения мощности на валу $P_{2н}$, напряжение U_n , частота вращения n_n или скольжение s_n , коэффициенты полезного действия η_n и мощности $\cos\varphi_n$, значение кратности максимального момента $m_k = M_k / M_n$.

В работах [3–5] три основных параметра – активное сопротивление статора R_1 , полное индуктивное сопротивление x_k и приведенное активное сопротивление ротора R_2 при номинальном скольжении s_n – определяются из решения двух уравнений электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжениях. Причем во всех этих работах с целью снижения числа неизвестных с трех до двух отношение сопротивлений R_1 / R_2 выбирается фиксированным с недостаточным обоснованием. Поэтому при удачном выборе этого отношения погрешность вычисления сопротивлений незначительная, а при неудачном – недопустимо большая.

В работах [7–8] к уравнениям электромагнитной мощности при номинальном и критическом скольжениях добавлено третье уравнение реактивной мощности из [9]. В результате получена система трех уравнений для определения трех искомых сопротивлений, что приводит к значительному уменьшению погрешности вычислений. Основной недостаток этого метода – его сравнительная сложность, заключающаяся в необходимости составления расчетной программы.

Кроме того, во всех вышеперечисленных работах эффективность применяемых методов расчетов оценивается сравнением результатов вычислений с данными контрольных двигателей, которые выбраны без достаточных обоснований. Причем при их неудачном выборе погрешность расчетов будет обусловлена погрешностью данных этих двигателей, а не погрешностью используемого метода.

Постановка задачи

Проведенный краткий обзор литературных источников по разработке методов расчета сопротивлений асинхронных двигателей по справочным данным

позволяет конкретизировать проблему исследований в следующей постановке: разработать более простой метод вычисления сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным с оценкой его погрешности.

Разработка метода расчета сопротивлений двигателя по справочным данным с оценкой его погрешности

Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{\text{э}}(s_{\text{н}}) = \frac{U_{\text{н}}^2 \frac{R_2}{s_{\text{н}}}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_{\text{н}}}\right)^2 + x_{\text{к}}^2}. \quad (1)$$

Реактивная мощность рассеяния в номинальном режиме, выраженная через активное сопротивление статора R_1 , ротора R_2 и полного индуктивного сопротивления $x_{\text{к}}$, представлена выражением

$$Q_2(s_{\text{н}}) = \frac{s_{\text{н}} x_{\text{к}} P_{\text{э}}(s_{\text{н}})}{R_2}, \quad (2)$$

а выраженная через кратность максимального момента – соотношением

$$Q_2(s_{\text{н}}) = \frac{P_{2\text{н}}}{2m_{\text{к}}}. \quad (3)$$

Максимальная электромагнитная мощность

$$m_{\text{к}} P_{\text{э}}(s_{\text{н}}) = \frac{U_{\text{н}}^2}{2\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_{\text{к}}^2}\right)}. \quad (4)$$

Сопротивления R_1 , R_2 и $x_{\text{к}}$ определяются из решения уравнений:

$$R_1^2 + \frac{R_2^2}{s_{\text{н}}^2} + \frac{a_1}{s_{\text{н}}} R_2 + \frac{2}{s_{\text{н}}} R_1 R_2 + x_{\text{к}}^2 = 0; \quad (5)$$

$$R_1 = a_2 - a_3 x_{\text{к}}^2; \quad (6)$$

$$R_2 = a_4 x_{\text{к}}, \quad (7)$$

где $a_1 = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{\text{э}}(s_{\text{н}})}$; $a_2 = \frac{a_1}{4m_{\text{к}}}$; $a_3 = \frac{m_{\text{к}}}{a_1}$; $a_4 = 2a_0 s_{\text{н}} m_{\text{к}}$; $a_0 = \frac{\eta_{\text{н}} + 0,016}{\eta_{\text{н}}(1 - s_{\text{н}})}$.

Уравнение (5) получено из (1), уравнение (6) – из (4), а уравнение (7) – из совместного рассмотрения выражений (1) ÷ (3).

Систему уравнений (5) ÷ (7) предлагается решать методом итерации. С этой целью на первом шаге вычислений используется выражение

$$x_{\text{к},1} = \frac{a_1 a_4}{s_{\text{н}}(1 + b_1 a_4^2)}, \quad (8)$$

где
$$b_1 = 1 + \frac{1}{s_H^2} + \frac{2}{s_H},$$

которое получено из (5) при $R_1 = R_2$.

Если первое приближение принято при $R_1 = 0$, то из (5) следует

$$x_{к1} = \frac{a_1 a_4 s_H}{a_4^2 + s_H^2}. \quad (9)$$

Затем на i -том шаге, начиная со второго, определяется отношение сопротивлений по приближенной формуле

$$\varepsilon_i = \frac{R_1^{(i)}}{R_2^{(i)}} = \frac{a_2 - a_3 x_{к(i-1)}^2}{a_4 x_{к(i-1)}}, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

и подставляются выражения

$$\begin{aligned} R_1^{(i)} &= \varepsilon_i R_2^{(i)}, \\ R_2^{(i)} &= a_4 x_{ки}, \quad i = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

в уравнение (5), в котором следует считать $R_1 = R_1^{(i)}$, $R_2 = R_2^{(i)}$, $x_k = x_k^{(i)}$; получается рекуррентная формула для вычисления индуктивного сопротивления

$$x_{ки} = \frac{a_1 a_4}{s_H (1 + b_i a_4^2)}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (12)$$

где
$$b_i = \varepsilon_i^2 + \frac{2\varepsilon_i}{s_H} + \frac{1}{s_H^2}, \quad i = 2, 3, \dots, n.$$

Активные сопротивления на последнем шаге:

$$\begin{aligned} R_1 &= a_2 - a_3 x_{кн}^2; \\ R_2 &= a_4 x_{кн}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оценка погрешности метода

Некоторые авторы [3–5] при определении погрешности метода расчета сопротивлений асинхронного двигателя по справочным данным пользуются исходными данными, в состав которых входят мощность на валу $P_{2нс}$ и кратность максимального момента $m_{кс}$ из справочника. Эти величины могут значительно отличаться от уточненных значений $P_{2ну}$ и $m_{к1}$, $m_{к2}$, вычисленных по значениям сопротивлений двигателей из справочника.

Поэтому в состав погрешности будут входить две составляющие: одна обусловлена непосредственно предложенным методом, а вторая – погрешностью несовпадения $P_{2нс}$ и $P_{2ну}$, $m_{кс}$ и $m_{к1}$.

А если при вычислении погрешности метода использовать величины $P_{2\text{нп}}$, $m_{\text{кy1}}$ и $m_{\text{кy2}}$, то в состав полученной погрешности будет входить только погрешность предложенной методики.

Уточненное выражение электромагнитной мощности, полученное из (1), при сопротивлениях, равных справочным значениям, имеет вид

$$P_{\text{эy}}(s_{\text{н}}) = \frac{R_{*2\text{c}} P_{2\text{нc}}}{s_{\text{н}} \eta_{\text{нc}} \cos \varphi_{\text{нc}} z_1^2}, \quad (14)$$

$$z_1^2 = \left(R_{*1\text{c}} + \frac{R_{*2\text{c}}}{s_{\text{н}}} \right)^2 + x_{*к\text{c}}^2,$$

где индекс *с обозначает относительное значение соответствующей величины из справочника.

Уточненное значение мощности на валу двигателя составляет

$$P_{2\text{нп}} = \frac{P_{\text{эy}}(s_{\text{н}})}{a_0}.$$

Погрешность мощности

$$\delta_{\text{р2н}} = \left| \frac{P_{2\text{нп}} - P_{2\text{нc}}}{P_{2\text{нc}}} \right| 100\%.$$

Значение кратности максимального момента получено в результате деления (4) на (1) при сопротивлениях, равным справочным значениям:

$$m_{\text{кy}} = \frac{z_1^2 s_{\text{н}}}{2R_{*2\text{c}} \left(R_{*1\text{c}} + \sqrt{R_{*1\text{c}}^2 + x_{*к\text{c}}^2} \right)}. \quad (15)$$

Погрешность

$$\delta_{\text{мк}} = \left| \frac{m_{\text{кy}} - m_{\text{кc}}}{m_{\text{кc}}} \right| 100\%. \quad (16)$$

При определении погрешности методики расчета сопротивлений в качестве контрольного выбран двигатель из [16]: $P_{2\text{нc}} = 250$ кВт, $U_{\text{н}} = 3000$ В, $R_{1\text{c}} = 0,7$ Ом, $R_{*1\text{c}} = 0,0243$, $R_{2\text{c}} = 0,795$ Ом, $R_{*2\text{c}} = 0,02757$, $x_{\text{кc}} = 5,8$ Ом, $x_{*к\text{c}} = 0,202$, $s_{\text{н}} = 0,0249$, $a_1 = 34,4$ Ом, $a_2 = 3,29$ Ом, $a_3 = 0,076$ Ом⁻¹; $a_4 = 0,1362$, $m_{\text{кy}} = 2,62$, $\delta_{\text{мк}} = \delta_{\text{р2н}} = 0$.

Результаты расчетов по предложенной методике (10) ÷ (13) с начальным приближением (9) представлены в табл. 1 и на рис. 1 (кривая 1), а с приближением (8) – в табл. 2 и на рис. 1 (кривая 2).

Результаты вычислений показывают, что в первом случае (см. табл. 1) погрешность $\delta_{\text{хк}} = 0,22$ % достигается при четырехшаговом приближении, а во втором (см. табл. 2) $\delta_{\text{хк}} = 0,17$ % при двухшаговом расчете.

Значения погрешностей сопротивлений x_k , R_1 , R_2 после трехшаговых вычислений представлены в табл. 2. Их незначительное отличие от погрешностей, полученных из решения полной системы уравнений (5)÷(7) по разработанной в [7, 8] программе, объясняется принятыми округлениями в расчетах.

Таблица 1

Результаты расчетов с начальным приближением (9)

Параметр	<i>i</i>				
	1	2	3	4	5
ε_i	1,000	0,574	0,777	0,848	0,874
b_i	–	1659	1676	1682	1684
x_{ki} , Ом	6,090	5,920	5,860	5,840	5,836
δ_{xk} , %	4,31	1,54	0,57	0,22	0,10
$R_1^{(i)}$, Ом	0,470	0,626	0,68	0,698	0,700
δ_{R1} , %	32,90	10,60	2,90	0,29	0,00
$R_2^{(i)}$, Ом	0,829	0,806	0,798	0,795	0,795
δ_{R2} , %	4,30	1,40	0,39	0,05	0,00

Таблица 2

Результаты расчетов с приближением (8)

Параметр	<i>i</i>		
	1	2	3
ε_i	1,000	0,930	0,900
b_i	1694	1688	1686
x_{ki} , Ом	5,800	5,820	5,830
δ_{xk} , %	0,46	0,17	0,00
$R_1^{(i)}$, Ом	0,733	0,716	0,707
δ_{R1} , %	4,80	2,20	1,00
$R_2^{(i)}$, Ом	0,790	0,793	0,794
δ_{R2} , %	0,63	0,29	0,12

Суммарная погрешность, обусловленная погрешностями метода и второго контрольного двигателя 4A225M2Y3 ($P_{2н} = 55$ кВт, $P_{зв}(s_n) = 57,068$ кВт, $\delta_{p2н} = 0,18$ %, $m_{кв} = 2,5$, $U_n = 380$ В, $s_n = 0,018$, $\eta_n = 0,91$, $\cos\varphi_n = 0,92$, $R_{*1} = 0,026$, $R_{*2} = 0,019$, $x_{*к} = 0,212$), составляет: $\delta_{xк} = 2,9$ %, $\delta_{R1} = 11,8$ %, $\delta_{R2} = 0,96$ %. Погрешность только метода: ($m_{кв} = 2,4$, $P_{зв}(s_n) = 57,068$ кВт, $\delta_{xк} = 0,47$ %, $\delta_{R1} = 0,38$ %, $\delta_{R2} = 0,42$ %).

Значения погрешностей расчета сопротивлений двигателя 4A225M2Y3 при $\delta_{p2н} = 0,18$ %, $\delta_{мк} = 0$ составляют: $\delta_{xк} = 2,53$ %, $\delta_{R1} = 11,42$ %, $\delta_{R2} = 0,54$ %. Они растут с увеличением погрешностей $\delta_{p2н}$, $\delta_{мк}$ и могут достичь больших значений.

Дополнительные исследования показали, что в качестве контрольных следует выбирать двигатели с погрешностью по абсолютной величине $|\delta_{p2н}| + |\delta_{мк}| \leq 1\%$.

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$x_{\mu} = \frac{U_{\text{н}}^2}{Q_{\mu}} - x_1, \quad (17)$$

а реактивная мощность этой ветви

$$Q_{\mu} = \frac{P_{2\text{н}}}{\eta} \operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} - Q_{2\text{н}}. \quad (18)$$

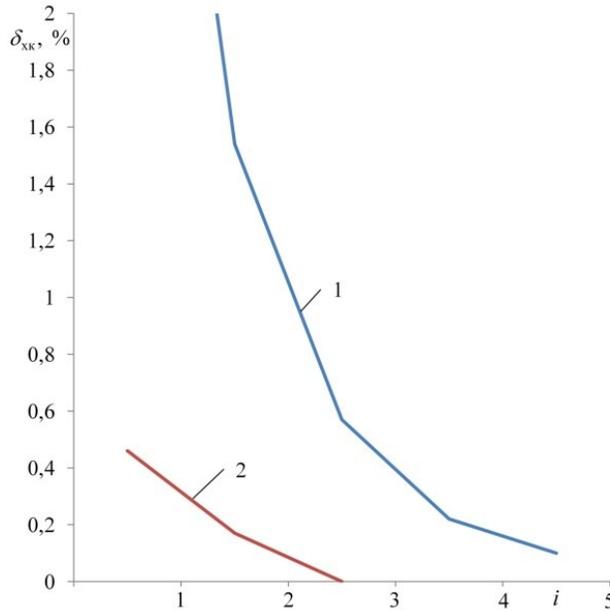


Рис 1. Зависимость погрешности $\delta_{\text{хк}}$ от i :

1 – построена по (9) ÷ (12); 2 – построена по (8), (10) ÷ (12).

Подставив (3) в (18), а затем в (17), получим

$$x_{\mu} = \frac{U_{\text{н}}^2}{P_{2\text{н}} \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - \frac{1}{2d_1 m_{\text{кy}}} \right)} - x_1.$$

После умножения числителя и знаменателя на $\eta_{\text{н}}$ и $\cos \varphi_{\text{н}}$ получено

$$x_{\mu} = \frac{z_{\text{н}}}{\left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} - \frac{1}{2d_1 m_{\text{кy}}} \right) \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}} - x_1. \quad (19)$$

Сопротивление x_{μ} , вычисленное согласно (19), для двигателя из [15] $x_{\mu} = 92,7$ Ом при справочном значении $x_{\mu\text{с}} = 95,6$ Ом. Погрешность $\delta_{x_{\mu}} = -3$ %.

Зависимость сопротивлений асинхронного двигателя от скольжения можно определить, пользуясь его схемой замещения (рис. 2).

Как следует из схемы замещения, сопротивления $R_2(s)$, $x_2(s)$ являются функциями скольжения s . Объясняется это тем, что при скольжении выше кри-

тического $s > s_k$ начнет проявляться насыщение зубцового слоя и эффект вытеснения тока ротора, влекущие за собой уменьшение индуктивного сопротивления $x_2(s)$ и увеличение активного сопротивления ротора $R_2(s)$.

Зависимость $R_2(s)$ можно аппроксимировать функцией [9]

$$R_2(s) = R_2(0) + (R_2(1) - R_2(0))\sqrt{s}, \quad s_H < s \leq 1, \quad (20)$$

где

$$R_2(0) = \frac{R_2(s_H) - R_2(1)\sqrt{s_H}}{1 - \sqrt{s_H}}.$$

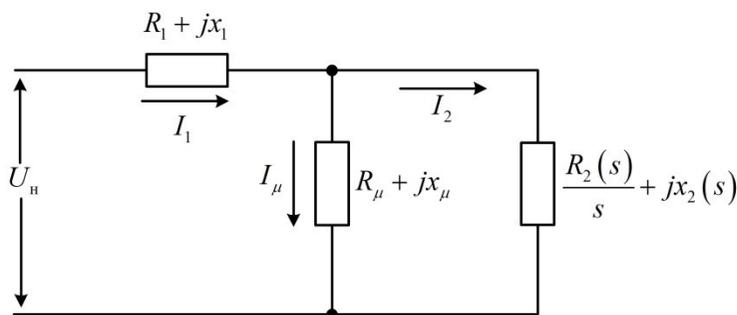


Рис. 2. Схема замещения АД с КЗ ротором

Индуктивное сопротивление изменяется незначительно в диапазоне скольжений $0,2 \leq s \leq 1$, основное его изменение приходится на участок $0 \leq s \leq 0,2$.

С достаточной степенью точности эту зависимость можно представить в виде [9]

$$x_k(s) = x_k(1) + (x_k(s_H) - x_k(1))e^{-\frac{s-s_H}{T_1}}, \quad s_H \leq s \leq 1, \quad (21)$$

где $x_k(1)$ – сопротивление короткого замыкания; $T_1 = 0,15$ с.

Индуктивное сопротивление статора

$$x_1 = 0,42x_k(s_H), \quad (22)$$

ротора

$$x_2(s) = 0,58x_k(s_H). \quad (23)$$

Из схемы замещения можно определить полное комплексное сопротивление

$$Z(s) = R(s) + jx(s) = R_1 + jx_1 + \frac{(R_\mu + jx_\mu) \left(\frac{R_2(s)}{s} + jx_2(s) \right)}{R_\mu + \frac{R_2(s)}{s} + j(x_\mu + x_2(s))},$$

из которого найти активное сопротивление двигателя

$$R(s) = R_1 + \frac{R_2(s) \frac{x_\mu^2}{s}}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \quad (24)$$

и индуктивное сопротивление

$$x(s) = x_1(s) + \frac{x_2(s)x_\mu^2 + x_\mu \left(x_2^2(s) + \frac{R_2^2(s)}{s^2} \right)}{\left(x_\mu + x_2(s) \right)^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}}. \quad (25)$$

Вычисленные значения сопротивлений $R(s)$, $x(s)$ согласно (20) ÷ (25) для $s = (0,018; 0,1; 0,2; 0,6; 1,0)$ при $R_1 = 0,0572$ Ом, $R_2 = 0,0418$ Ом, $x_\kappa = 0,4664$ Ом, $s_H = 0,018$, $x_\mu = 10,05$ Ом, $R_2(1) = 0,0616$ Ом, $x_\kappa(1) = 0,33$ Ом для двигателя марки 4A225M2Y3 даны в табл. 3.

Таблица 3

Значения сопротивлений $R(s)$, $x(s)$

s	0,018	0,05	0,1	0,2	0,6	1,0
$R(s)$, Ом	2,15	0,88	0,49	0,29	0,14	0,11
$x(s)$, Ом	0,93	0,50	0,42	0,37	0,33	0,33
$x_a(s)$, Ом	0,86	0,50	0,36	0,33	0,33	0,33
$R_a(s)$, Ом	2,37	0,93	0,51	0,30	0,15	0,12

Приближенные (аппроксимированные) зависимости $x_a(s)$, $R_a(s)$ построены по выражениям:

$$R_a(s) = R_1 + \frac{R_2(s)}{s}; \quad (26)$$

$$x_a(s) = x_\kappa(1) + (x_{\kappa 1} - x_\kappa(1))e^{-\frac{s-s_H}{T_1}}, \quad (27)$$

где $x_{\kappa 1} = z_H \sin \arccos \varphi_H$.

Постоянную времени T_1 определяют из условия выполнения равенства

$$x_a(0,05) = x(0,05).$$

Тогда из (26)

$$x(0,05) = x_\kappa(1) + (x_{\kappa 1} - x_\kappa(1))e^{-\frac{0,05-s_H}{T_1}},$$

откуда получаем

$$T_1 = \frac{s_H - 0,05}{\ln \frac{x(0,05) - x_\kappa(1)}{x_{\kappa 1} - x_\kappa(1)}}. \quad (28)$$

Для двигателя марки 4A225M2Y3

$$x_{\kappa 1} = 2,2 \arcsin 0,92 = 0,86 \text{ Ом.}$$

Постоянная времени (28) при $x(0,05) = 0,5$ Ом (из табл. 3) составляет $T_1 = 0,028$ с.

Выражения (26), (27) принимают вид:

$$R_a(s) = 0,0572 + \frac{0,039 + 0,02\sqrt{s}}{s}; \quad (29)$$

$$x_a(s) = 0,33 + 0,53e^{\frac{s-0,018}{0,028}}. \quad (30)$$

Значения сопротивлений, вычисленные по аппроксимированным выражениям (29), (30), представлены в табл. 3.

Из анализа данных этой таблицы следует, что значения сопротивлений $R_a(s)$, $x_a(s)$ имеют достаточно хорошее совпадение с сопротивлениями $x(s)$ при всех скольжениях в диапазоне $0,018 \leq s \leq 1$.

Графики зависимости $R_a(s)$, $x_a(s)$ показаны на рис. 3.

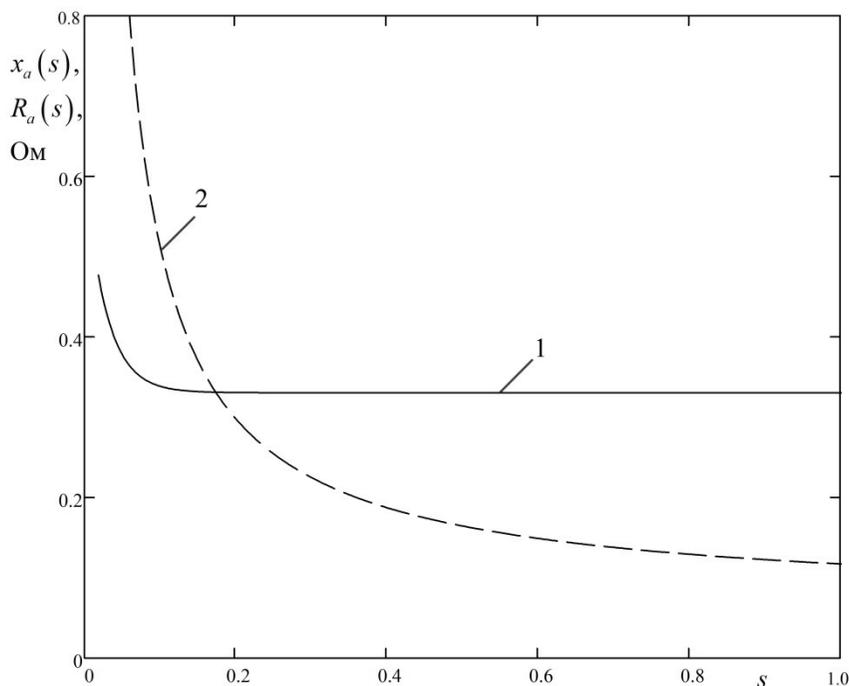


Рис. 3. Зависимость сопротивления двигателя 4A225M2У3 от скольжения: 1 – $x_a(s)$; 2 – $R_a(s)$

Эти зависимости могут быть использованы, например, в расчетах активной, реактивной и полной мощности при пуске асинхронного двигателя.

Выводы

Применение метода простых итераций к решению уравнений, полученных из уравнений реактивной мощности рассеяния и уравнений электромагнитной мощности двигателя в номинальном и критическом режимах, позволило значительно упростить решение данной системы уравнений. Погрешность вычислений не превышает следующих значений: активного сопротивления статора – 0,38 %, приведенного активного сопротивления ротора – 0,42 %, полного индуктивного сопротивления – 0,47 %.

В качестве контрольных следует выбирать двигатели, у которых сумма по абсолютной величине погрешности мощности на валу и кратности момента от-

носителем их значений, вычисленных по сопротивлениям из справочника, не превышает одного процента.

По значениям рассчитанных сопротивлений двигателя в номинальном режиме и индуктивного сопротивления контура намагничивания построены зависимости активного и индуктивного сопротивлений двигателя от скольжения точным и приближенным методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017.
2. *Kotenev A.V. et al.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1.012064.
3. *Моцинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирияткин А.А.* Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
4. *Усольцев А.А., Лукичев Д.В.* Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – № 10. – С. 35–41.
5. *Макеев М.С., Кувишинов А.А.* Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.
6. *Свит П.П., Семкин Б.В.* Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности // Ползуновский альманах. Алтайский гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2004. – № 3. – С. 96–99.
7. *Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В.* Определение сопротивлений короткозамкнутого двигателя по каталожным данным // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2016. – № 1 (49). – С. 103–106.
8. *Котенев А.В., Котенев В.И., Кочетков В.В.* Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6 (548). – С. 13–17.
9. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Ред. Л.И. Мамиконянц. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
10. *Jin Zhao, Bimal K.* Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. № 5. Pp. 981–991.
11. *Megherbi A.C. et al.* Parameter identification of induction motors using variable-weighted cost function of genetic algorithms // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2010. № 4. Pp. 597–605.
12. *Jin Z., Bose B.K.* Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002. Vol. 1. Pp. 229–234.
13. *Bolovin E., Glazyrin A., Polichshuk V.* Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes // Applied Mechanics and Materials. 2015. Pp. 65–68.
14. *Rechberger K., Coefler H.* Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine // 15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”. August 25–28. 2002. Brugge. Belgium. 2002.
15. *Кравчик А.Э. и др.* Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982.
16. *Костенко М.П., Пиотровский Л.М.* Электрические машины. В 2 ч. Ч. 2. Машины переменного тока. – Л.: Энергия, 1973.

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2021 г.

METHOD FOR CALCULATING THE RESISTANCE OF AN ASYNCHRONOUS SQUIRREL CAGE MOTOR ACCORDING TO PASSPORT DATA AND ESTIMATION OF ITS ERROR

V.I. Kotenev, A.D. Stulov

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

Abstract: *A simpler method is proposed for determining the resistances of an induction motor (total inductive resistance, active resistance of the stator and reduced active resistance of the rotor) according to reference data. Three algebraic equations are obtained from the equations of reactive power dissipation and electromagnetic power in the nominal mode and the equation of electromagnetic power in the critical mode: the first is relative to three resistances, the second is the equation of the dependence of the active resistance of the stator relative to the total inductive resistance, and the third is the active resistance of the rotor relative to the total inductive resistance. An iterative method is proposed for solving this system of equations, which gives a small error already at the second step of the calculations.*

When assessing the error of the method, the specified values of the electromagnetic power and the multiplicity of the maximum torque were used, which are expressed relative to the reference resistances of the control motors. An estimate is given of the total error from the imperfection of the method and the discrepancy between the reference values of the multiplicity of the maximum torque and power on the motor shaft with their refined values calculated from the resistances from the reference book.

Based on the calculated resistances in the nominal mode, the dependences of the active and inductive resistances of the motor are constructed using an accurate and approximate method.

Keywords: *method, calculation, resistance, induction motor, estimate, error.*

REFERENCES

1. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017.
2. *Kotenev A.V. et al.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1.012064.
3. *Moshchinsky Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryatkin A.A.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine according to catalog data // Electricity. 1998. No. 4. Pp. 38–42.
4. *Usoltsev A.A., Lukichev D.V.* Determination of the parameters of the model of an asynchronous motor according to reference data // Izvestiya VUZov. Instrumentation. 2008. No. 10. Pp. 35–41.
5. *Makeev M.S., Kuvshinov A.A.* Algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of an induction motor according to catalog data // Vector of Science of Togliatti State University. 2013. No. 1 (23). Pp. 108–112.
6. *Suite P.P., Semkin B.V.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of low-power asynchronous motors // Polzunovsky Almanac. Altai state those. un-t them. I.I. Polzunova (Barnaul) 2004. No. 3. Pp. 96–99.
7. *Kotenev A.V., Kotenev V.I., Kochetkov V.V.* Determination of the resistances of a squirrel-cage motor according to catalog data // Bulletin of the Samara State Technical University. Series of Engineering Science. 2016. No. 1 (49). Pp. 103–106.

*Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander D. Stulov, Postgraduate Student.*

8. *Kotenev A.V., Kotenev V.I., Kochetkov V.V.* Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor according to reference data // *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2016. No. 6 (548). Pp. 13–17.
9. *Syromyatnikov I.A.* Operating modes of asynchronous and synchronous motors, L.I. Mamikonyants (ed.). 4th ed. Revised. and add. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 240 p.
10. *Jin Zhao, Bimal K.* Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2004. № 5. Pp. 981–991.
11. *Megherbi A.C. et al.* Parameter identification of induction motors using variable-weighted cost function of genetic algorithms // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2010. № 4. Pp. 597–605.
12. *Jin Z., Bose B.K.* Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive // *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. 2002. Vol. 1. Pp. 229–234.*
13. *Bolovin E., Glazyrin A., Polichshuk V.* Induction Motor Drive Parameters Identification Applying Difference Schemes // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Pp. 65–68.
14. *Rechberger K., Coefler H.* Analytical approach to calculate the transient state of doubly fed synchronous machines employing the steady state circle diagram of the machine // *15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”*. August 25–28. 2002. Brugge. Belgium. 2002.
15. *Kravchik A.E. et al.* Asynchronous motors of the 4A series: a reference book. M.: Energoatomizdat, 1982.
16. *Kostenko M.P., Piotrovsky L.M.* Electric cars. L.: Energy, 1973. 648 p.

УДК 621.3.064:621.316.923.6: 546.311

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ МАКЕТНЫХ ОБРАЗЦОВ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ К ТЕПЛОМЫМ И КОММУТАЦИОННЫМ ИСПЫТАНИЯМ

А.В. Кузнецов, Ю.П. Юренков, А.И. Аглиуллов

Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

E-mail: kav2@ulstu.ru; alxim2@mail.ru; agliullov_airat@mail.ru

***Аннотация.** Преимущества ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) вызывают интерес и потребность в развитии и продолжении исследований в направлении создания макетных и промышленных образцов ЖСП, определения области их применения. Одной из существенных причин отсутствия необходимых результатов экспериментальных исследований в литературных источниках являются технологические проблемы изготовления макетных образцов ЖСП и подготовки их к испытаниям. Особенно это ощутимо при использовании в качестве плавкой вставки металлов, агрессивных к окружающей среде, – щелочных металлов. Предложенный подход решения технологических проблем изготовления и подготовки макетных образцов к испытаниям представляет интерес и может быть использован научными группами, занимающимися исследованиями, связанными с ЖСП. Разработка и обсуждение такой технологии могут способствовать активизации исследований в направлении создания макетных образцов и получению новых практических результатов.*

***Ключевые слова:** устройство защиты, жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель, макетный образец жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя, технология изготовления и подготовки.*

Введение

Важнейшим требованием к системам передачи и распределения электроэнергии является высокая надежность, в том числе при возникновении аварийных ситуаций, связанных с возможностью возникновения коротких замыканий (КЗ). Короткие замыкания в электрической системе приносят большой вред нормальной работе как самой системы, так и электрооборудования, что сопровождается значительным экономическим ущербом.

Для защиты от коротких замыканий используют коммутационные электрические аппараты и устройства для ограничения токов КЗ. К сожалению, в ряде случаев коммутационные аппараты не обладают достаточным быстродействием и токоограничивающими свойствами и не обеспечивают защиту элементов систем электроснабжения [1, 2]. Применение известных токоограничивающих

Кузнецов Анатолий Викторович (д.т.н., с.н.с.), заведующий кафедрой «Электроснабжение».

Юренков Юрий Петрович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение».
Аглиуллов Айрат Илгизярович, магистрант.

устройств, таких как быстродействующие предохранители, взрывные предохранители, полупроводниковые выключатели, токоограничивающие реакторы и т. д., в ряде случаев не представляется возможным, поскольку они обладают следующими недостатками: недостаточность их токоограничивающих свойств и быстродействия для защиты элементов электрической сети, громоздкость и сложность конструкции, неудобства эксплуатации, высокая стоимость, существенные перенапряжения, возникающие при отключении цепи, потери активной мощности и энергии в нормальном режиме [3]. В связи с вышесказанным необходима разработка новых электрических аппаратов с токоограничивающими свойствами.

Жидкометаллические самовосстанавливающиеся предохранители

Одним из вариантов новых токоограничивающих устройств может быть устройство на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) [1–3]. Конструкция ЖСП представлена на рис. 1.

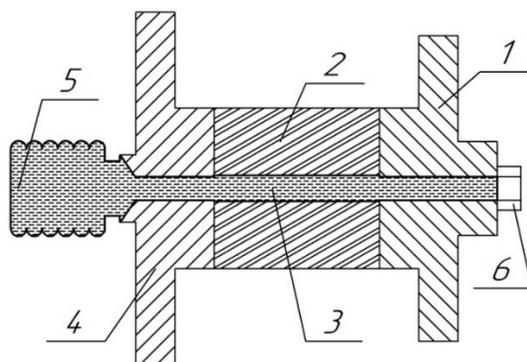


Рис. 1. Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель:

- 1 – контактный вывод 1; 2 – керамическая диэлектрическая втулка;
- 3 – канал диэлектрической втулки, заполненный жидким металлом;
- 4 – контактный вывод 2; 5 – сильфон; 6 – заглушка

Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель – это электрический аппарат, в котором в качестве плавкого элемента применяется жидкий металл (индий, галлий, ртуть, щелочные металлы и т. п.), расположенный в канале диэлектрической втулки 3. При протекании по жидкометаллической плавкой вставке 3 тока короткого замыкания (КЗ) она испаряется, вызывая взрывообразное повышение давления, которое компенсируется расширением объема сильфона 5. При высоком давлении пары металла обладают значительным сопротивлением. В результате ток резко ограничивается, после чего в канале образуется электрическая дуга, которая гасится при естественном переходе тока через нулевое значение. Электрическая цепь разрывается дополнительным коммутационным аппаратом. После остывания и конденсации паров жидкого металла электрическая цепь восстанавливается.

На сегодняшний день установлено, что ЖСП и устройства на их основе обладают более высоким быстродействием, чем освоенные промышленностью электрические аппараты [1, 4, 5]. Быстродействие ЖСП при коротком замыкании, так же как и обычных предохранителей, оценивается значением интеграла отключения W_0 [4]. Чем ниже это значение, тем выше быстродействие. На рис. 2 [4] даны значения этого параметра для ЖСП на номинальный ток 63 А при ис-

пользовании плавких вставок из различных металлов. Из рисунка следует, что быстродействие ЖСП с плавкими вставками из щелочных металлов (калий, натрий) выше, чем у ртути. Также по характеристикам видно, что ЖСП из любого жидкого металла обладает большим быстродействием, чем предохранитель с плавкой вставкой из серебра.

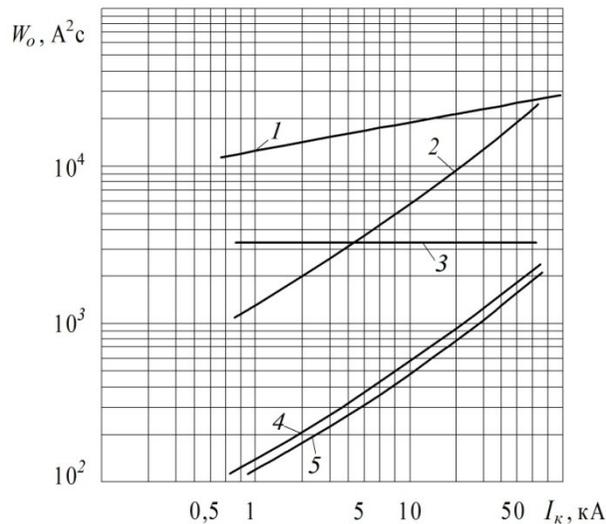


Рис. 2. Расчетные зависимости интеграла отключения ЖСП с плавкими вставками из различных материалов на номинальный ток 63 А от тока короткого замыкания (действующее значение):
 1 – зависимость для предохранителя с серебряной плавкой вставкой; 2 – зависимость для ЖСП с плавкой вставкой из ртути; 3 – зависимость для тиристора Т25; 4, 5 – зависимости для ЖСП с плавкой вставкой из калия, натрия

Преимущества жидкометаллического ограничителя тока вызывают интерес и потребность в развитии и продолжении исследований в направлении создания макетных и промышленных образцов ЖСП и определения области их применения.

Уровень исследований ЖСП

К сожалению, проведенный объем исследований еще не достиг того уровня, при котором можно говорить о промышленном производстве жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей [6]. В литературных источниках слабо освещены вопросы экспериментальных исследований ЖСП [4, 7–11]. Без таких результатов трудно поверить в достоверность положений и рекомендаций, полученных теоретическим путем. Требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований тепловых и коммутационных процессов в жидкометаллическом ограничителе тока. Для реализации этих целей необходимо разработать универсальные конструкции макетных образцов ЖСП, технологию изготовления и подготовки к лабораторным исследованиям; проработать технологический процесс и выбрать необходимое лабораторное оборудование, сконструировать и изготовить приспособления, которые позволят подготовить ЖСП к тепловым и коммутационным испытаниям.

Дополнительные сложности возникают при применении в качестве плавкой вставки агрессивных к окружающей среде щелочных металлов. Их температура

плавления несколько выше, чем нормальная температура окружающей среды. Необходимость заправки макетного образца связана с нагреванием щелочного металла до температуры плавления. Для натрия температура плавления равна 97,8 °С. Манипуляции с агрессивными металлами, да еще и при повышенной температуре, требуют повышенной осторожности и внимания. Нужна разработка специальной эффективной и безопасной технологии. Ее отсутствие создает препятствия на пути развития исследований.

Скорее всего, это и является причиной слабого освещения в литературных источниках результатов экспериментальных исследований. Результаты исследований отсутствуют. Разработка и обсуждение такой технологии для заинтересованных научных инициативных групп исследователей способствуют активизации исследований в направлении создания макетных образцов и получения новых практических результатов.

Подготовка ЖСП к тепловым и коммутационным испытаниям включает несколько этапов: подготовка специальной установки для заправки ЖСП, заправка макета жидким металлом.

Установка для работы со щелочными металлами

Заправка ЖСП щелочным металлом – натрием вызывает ряд трудностей. Одной из них является агрессивность натрия к окружающей среде. Он активно реагирует с воздухом (O_2) с образованием оксида натрия (Na_2O), а контакт с водой приводит к взрыву с последующим образованием едкой щелочи [12]. Для работы со щелочным металлом и заправки им макетного образца ЖСП предлагается применять специальную лабораторную установку – перчаточный бокс (рис. 3). Он представляет собой герметичный контейнер, который позволяет манипулировать опасными материалами в контролируемой инертной атмосфере [13].

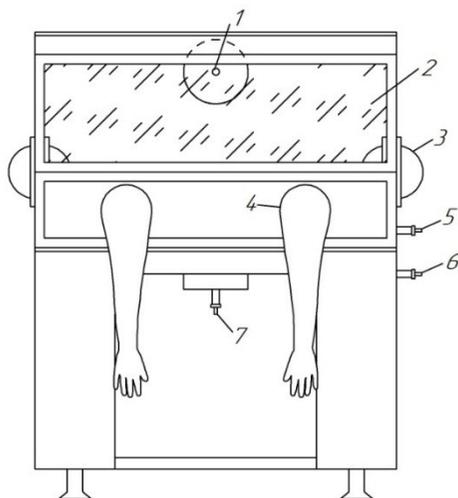


Рис. 3. Перчаточный бокс:

- 1 – узел выхода газа в задней стенке; 2 – смотровое окно; 3 – дверка люка;
- 4 – резиновые перчатки; 5 – узел подачи газа в боковой стенке;
- 6 – главный узел подачи газа; 7 – узел подачи газа в нижней стенке

Выбор газа для создания инертной атмосферы зависит от необходимых требований к эксперименту. Чаще всего используются азот, диоксид углерода, аргон, в более редких случаях – гелий и водород [14]. Для работы с натрием вполне подходит инертный газ аргон повышенной чистоты и осушки.

Для подачи аргона из баллона используется система коммуникаций, представленная на рис. 4.

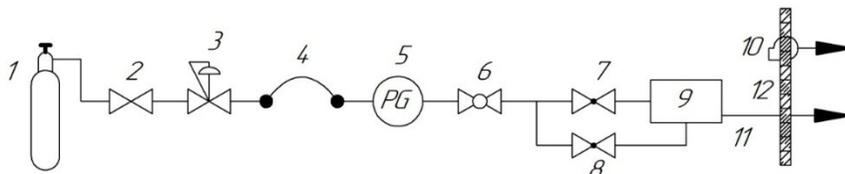


Рис. 4. Схема газоснабжения перчаточного бокса

В верхней части горловины аргонового баллона 1 установлен вентиль 2, с помощью которого можно надежно перекрыть подачу газа. С помощью аргонового редуктора 3 контролируется давление газа. Редуктор оснащен двумя манометрами, что обеспечивает стабильную, равномерную подачу газа без резких скачков. Далее через рукав высокого давления 4 газ поступает в коммуникации, которыми оборудован перчаточный бокс 9. Через манометр 5 и газовый кран 6 газ можно направить в боковую стенку перчаточного бокса 7 либо в нижнюю стенку 8. Этим обеспечивается полное вытеснение воздуха из камеры перчаточного бокса и заполнение ее аргоном. Плотность аргона выше плотности воздуха.

При нагнетании аргона в бокс воздух вытесняется в окружающую среду по коммуникации 11 в задней стенке перчаточного бокса. Коммуникация 11 представляет собой шланг, соединенный с металлической трубой, которая выведена за пределы помещения лаборатории через стену 12. При непрерывном потоке аргона через камеру перчаточного бокса в ней создается небольшое избыточное давление. Очевидно, что аргон через заглушки, рукава, дверки люка может в какой-то степени поступать в помещение. В случае избыточной утечки газа включается вентилятор 10, встроенный в стену 12, и происходит вентиляция помещения.

Макетный образец ЖСП

Упрощенная конструкция макетного образца ЖСП, разработанного и изготовленного на кафедре «Электроснабжение» в Ульяновском государственном техническом университете, изображена на рис. 5.

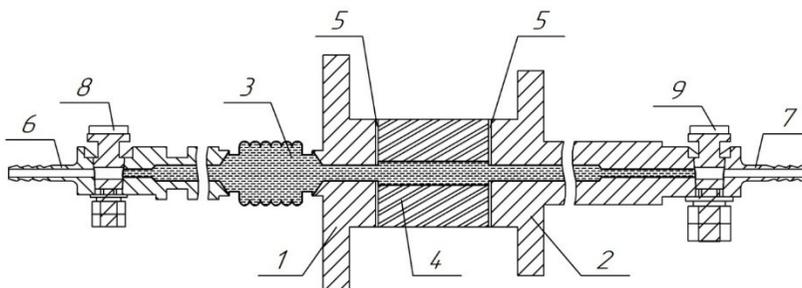


Рис. 5. Упрощенная конструкция макетного образца ЖСП

Макетный образец состоит из контактных выводов 1 и 2, демпфирующего узла 3 в виде сильфона, диэлектрической втулки 4, выполненной из нагревостойкой керамики. Для герметичности конструкции между контактными выводами 1, 2 и диэлектрической втулкой 4 расположены герметизирующие прокладки 5. Все детали конструкции помещены в металлический корпус. Контактные выводы выполнены совмещенными со штуцером-елочкой 6, 7 для присоединения гибких шлангов. Конец шланга, надетый на елочку, закрепляется обжимным хомутиком.

Такая конструкция позволяет представить ЖСП как часть трубопровода для перекачки жидкости в гидросистеме. Внутренний диаметр трубопровода определяется диаметром канала диэлектрической втулки и внутренними диаметрами контактных выводов. Для перекрытия движения жидкости используются пробковые краники 8, 9. Перекрытые пробковых краников при заполненной жидкостью гидросистеме обеспечивает возможность отсоединения ЖСП от гидросистемы. Герметичность жидкого металла, расположенного в канале диэлектрической втулки ЖСП и внутренних отверстиях контактных выводов от внешней среды, обеспечивается перекрытыми пробковыми краниками. Если в гидросистеме использовался жидкий металл, ЖСП считается запрограммированным и готовым для дальнейших исследований.

Перед заправкой ЖСП жидким металлом необходимо произвести промывку ЖСП и обезжиривание внутренних поверхностей. Для этого в гидросистеме используется чистый бензин, этиловый спирт. Гидросистема может представлять собой ЖСП с присоединенными к каждому контактному выводу (штуцеру-елочке) посредством гибких шлангов медицинских шприцов. Манипулируя шприцами, можно перекачивать жидкость через ЖСП попеременно в одну и другую сторону, обеспечивая промывку и обезжиривание внутренних поверхностей ЖСП. По окончании промывки ЖСП отсоединяется от системы, продувается потоком воздуха, высушивается в сушильном шкафу при повышенной температуре. После этого ЖСП готов к заправке жидким металлом.

Заправка макета жидким металлом

Заправка ЖСП жидким металлом производится в перчаточном боксе. Так как металлический натрий превращается в жидкость при температуре выше нормальной температуры окружающей среды, все элементы гидросистемы должны иметь подогрев до температуры не менее чем 97,8 °С. В состав гидросистемы для заправки ЖСП жидким металлом входит емкость для расплавленного натрия, макет ЖСП, медицинский шприц. Необходимость подогрева ЖСП обусловлена тем, что во время поступления расплавленного металла во внутреннее пространство ЖСП возможно его охлаждение за счет отдачи тепла элементам конструкции ЖСП. Образование при этом пробки делает невозможным дальнейшие манипуляции с жидким металлом.

Система подогрева элементов гидросистемы может быть выполнена на основе нагревательного элемента, в качестве которого используется проводник с высоким удельным сопротивлением и термостойкой изоляцией. Термостойкость изоляции должна быть выше температуры плавления натрия и соответственно необходимой температуры нагревания элементов гидросистемы (вполне подходит изоляция из фторопласта). Проводником обматывают подогреваемые элементы гидросистемы и подключают к источнику питания с регулируемым напряжением – например, автотрансформатору. Экспериментальным путем определяют напряжение выхода, которое соответствует установившемуся значе-

нию температуры проводника и температуры подогреваемых элементов конструкции ЖСП не ниже температуры плавления жидкого металла.

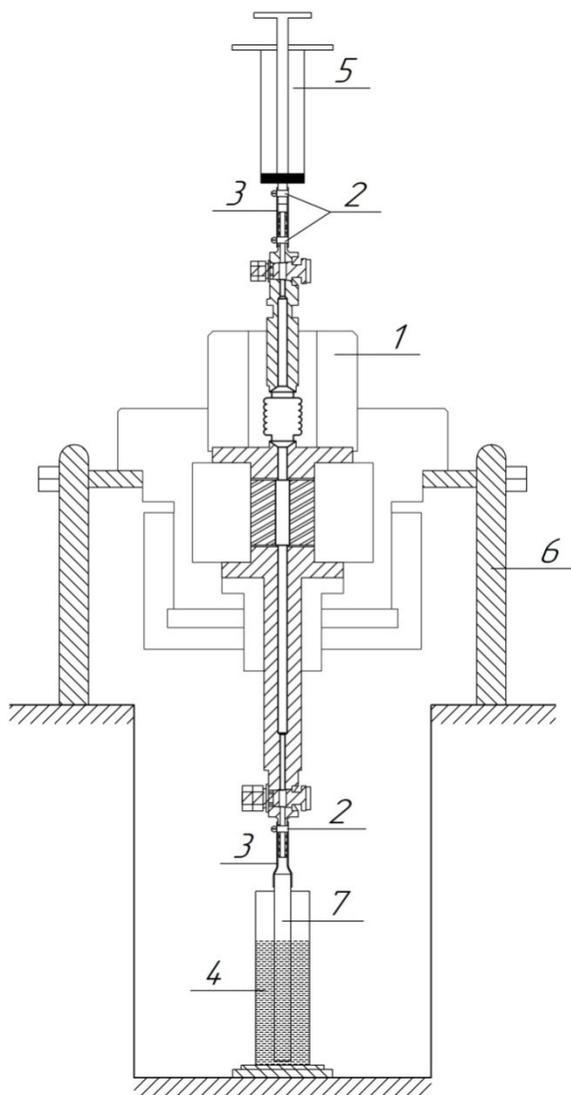


Рис. 6. Исходное состояние макета ЖСП перед заправкой:

- 1 – упрощенная конструкция макетного образца ЖСП в сборе с корпусом;
- 2 – червячный хомут; 3 – силиконовый шланг; 4 – колба с расплавленным натрием;
- 5 – медицинский шприц; 6 – подставка для макета ЖСП; 7 – стеклянная трубка

Все манипуляции с жидким металлом производятся в перчаточном боксе после его заполнения аргоном. На этапе подготовки в перчаточный бокс через специальные люки 3 (см. рис. 3) в боковых стенках помещают инструменты для манипуляций с макетом и металлический натрий в упаковке. Макет закрепляется на подставке 6 (рис. 6) в нижней стенке бокса. Монтируется гидросистема. Нижний контактный вывод-штуцер ЖСП 7 (см. рис. 5) посредством гибкой муфты из силиконового шланга 3 (см. рис. 6) соединяется со стеклянной трубкой 7 (см. рис. 6), которая опускается в колбу с жидкостью 4 (см. рис. 6) для заправки ЖСП практически до дна. Объем жидкости в колбе рассчитывается с учетом заполне-

ния внутреннего пространства ЖСП жидким металлом. Верхний контактный вывод-штуцер 6 (см. рис. 5) по аналогии посредством гибкого силиконового шланга соединяется с цилиндром медицинского шприца 5 (см. рис. 6). После продувки всей гидросистемы аргоном с целью вытеснения из нее воздуха можно приступить к заполнению гидросистемы жидким металлом.

В исходном состоянии нижняя трубка гидросистемы опущена в колбу с расплавленным натрием. Поршень цилиндра медицинского шприца находится в нижнем состоянии – состоянии всасывания жидкости (см. рис. 6). Все элементы гидросистемы прогреты до температуры плавления натрия. Для заполнения гидросистемы жидким металлом поршень шприца медленно поднимается вверх. За счет расширения объема внутреннего пространства снижается давление внутри ЖСП. Действующее на жидкий металл атмосферное давление вытесняет жидкий металл из колбы в зону пониженного давления во внутреннюю часть ЖСП.

Факт заполнения ЖСП и окончания процедуры может контролироваться визуально при появлении жидкого металла в цилиндре шприца. Важным моментом в этой процедуре является необходимость заполнения внутреннего пространства ЖСП без газовых пузырьков, которые могут остаться в лабиринтных участках, в гофрах сиффона и т. п. Избежать этого могут помочь многократная прокачка в разные стороны, создание вибрации подставки с ЖСП во время заполнения и т. п. После заполнения ЖСП жидким металлом перекрываются пробковые краны, отключается подогрев элементов гидросистемы, гидросистема размонтируется, остатки жидкого металла утилизируются в емкость с этиловым спиртом, прекращается подача газа в перчаточный бокс.

После остывания ЖСП до температуры окружающей среды удаляются остатки жидкого металла в отверстиях контактных выводов-штуцеров. Удаление и нейтрализация могут проводиться с помощью этилового спирта. Производится нейтрализация остатков жидкого металла в перчаточном боксе. Выполняется уборка перчаточного бокса и утилизация отходов.

Заправленный макет готов к дальнейшим манипуляциям в нормальных лабораторных условиях вне перчаточного бокса.

Выводы

1. Преимущества ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП) вызывают интерес и потребность в развитии и продолжении исследований в направлении создания макетных и промышленных образцов ЖСП, определения области их применения.

2. В литературных источниках слабо освещены результаты экспериментальных исследований ЖСП. Без таких результатов трудно поверить в достоверность положений и рекомендаций, полученных теоретическим путем.

3. Одной из существенных причин отсутствия результатов экспериментальных исследований являются технологические проблемы изготовления макетных образцов ЖСП и подготовки их к испытаниям. Особенно это ощутимо при использовании в качестве плавкой вставки металлов агрессивных к окружающей среде щелочных металлов.

4. Предложенный подход решения технологических проблем изготовления и подготовки макетных образцов к испытаниям представляет интерес и может быть использован научными группами, занимающимися исследованиями, связанными с ЖСП.

5. Разработка и обсуждение такой технологии могут способствовать активизации исследований в направлении создания макетных образцов и получения новых практических результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов А.В., Тимиргазин Р.Ф., Юренков Ю.П. Пути совершенствования аппаратов защиты для энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии напряжением до 1 кВ // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: Седьмая Международная научно-техническая конференция: сборник научных трудов Т. 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 252–255.
2. Кузнецов А.В., Юренков Ю.П. Применение жидкометаллических самовосстанавливающихся ограничителей тока для энергосберегающих систем транспортировки и распределения электроэнергии // Вестник УлГТУ. – 2019. – № 1 (85). – С. 54–58.
3. Kuznetsov A.V., Yurenkov Y.P., Mityaev A.A. The Problem of Short-circuit Current Limitation in Energy – saving Systems of Transportation and Electricity Distribution // The 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021. Pp. 1–5.
4. Кузнецов А.В. Жидкометаллические предохранители и инвестиционная привлекательность их разработки. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 207 с.
5. Кужеков С.Л., Васильев Б.Н., Куров Н.Н. Оценка быстродействия жидкометаллического самовосстанавливающегося предохранителя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 134–136.
6. Hailong H., Mingzhe R., Yi W. Experimental Research and Analysis of a Novel Liquid Metal Fault Current Limiter // IEEE transaction on power delivery. 2013. Pp. 1–8.
7. Niayesh K., Tepper J., König F. A Novel current limitation principle based on application of liquid metals // IEEE transaction on components and packaging technologies. 2006. Vol. 29, № 2. Pp. 303–309.
8. Yiyang L., Yi W., Chen H., Hailong H. Investigation on the behavior of GaInSn liquid metal Current Limiter // IEEE transaction on components. 2014. № 2. Pp. 209–215.
9. Zienicke E., Ben-Wen Li, Thess A., Kräzschmar A., Terhoeven P. Theoretical and Numerical Stability Analysis of the Liquid Metal Pinch Using the Shallow Water Approximation // Journal of Thermal Science. 2008. № 3. Vol. 17. Pp. 261–266.
10. He H. et al. Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. Aug. 2018. Vol. 8, No. 8. Pp. 1391–1400.
11. Казанцев А.А., Косорлуков И.А. Разработка жидкометаллического ограничителя тока // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 12. – С. 25–27.
12. Костин Н.В. Техника безопасности работы в химических лабораториях. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. – 344 с.
13. Хоникевич А.А. Очистка радиоактивно-загрязненных вод лабораторий и исследовательских ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 312 с.
14. Устройство и принцип работы перчаточного бокса с инертной атмосферой [Электронный ресурс]. – URL: https://acrylmedic.ru/post/show/1/ustroystvo_i_princip_raboty_perchatochnogo_boksa_s_inertnoy_atmosferoy (дата обращения: 01.04.2021).

Статья поступила в редакцию 24 мая 2021 г.

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MANUFACTURING AND PREPARATION OF MOCK-UP SAMPLES OF LIQUID METAL FUSES FOR THERMAL AND SWITCHING TESTS

A.V. Kuznetsov, Y.P. Yurenkov, A.I. Agliullov

Ulyanovsk State Technical University
32, Severniy Venets st., Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

Abstract. *The advantages of current limiters based on liquid metal self-healing fuses (LMSHF) provoke interest and the need for the development and continuation of research in the direction of creating prototypes and industrial samples of LMSHF, determining the sphere of their application. One of the significant reasons for the lack of the necessary results of experimental research in the literature sources is the technological problems of manufacturing prototypes of LMSHF and preparing them for testing. This is especially noticeable when using fusible elements made of alkali metals that are aggressive to the environment. The proposed approach to solving the technological problems of manufacturing and preparing prototypes for testing is of interest and can be used by scientific groups engaged in research related to LMSHF. The development and discussion of such a technology can contribute to the activation of research towards of creating prototypes, their research aimed at obtaining new practical results.*

Keywords: *protection gear, liquid metal self-healing fuse, prototype of a liquid metal self-healing fuse, manufacturing and preparation technology.*

REFERENCES

1. *Kuznetsov A.V., Timirgazin R.F., Yurenkov Y.P.* Ways to improve protection devices for energy-saving systems of transportation and distribution of electricity with a voltage of up to 1 kV // Energy saving in urban economy, energy, industry, Ulyanovsk, 2017. Pp. 252–255. (In Russian).
2. *Kuznetsov A.V., Yurenkov Y.P.* Application of liquid metal self-healing current limiter for energy-saving systems transmission and distribution of electrical power // Vestnik UISTU. 2019. No. 1 (85). Pp. 54–58. (In Russian).
3. *Kuznetsov A.V., Yurenkov Y.P., Mityaev A.A.* The Problem of Short-circuit Current Limitation in Energy – saving Systems of Transportation and Electricity Distribution // The 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021. Pp. 1–5.
4. *Kuznetsov A.V.* Liquid metal fuse and investment attractiveness of their development. Moscow, Energoatomizdat, 2006. 207 pp. (In Russian).
5. *Kuzhekov S.L., Vasiliev B.N., Kurov N.N.* Performance evaluation of a self-resetting liquid metal fuse // Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics. 2012. No. 2. Pp. 134–136. (In Russian).
6. *Hailong H., Mingzhe R., Yi W.* Experimental Research and Analysis of a Novel Liquid Metal Fault Current Limiter // IEEE transaction on power delivery. 2013. Pp. 1–8.
7. *Niayesh K., Tepper J., König F.* A Novel current limitation principle based on application of liquid metals // IEEE transaction on components and packaging technologies. 2006. Vol. 29, № 2. Pp. 303–309.
8. *Yiyang L., Yi W., Chen H., Hailong H.* Investigation on the behavior of GaInSn liquid metal Current Limiter // IEEE transaction on components. 2014. № 2. Pp. 209–215.
9. *Zienicke E., Ben-Wen Li, Thess A., Kräzschmar A., Terhoeven P.* Theoretical and Numerical Stability Analysis of the Liquid Metal Pinch Using the Shallow Water Approximation // Journal of Thermal Science. 2008. № 3. Vol. 17. Pp. 261–266.

*Anatoly V. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Dept.
Yuriy P. Yurenkov, Senior Lecture.
Airat I. Agliullov, Graduate Student.*

10. *He H. et al.* Study of Liquid Metal Fault Current Limiter for Medium-Voltage DC Power Systems // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. Aug. 2018. Vol. 8, No. 8. Pp. 1391–1400.
11. *Kazantsev A.A., Kosorlukov I.A.* Development liquid metal current limiter // *Electrical equipment: maintenance and repair*. 2013. No. 12. Pp. 25–27. (In Russian).
12. *Kostin N.V.* Safety engineering in chemical laboratories. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1966. 344 p. (In Russian).
13. *Khokhnikovich A.A.* Cleaning of radioactively contaminated waters of laboratories and research nuclear reactors. Moscow, Atomizdat, 1974. 312 pp. (In Russian).
14. Device and principle of operation of the glove box with an inert atmosphere.
https://acrylmedic.ru/post/show/1/ustroystvo_i_princip_raboty_perchatochnogo_boksa_s_inertnoy_atmosferoy (accessed April 1, 2021).

УДК 621.3.07

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМ МОДУЛЕМ

В.Е. Лысов, В.А. Поляков

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

E-mail: 67lysov@mail.ru

Аннотация. Рассматривается новый подход к повышению точности воспроизведения сигнала задания прецизионным поворотным столом на основе реализации в виде мехатронного модуля. Такая конструкция позволяет исключить недостатки традиционной конструкции, такие как люфт, сбой при фиксации планшайбы. Мехатронный модуль представляет собой безредукторное соединение планшайбы и электродвигателя. Новая конструкция потребовала нового подхода к работе системы автоматического управления процессом слежения и позиционированием. В процессе позиционирования возникают термодформации, и поэтому особенно сильно является включение дополнительной системы автоматического управления охлаждением исполнительного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами в роторе. В статье рассмотрен вопрос взаимосвязи системы позиционирования и слежения с системой компенсации термодформаций. Проведено моделирование работы двух систем.

Ключевые слова: мехатронный модуль, планшайба, система автоматического управления, термодформация, поворотный стол, передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика, точность системы позиционирования.

Повышение точности воспроизведения заданной траектории движения инструмента, его позиционирования является актуальной задачей автоматизированного машиностроения. Приводные модули применяются для осуществления разнообразных сборочных устройств, лазерных технологических комплексов, позиционно-следающих приводов механообрабатывающих роботов, металлорежущих станков. Примером приводного модуля может служить поворотный стол. Оснащение металлорежущего станка поворотным столом позволяет выполнять многофункциональные операции с одной установки, что повышает точность обработки детали и расширяет функциональные возможности станка.

Существующие конструкции поворотных столов [1–3], оснащенных электроприводом, имеют существенные недостатки: неидеальность геометрических параметров отдельных деталей, упругие деформации, тепловые деформации, а также люфт в кинематической цепи. Так, на рис. 1 показана кинематическая схема прецизионного поворотного стола модели СК-36. Из рисунка видно, что люфт обусловлен наличием зазора между червяком и червячным колесом. Данный зазор необходим для исключения заклинивания передачи от тепловых деформаций. Также негативное влияние на точность угла поворота планшайбы ока-

Лысов Владимир Ефимович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Поляков Василий Александрович, аспирант.

зывают упругие деформации соединительной муфты 2 и вала червяка. Кроме того, традиционная конструкция поворотного стола [1] требует существенных эксплуатационных расходов. Это связано с постоянным контролем уровня смазывающей жидкости в кинематической цепи передачи движения к планшайбе, контролем и минимизацией действия люфта при эксплуатации стола в силу износа трущихся поверхностей в узле передачи движения от вала электродвигателя к планшайбе поворотного стола.

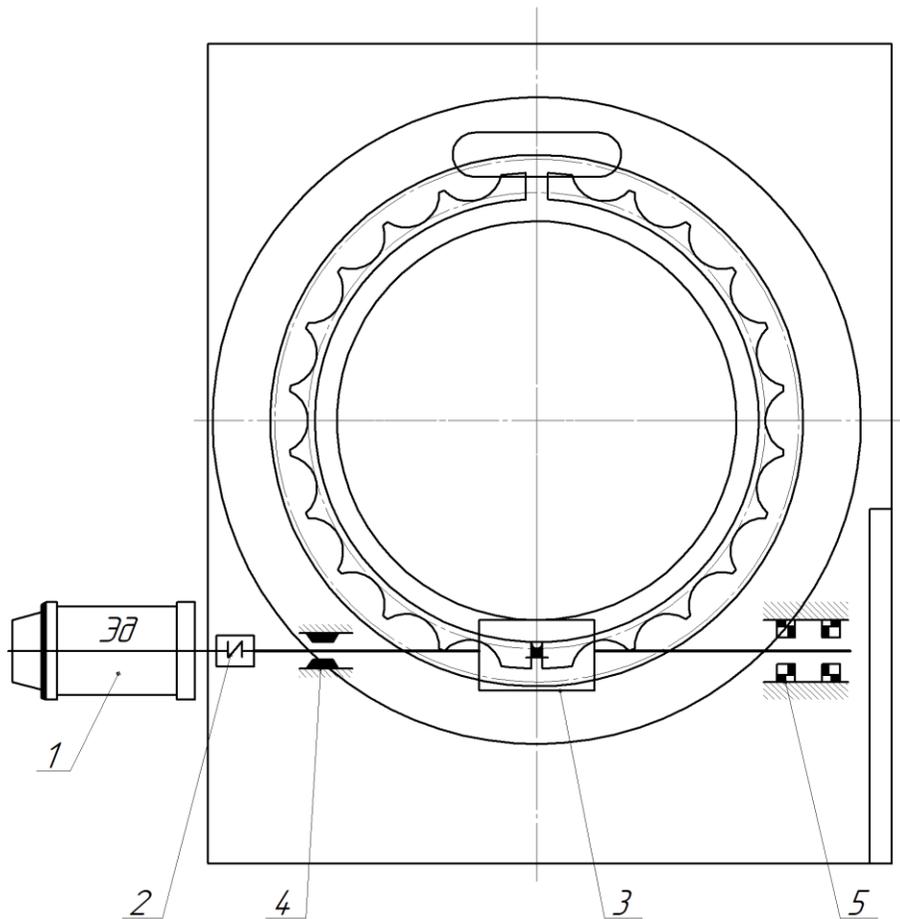


Рис. 1. Функциональная схема поворотного стола СК-36:
1 – серводвигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – червячная передача;
4, 5 – подшипниковые узлы

На сегодняшний день максимально возможная точность угла поворота планшайбы упомянутых выше поворотных столов составляет $3,5''$ угловых секунд. Данная точность определяется точностью механических узлов станка и точностью датчика, который преобразует угол поворота планшайбы в цифровой код.

Радикального увеличения точности угла поворота планшайбы можно достигнуть сокращением кинематической цепи и полным устранением люфтов. Эту задачу в наиболее полной мере решает мехатронный модуль с прямым сервоприводом – в этом случае планшайба и ротор серводвигателя являются единым кинематическим звеном. Также благодаря быстродействующим микропроцессор-

ным системам и интеллектуальным алгоритмам управления можно достичь высоких точностей. Кроме того, необходимо компенсировать упругие и тепловые деформации.

Конструкция поворотного стола на основе синергетического объединения в одном модуле электродвигателя, механического устройства в виде планшайбы и информационного устройства в виде датчиков, контролирующих параметры движения, создает мехатронный модуль движения, который является объектом системы автоматического управления. Предлагаемый модуль может быть создан на основе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на роторе [7, 8], например 1FW6.

Функциональная схема мехатронного модуля движения с соответствующими системами управления показана на рис. 2.

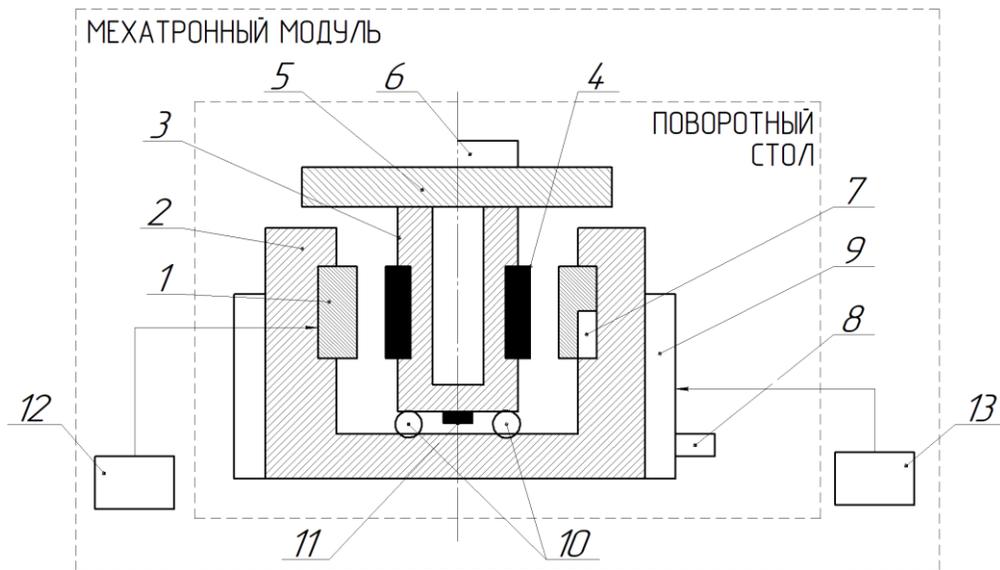


Рис. 2. Функциональная схема мехатронного модуля движения:

- 1 – обмотка статора; 2 – статор двигателя; 3 – ротор двигателя; 4 – постоянные магниты на роторе двигателя; 5 – планшайба; 6 – обрабатываемая деталь; 7 – датчики температуры; 8 – вход жидкости в радиатор статора; 9 – радиатор статора; 10 – подшипники статора; 11 – датчики параметров электродвигателя; 12 – система управления координатой поворотного стола; 13 – система управления охлаждением поворотного стола

Следует отметить, что в системе управления координатой поворотного стола в режиме позиционирования планшайбы синхронный двигатель работает в режиме на удержание, то есть на упор, кроме того меняется в соответствии с режимом обработки. В этой связи ток статора носит стохастический характер. Рассмотренные режимы работы электропривода приводят к нагреву статора и соответственно передаче температуры к ротору, планшайбе и установленной на ней детали. Это делает возможным изменение геометрических размеров детали, что может привести к снижению точности обработки. В этой связи в мехатронном модуле предусмотрена система охлаждения статора.

Результат идентификации процессов, имеющих место в мехатронном модуле [5, 6], позволил представить процесс нагрева статора в виде аperiodического звена:

$$W_S(p) = \frac{\tau_D(p)}{I(p)} = \frac{K_S}{T_S p + 1}, \quad (1)$$

где K_S – коэффициент, характеризующий превышение температуры к току статора;

$$T_S = \frac{C}{A} \text{ – постоянная времени нагрева статора;}$$

C – теплоемкость тела;

A – теплоотдача тела;

$\tau_D(p)$ – превышение температуры тела над окружающей средой;

$I(p)$ – ток статора I_D с учетом тока нагрузки I_H .

Процесс нагрева планшайбы, детали осуществляется одновременно с нагревом статора. С учетом вентиляции в воздушном зазоре между статором и ротором передаточная функция, характеризующая процесс нагрева планшайбы, представляется аperiodическим звеном вида

$$W_P(p) = \frac{\tau(p)}{\tau_P(p)} = \frac{K_P}{T_P p + 1}, \quad (2)$$

где τ_P – превышение температуры планшайбы относительно окружающей среды;

K_P – коэффициент передачи, учитывающий снижение температуры планшайбы относительно температуры статора.

Значения этих коэффициентов получены экспериментальным путем и составляют: $K_P = (0,8 \div 0,9)K_S$; $T_P = (1,2 \div 1,3)$.

Процесс изменения температурной деформации детали имеет сложный характер и определяется материалом и формой детали; он также описывается аperiodическим звеном:

$$W_d(p) = \frac{Z_d(p)}{\tau_P(p)} = \frac{K_D}{T_D p + 1}, \quad (3)$$

где Z_d – геометрическое изменение размеров детали в зависимости от превышения температуры детали;

K_D – коэффициент, учитывающий геометрическое изменение детали от превышения температуры над окружающей средой, определяется в зависимости от материала обрабатываемой детали;

T_D – постоянная времени изменения размера детали.

Значение T_D определяется экспериментально и по отношению к T_P составляет $T_D = (1,1 \div 1,3)T_P$.

Синхронный двигатель с постоянным магнитом в роторе [8, 9, 11] представляется типовым колебательным звеном:

$$W_M(p) = \frac{\omega_D(p)}{U_D(p)} = \frac{K_M}{T_E T_M p^2 + T_M p + 1}, \quad (4)$$

где ω_D – частота вращения вала электродвигателя;

$U_D(p)$ – напряжение статора электродвигателя;
 K_M – коэффициент передачи электродвигателя, осуществляющий связь между напряжением, приложенным к статору, и частотой вращения ротора;
 T_E – электромагнитная постоянная времени статора;
 T_M – электромеханическая постоянная синхронного электродвигателя.

Для стабилизации температуры статора асинхронного двигателя с постоянными магнитами используется система охлаждения. Насос прокачивает определенный объем охлаждающей жидкости через рубашку (радиатор). Насос с асинхронным приводом описывается аperiodическим звеном:

$$W_{AD}(p) = \frac{Q_O(p)}{U(p)} = \frac{K_{AD}}{T_{AD}p + 1}, \quad (5)$$

где $Q_O(p)$ – производительность насоса;
 $U(p)$ – напряжение на выходе силового преобразователя системы управления температурой;
 K_{AD} – коэффициент передачи;
 T_{AD} – постоянная времени асинхронного двигателя насоса.

Передаточная функция процесса охлаждения представляется аperiodическим звеном [5, 6]:

$$W_O(p) = \frac{\tau_O(p)}{Q_O(p)} = \frac{K_O}{T_Op + 1}, \quad (6)$$

где $\tau_O(p)$ – снижение температуры планшайбы;
 K_O – коэффициент передачи;
 T_O – постоянная времени процесса охлаждения.

Для управления мехатронным модулем используется двухуровневая система управления. Уровни связаны друг с другом в силу технологических особенностей работы поворотного стола.

Первый уровень – позиционно следящая САУ, обеспечивающая точность позиционирования стола, стабилизацию скорости вращения планшайбы и оптимальную загрузку двигателя по току. Система первого уровня синтезируется на основе принципа СПР [10–12].

Второй уровень – система стабилизации температуры статора, строящаяся на основе синтеза систем стабилизации [12]. Цифровая составляющая системы управления координатой представляется экстраполятором нулевого порядка в контурах положения, скорости, тока.

С учетом приведенного выше структурная схема системы управления мехатронным модулем представлена на рис. 3.

Рассмотрим синтез регуляторов представленной системы.

Представим электродвигатель в виде структурного соединения трех звеньев.

Первое осуществляет связь между напряжением статора и током статора и имеет вид

$$W_{D1}(p) = \frac{I_D(p)}{U_D(p)} = \frac{1}{R_S(T_Sp + 1)}, \quad (7)$$

где R_S – сопротивление обмотки статора.

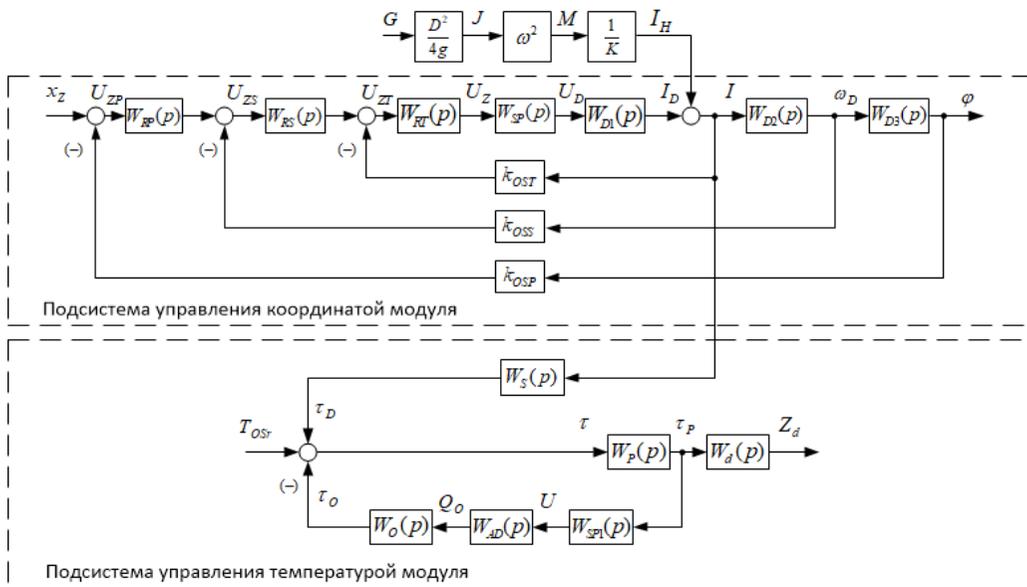


Рис. 3. Структурная схема САУ мехатронного модуля:

$W_{RP}(p)$ – регулятор положения;

$W_{RS}(p)$ – регулятор скорости;

$W_{RT}(p)$ – регулятор тока;

$W_{SP}(p)$ – силовой преобразователь контура тока;

$W_{D1}(p)$ – звено якорной цепи двигателя, связывающее ток I_D электродвигателя с напряжением U_D ;

$W_{D2}(p)$ – электромеханическое звено, связывающее скорость ω_D вращения вала электродвигателя с током I ;

$W_{D3}(p)$ – звено, связывающее угол поворота ротора электродвигателя φ со скоростью ω_D ;

k_{OST} – датчик обратной связи по току;

k_{OSS} – датчик обратной связи по скорости;

k_{OSP} – датчик обратной связи по положению;

G – вес закрепленной на столе детали;

J – момент инерции, создаваемый деталью;

M – динамический момент;

I_H – ток нагрузки;

$W_S(p)$ – процесс нагрева статора электродвигателя;

$W_P(p)$ – процесс нагрева планшайбы;

$W_d(p)$ – процесс температурной деформации детали;

$W_{SP1}(p)$ – силовой преобразователь системы управления температурой;

$W_{AD}(p)$ – насос системы охлаждения;

$W_O(p)$ – процесс охлаждения

Второе звено реализует связь между частотой вращения якоря и током статора и имеет вид

$$W_{D2}(p) = \frac{\omega_D(p)}{I_D(p)} = \frac{R_S}{C_e \Phi T_M p}, \quad (8)$$

где C_e – конструктивный коэффициент двигателя;
 Φ – полный магнитный поток.

Третье звено реализует связь между частотой вращения и углом поворота ротора электродвигателя:

$$W_{D3}(p) = \frac{\varphi(p)}{\omega_D(p)} = \frac{1}{p}. \quad (9)$$

В этой связи передаточная функция регулятора тока примет вид

$$W_{RT}(p) = \frac{R_S(T_S p + 1)}{2T_{SP} p \cdot K_{SP} \cdot K_{OST}}, \quad (10)$$

где T_{SP} – постоянная времени силового преобразователя контура тока.

Таким образом, регулятор в контуре тока – ПИ-регулятор.

Передаточная функция замкнутого контура тока как исходная для синтеза контура скорости примет вид

$$W_{ZT}(p) = \frac{I_{D1}(p)}{U_{ZT}(p)} = \frac{1}{K_{OST}} \cdot \frac{1}{2T_{SP}^2 p^2 + 2T_{SP} p + 1}. \quad (11)$$

Для синтеза контура скорости принимаем передаточную функцию замкнутого контура как аperiodическое звено:

$$W_{ZT}(p) = \frac{I_{D1}(p)}{U_{ZT}(p)} = \frac{1}{K_{OST}} \cdot \frac{1}{2T_{SP} p + 1}. \quad (12)$$

Для контура скорости принципиальным является придание ему астатизма. В этом случае действие помех не может повлиять на точность позиционирования, чтобы получить синтез астатической системы и в то же время с показателями технического оптимизма увеличим число контуров регулирования скорости до трех [10] при их последовательной оптимизации по условиям технического оптимума. Структурная схема представлена на рис. 4.

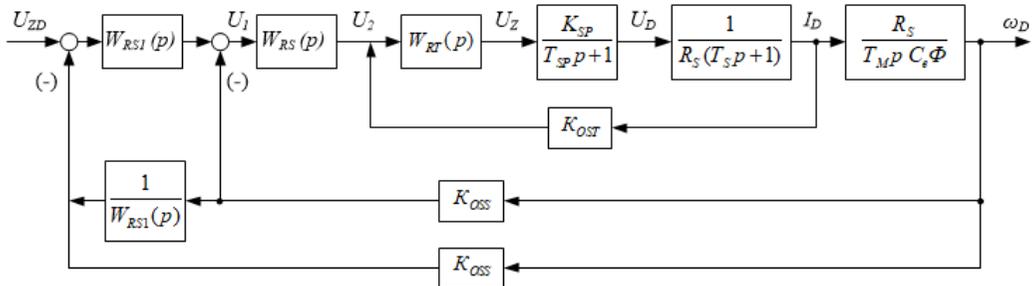


Рис. 4. Структурная схема контура скорости

Согласно принципу СПР передаточная функция $W_{RS}(p)$ примет вид:

$$W_{RS}(p) = \frac{T_M}{4T_{SP}} \cdot \frac{K_{OST} \cdot C_e \Phi}{K_{OSS} \cdot R_S}. \quad (13)$$

В этом случае передаточная функция замкнутого контура по скорости примет вид:

$$W_{ZS}(p) = \frac{\omega_D(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{K_{OSS}} \cdot \frac{1}{8T_{SP}^2 p^2 + 4T_{SP} p + 1}. \quad (14)$$

Регулятор третьего контура рассчитывается из условия технического оптимума:

$$\frac{1}{8T_{SP} p(4T_{SP} p + 1)} = W_{ZS}(p) \cdot W_{RS1}(p) \cdot K_{OSS}, \quad (15)$$

откуда передаточная функция $W_{RS1}(p)$ определяется:

$$W_{RS1}(p) = \frac{U_1(p)}{U_Z(p)} = \frac{1}{8T_{SP} p}. \quad (16)$$

Используя методику структурных преобразований, сведем систему к одно-контурной (рис. 5), откуда группу регуляторов скорости можно заменить одним.

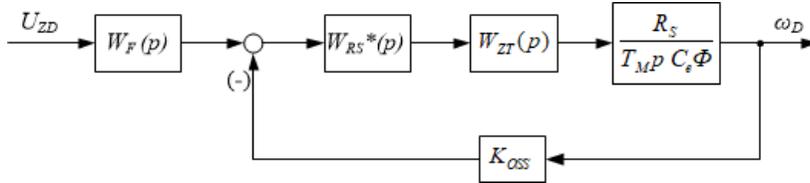


Рис. 5. Структурная схема одноконтурной системы регулирования скорости

На рисунке обозначено $W_{ZT}(p)$ – передаточная функция замкнутого контура тока.

Передаточная функция эквивалентного регулятора скорости определяется:

$$W_{RS}^*(p) = \left(1 + \frac{1}{W_{RS1}(p)}\right) \cdot W_{RS1}(p) \cdot W_{RS}(p). \quad (17)$$

Подставляя значения передаточных функций в (17), получим:

$$W_{RS}^*(p) = \frac{(8T_{SP} p + 1) \cdot T_M \cdot C_e \Phi \cdot K_{OST}}{32T_{SP}^2 p \cdot K_{OSS} \cdot R_S} = \frac{8T_{SP} p + 1}{T_{SP} p \cdot K}, \quad (18)$$

где $K = \frac{32T_{SP} \cdot K_{OSS} \cdot R_S}{T_M \cdot C_e \Phi \cdot K_{OST}}$.

Из (18) следует, что получен ПИ-регулятор скорости.

Для устранения перерегулирования на входе контура скорости установлен фильтр с передаточной функцией:

$$W_F(p) = \frac{1}{8T_{SP}p + 1}. \quad (19)$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости с учетом фильтра имеет вид:

$$W_{ZS}(p) = \frac{1}{K_{OSS}} \cdot \frac{1}{64T_{SP}^3 p^3 + 32T_{SP}^2 p^2 + 8T_{SP}p + 1}. \quad (20)$$

Для синтеза регулятора контура положения принимаем:

$$W_{ZS}(p) = \frac{1}{K_{OSS}} \cdot \frac{1}{8T_{SP}p + 1}. \quad (21)$$

Из условия технического оптимума передаточная функция контура положения определяется:

$$\frac{1}{16T_{SP}p(8T_{SP}p + 1)} = W_{RP}(p) \cdot \frac{1}{8T_{SP}p + 1} \cdot \frac{1}{K_{OSS}} \cdot \frac{1}{p}, \quad (22)$$

откуда передаточная функция $W_{RP}(p)$:

$$W_{RP}(p) = \frac{K_{OSS}}{16T_{SP}}, \quad (23)$$

т. е. получен пропорциональный регулятор.

В силу того, что система автоматического управления (САУ) координатой является цифровой, целесообразно выбрать минимальную частоту квантования цифрового регулятора. Самым быстродействующим контуром является контур тока, который в замкнутом состоянии имеет вид:

$$W_{ZT}(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2cTp + 1}, \quad (24)$$

где $T^2 = 2T_{SP}^2$, $2cT = 2T_{SP}$, c – коэффициент демпфирования.

Амплитудно-частотная характеристика для зависимости (24) имеет вид

$$A_I(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T^2\omega^2)^2 + (2cT\omega)^2}}, \quad (25)$$

где ω – частота сигнала задания;

ω_0 – частота квантования экстраполятора.

Амплитудно-частотная характеристика, смещенная на величину ω_0 , примет вид

$$A_I[j(\omega - \omega_0)] = \frac{1}{\sqrt{[1 - T^2(\omega - \omega_0)^2]^2 + [2cT(\omega - \omega_0)]^2}}. \quad (26)$$

Для дискретной системы АЧХ может быть выражена в виде

$$\Delta A(e^{j\omega T}) = A_I(j\omega) + A_I[j(\omega - \omega_0)]. \quad (27)$$

При выборе величины частоты смещения характеристик необходимо выполнение того условия, что превышение их суммы по сравнению с АЧХ аналогового прототипа в области частоты пропускания ω_C линейной части системы должно быть в пределах допустимой погрешности. Последняя должна соответствовать технологическим требованиям. Величина погрешности определяется также по зависимости (25), в которой необходимо заменить погрешность $\Delta A_I(j\omega)$ на $\Delta A_I(j\omega)$ и частоту ω на ω_{01} [13, 14].

Для настроенного на технический оптимум замкнутого контура положения коэффициент демпфирования $c = 0,707$. Следовательно, с учетом зависимости (25) получим

$$\Delta A_I^2(\omega_{01})T^4\omega_{01}^4 = 1 - \Delta A_I^2(\omega_{01}). \quad (28)$$

Из (28) выразим

$$\omega_{01} = \sqrt[4]{\frac{1 - \Delta A_I^2(\omega_{01})}{\Delta A_I(\omega_{01})^2 T^4}}. \quad (29)$$

В (29) принято $\Delta A_I(\omega_{01})$ – заданное значение погрешности по отношению к аналоговому прототипу; ω_{01} – значение частоты при максимальной частоте задающего сигнала – ω_{MAX} .

К значению частоты, полученному в (29), необходимо прибавить частоту полосы пропускания линейной части дискретной системы, чтобы обеспечить заданную погрешность на всем диапазоне частот сигнала задания ω :

$$\omega_0 = \omega_{01} + \omega_C. \quad (30)$$

Полученное значение частоты квантования ω_0 позволяет определить период дискретности экстраполятора нулевого порядка

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (31)$$

Проведенное исследование по синтезу САУ проводилось на модели в среде программирования Matlab Simulink. При моделировании использовались экспериментально полученные передаточные функции:

- процесса нагрева $W_S(p) = \frac{\tau_D(p)}{I(p)} = \frac{K_S}{T_S p + 1}$;
- охлаждения $W_O(p) = \frac{\tau_O(p)}{Q_O(p)} = \frac{K_O}{T_O p + 1}$;
- силового преобразователя контура тока $W_{SP}(p) = \frac{U_D(p)}{U_Z(p)} = \frac{K_{SP}}{T_{SP} p + 1}$;
- силового преобразователя системы управления температурой $W_O(p) = \frac{U(p)}{\tau_P(p)} = \frac{K_{SP1}}{T_{SP} p + 1}$.

Передаточные функции по паспортным данным:

- звено якорной цепи двигателя $W_{D1}(p) = \frac{I_D(p)}{U_D(p)} = \frac{1}{R_S(T_S p + 1)}$;

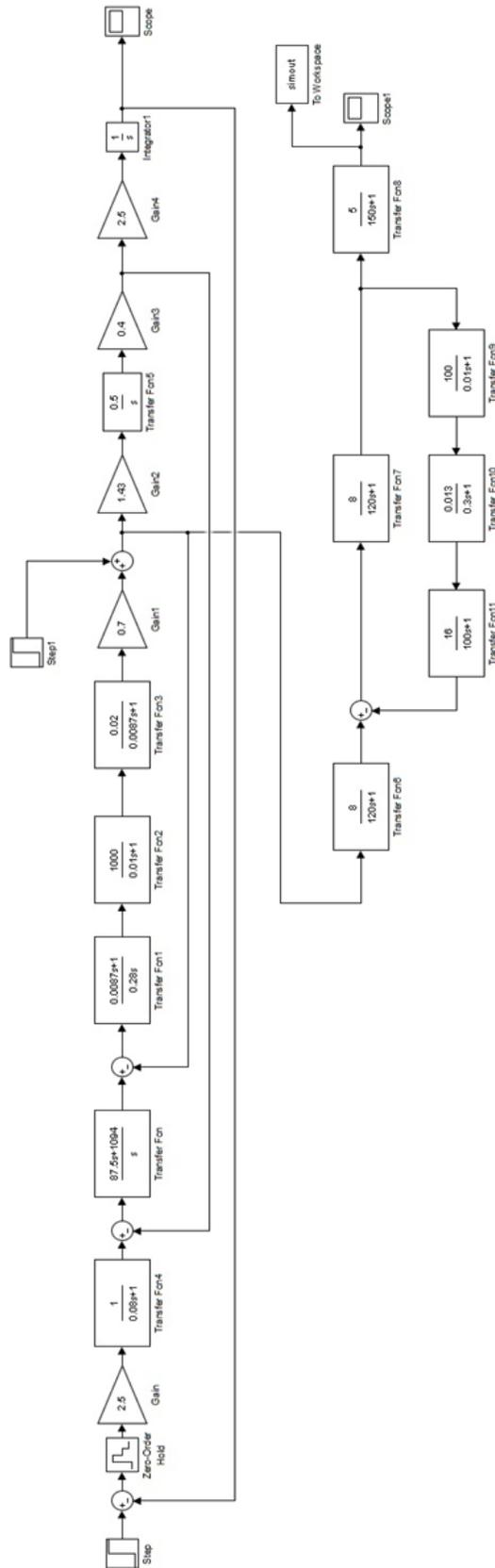


Рис. 6. Модель ЦСАУ мехатронного модуля

- электромеханическое звено $W_{D2}(p) = \frac{\omega_D(p)}{I_D(p)} = \frac{R_S}{C_e \Phi T_M p}$;
- насос с асинхронным приводом $W_{AD}(p) = \frac{Q_O(p)}{U(p)} = \frac{K_{AD}}{T_{AD} p + 1}$;
- регулятор тока $W_{RT}(p) = \frac{R_S(T_S p + 1)}{2T_{SP} p \cdot K_{SP} \cdot K_{OST}}$;
- регулятор скорости $W_{RS}^*(p) = \frac{(8T_{SP} p + 1) \cdot T_M \cdot C_e \Phi \cdot K_{OST}}{32T_{SP}^2 \cdot K_{OSS} \cdot R}$;
- фильтр $W_F(p) = \frac{1}{8T_{SP} p + 1}$;
- регулятор положения $W_{RP}(p) = \frac{K_{OSS}}{16T_{SP}}$;
- планшайба $W_P(p) = \frac{\tau(p)}{\tau_p(p)} = \frac{K_P}{T_P p + 1}$.

При моделировании использовались значения параметров: $K_S = 8$; $T_S = 120$ с; $K_O = 16$; $T_O = 100$ с; $K_{SP} = 1000$; $K_{SP1} = 100$; $T_{SP} = 0,01$ с; $R_S = 1$ Ом; $C_e \Phi = 20$ В·с; $T_M = 0,1$ с; $K_{AD} = 0,013$; $T_{AD} = 0,3$ с; $Q_O = 5$ л / мин при температуре 19 °С; $K_{OST} = 0,7$ В / А; $K_{OSS} = 0,4$ Вс; $K_{OSP} = 1$ В.

Для рассматриваемой ЦСАУ полоса пропускания контура положения 6,3 с⁻¹, откуда [14] $\omega_0 = 23\omega_c \cong 145$ с⁻¹. Отсюда определяется минимальная частота квантования $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{6,28}{145} = 0,04$ с.

Полученные при моделировании графики переходного процесса и температурных изменений размеров детали представлены на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

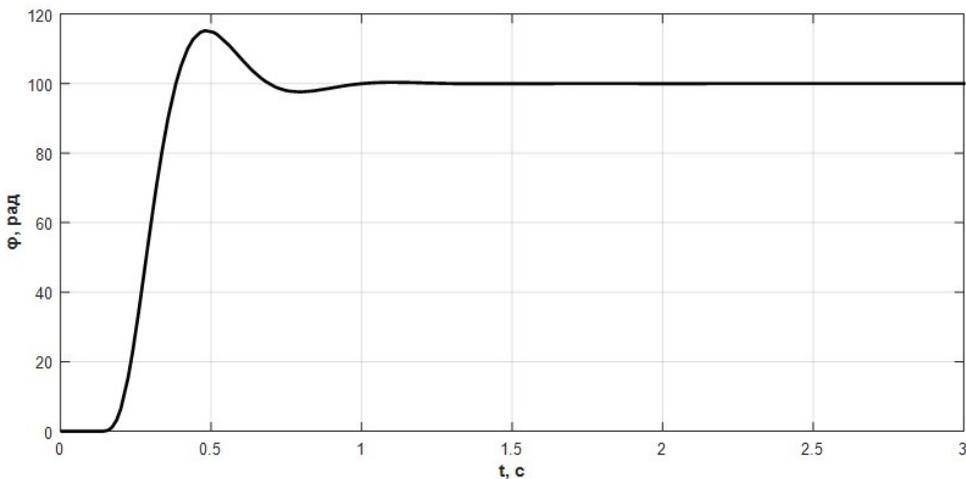


Рис. 7. Переходный процесс контура положения

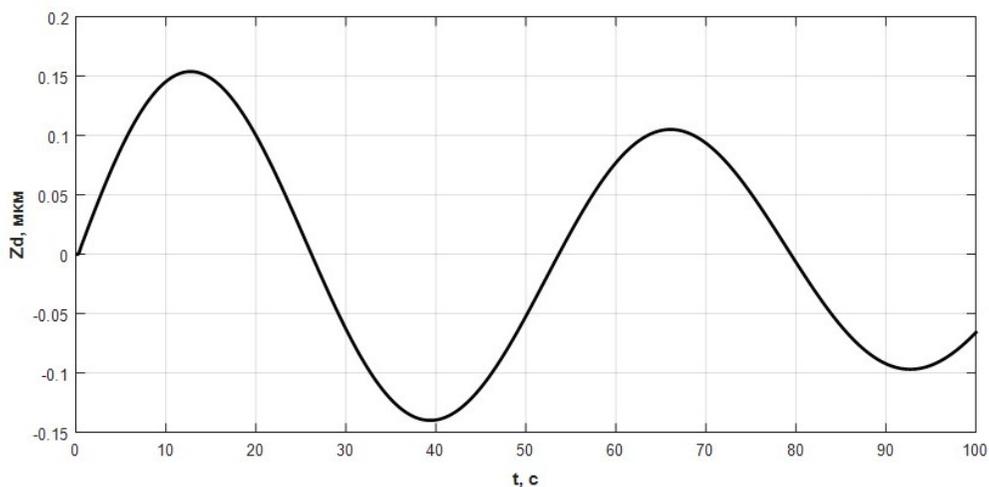


Рис. 8. Температурная деформация размеров детали

Полученные при моделировании изменения размеров детали порядка 0,15 мкм с учетом процессов нагрева и охлаждения соответствуют требованиям, предъявленным к прецизионным станкам.

Заключение

1. В статье рассмотрена структура мехатронного модуля с системой управления положением и температурной деформацией детали.
2. Рассмотрено взаимодействие систем управления позиционированием планшайбы и компенсацией температурной деформации.
3. Показано, что оснащение мехатронным модулем существенно повышает точность и производительность станка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стол поворотный кантуемый с управлением от УЧПУ станка. Модель СК-36-1204 // Руководство по эксплуатации СК-36-1204.00.00.000РЭ. ЗАО «Стан-Самара». – Самара, 2015. – 8 с.
2. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische System, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 с.
3. Technical manual TNC20 DR. Johannes Heidenhain GmbH, 83301 Traunreut, Germany – October 2010.
4. Круговые встраиваемые электродвигатели 1W6 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.siemens.ru/ad/ms>.
5. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоиздат, 2001. – 520 с.
6. Козьминых Д.В. Расчет мощности электроприводов с учетом старения изоляции. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1960. – 67 с.
7. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. – 2000. – № 1. – С. 5–10.
8. Лысов М.С., Стариков А.В., Стариков В.А. Линеаризованная математическая модель синхронного электродвигателя при различных способах управления его скоростью // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2008. – № 1(18).
9. Лысов М.С., Стариков А.В. Математическая модель поворотного стола как объекта управления // Стин. – 2009. – № 4. – С. 7–10.
10. Рапопорт Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. – Куйбышев, 1985. – 55 с.
11. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.

12. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
13. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-слеящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка // Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2015. – № 4(48). – С. 70–75.
14. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 685–689.

Статья поступила в редакцию 4 мая 2021 г.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE MECHATRONIC MODULE

V.E. Lysov, V.A. Polyakov

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

E-mail: 67lysov@mail.ru

Annotation. *The paper discusses a new approach to improving the accuracy of reproducing the task signal by a precision circular transfer table based on the implementation in the form of a mechatronic module. This design eliminates the disadvantages of the traditional design, such as backlash, failure when fixing the face-plate. The mechatronic module is a gearless connection between the face-plate and the electric motor. The new design required a new approach to the operation of the automatic tracking and stage positioning control system. In the process of stage positioning, thermal deformations occur, and therefore, a feature is the inclusion of an additional automatic control system for the cooling of an executive synchronous electric motor with permanent magnets in the rotor. The paper deals with the issue of the interrelationship between the positioning and tracking systems with the thermal deformation compensation system. Simulation of the operation of two systems has been carried out.*

Keywords: *mechatronic module, face-plate, automatic control system, thermal deformation, circular transfer table, transfer function, amplitude frequency response, precision positioning system.*

REFERENCES

1. Stol povorotnyy kantuemyy s upravleniem ot UCHPU stanka. Model' SK-36-1204 // Rukovodstvo po ekspluatatsii SK-36-1204.00.00.000RYe. ZAO «Stan-Samara». Samara. 2015. – 8 p.
2. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische System, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 с.
3. Technical manual TNC20 DR. Johannes Heidenhain GmbH, 83301 Traunreut, Germany – October 2010. Krugovyye vstraevyemyye elektrodvigateli 1W6. <http://www.siemens.ru/ad/ms>
4. *Klyuchev V.I.* Teoriya elektroprivoda. M.: Energoizdat, 2001. 520 p.
5. *Koz'minykh D.V.* Raschet moshchnosti elektroprivodov s uchetom stareniya bzolyatsii. Kuybyshev: Kuybyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1960. 67 p.
6. *Poduraev Yu.V., Kuleshov V.S.* Printsipy postroeniya i sovremennyye tendentsii razvitiya mekhatronnykh sistem // Mekhatronika. 2000. № 1. Pp. 5–10.

*Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vasily A. Polyakov, Postgraduate Student.*

7. *Lysov M.S., Starikov A.V., Starikov V.A.* Linearizovannaya matematicheskaya model' sinkhronnogo elektrodvigatelya pri razlichnykh sposobakh upravleniya ego skorost'yu // Vestnik SamGTU. 2008. № 1 (18).
8. *Lysov M.S., Starikov A.V.* Matematicheskaya model' povorotnogo stola kak ob''yekta upravleniya // Stin. 2009. № 4. Pp. 7–10.
9. *Rapoport E.Ya.* Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka. Konsept lektсий. Kuybyshev, 1985. 55 p.
10. *Anuchin A.S.* Sistemy upravleniya elektroprivodov. M.: Izd. dom MEI, 2015. 373 p.
11. *Lysov V.Ye.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya ucheb. posobiye. M.: Mashinostroyeniye, 2010. 500 p.
12. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz pogreshnosti v vosproizvedenii zadannoy trayektorii dvizheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda s uchotom diskretnosti ckstrapolyatora nulevogo poryadka // Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskiye nauki. 2015. № 4 (48). Pp. 70–75.
13. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz vliyaniya chastoty kvantovaniya tsifrovogo regulyatora polozheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye. 2016. Vol. 17. № 10. Pp. 685–689.

ПОДПИСКА – 2022
на январь-июнь по интернет-версии «Объединенного каталога «Пресса России» на сайтах
www.pressa-rf.ru и www.akc.ru

Уважаемые читатели!
Обратите внимание, что с 1 сентября 2021 г. проводится
подписная кампания на журналы
Самарского государственного технического
университета (первое полугодие 2022 года)

18106 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»

18107 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Психолого-педагогические науки»

18108 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»

41340 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Философия»

70570 Градостроительство и архитектура

Условия оформления подписки Вы найдете
на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru