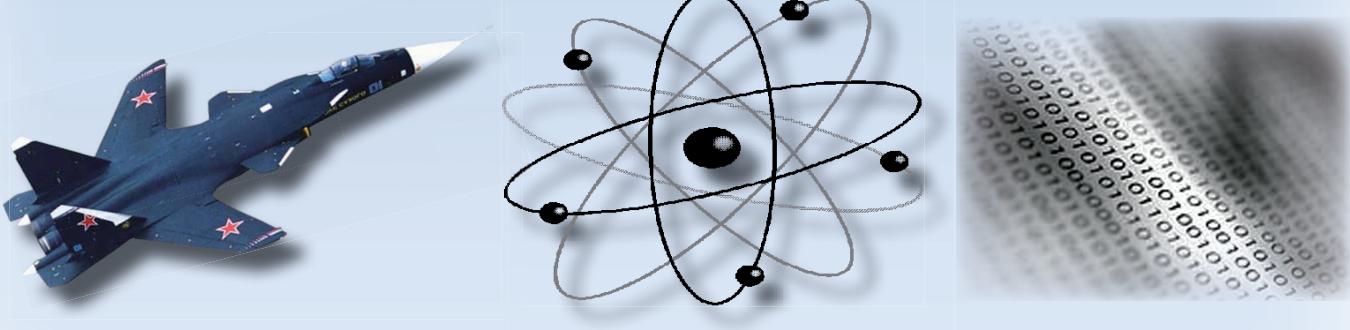


ISSN 2076-4359

№ III-1 (43)
2020

Учёные записки

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, прсылайте свои материалы на адрес электронной почты:
journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГТУ», находящейся на сайте
<http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и редакции:
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508
Телефон для справок:
+7 (4217) 24-13-48

Подписаться на журнал можно в любом отделении «Почты России»; индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.

Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель:

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала: **Алексей Иванович Евстигнеев**, д-р техн. наук, проф.;
Заместитель главного редактора журнала, главный редактор серии «Науки о природе и технике»: **Александр Витальевич Космынин**, д-р техн. наук, проф.;
Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»: **Владислав Викторович Куриный**, канд. техн. наук, доц.;
Заместитель главного редактора журнала, главный редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»: **Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.;
Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»: **Татьяна Анатольевна Яковлева**, канд. экон. наук, доц.;
Литературные редакторы: **Александр Альфредович Шунейко**, д-р филол. наук, доц.,
Галина Алексеевна Шушарина, канд. филол. наук, доц.;
Корректор: **Татьяна Николаевна Карпова**;
Технический редактор: **Татьяна Николаевна Карпова**;
Администратор сайта: **Алексей Александрович Просолович**, канд. техн. наук;
Перевод на английский язык: **Галина Алексеевна Шушарина**, канд. филол. наук, доц.

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сарилов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марынин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА
«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦҮЙ СЮЙ, профессор Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬЧИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мицуми (Япония)

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

МАШИНОСТРОЕНИЕ

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шенъянского архитектурно-строительного университета (КНР)

СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»

ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ

СВЕТЛАНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

ИСТОРИЯ

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

ЭКОНОМИКА

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.
Yu. I. Afanasyeva, A. V. Rybakov, A. N. Shurpo

ОРГАНИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

ACTIVITY OF AGRICULTURAL MANUFACTURERS IN THE CONDITIONS OF INFORMATION AND TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT

Афанасьева Юлия Игорьевна – магистрант 1-го курса Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); тел. 8(977)915-62-79. E-mail: julya.afan@gmail.com.

Mrs. Yulia I. Afanasyeva – Master's Degree Student, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); tel. 8(977)915-62-79. E-mail: julya.afan@gmail.com.

Рыбаков Анатолий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, Москва); тел. 8(499)973-34-42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Mr. Anatoly V. Rybakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Automated Information Processing Systems and Management, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, Moscow); tel. 8(499)973 34 42. E-mail: avr48@rambler.ru.

Шурпо Александр Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института конструкторско-технологической информатики Российской академии наук (Россия, Москва); тел. 8(499)978-26-02, 8(910)451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Mr. Aleksandr N. Shurpo – PhD in Engineering, Senior Researcher, Laboratory № 1, Institute of Engineering and Design Informatics of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow); tel. 8(499)978-26-02, 8(910) 451-98-12. E-mail: a-shurpo@yandex.ru.

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с организацией информационно-технологической среды деятельности предприятий пищевых производств в современных условиях. На сегодняшний день существует острые проблемы в России, где современные технологии «ушли» далеко вперёд, а большое количество производств их не внедряет. В данной статье рассмотрен вариант решения данной проблемы путём создания агрегатора, или информационно-технологической платформы – представителя «умной бизнес-системы», который сможет координировать работу всех участников сельскохозяйственной отрасли. Сделано заключение о том, что представленная модель позволяет повысить конкурентоспособность предприятий, соединить все звенья производств пищевых продуктов, а также осуществлять полный контроль и взаимодействие внутри каждого производства.

Summary. The article is devoted to the actual problem associated with the organization of the information-technological environment of the enterprises of food production in modern conditions. Today, there is an acute problem in Russia, where modern technologies have far «gone» ahead, and a large number of industries do not implement them. This article describes a solution to this problem by creating an aggregator or information technology platform – a representative of a «smart business system» that can coordinate the work of all participants in the agricultural industry. The conclusion was made that the presented model allows to increase the competitiveness of enterprises, to connect all parts of food production, and to realize control functions and interaction within each production.

Ключевые слова: агрегатор, информационно-технологическая среда, деятельность, агропромышленные комплексы, пищевые производства.

Key words: aggregator, information technology environment, activity, agricultural complexes, food production.

УДК 338.439.4

На сегодняшний день информационные технологии шагнули далеко вперёд. По наблюдениям учёных, без данных технологий сложно представить жизнь людей.

Современные цифровые технологии позволяют «облегчить» и скоординировать производственные процессы, особенно это касается различных видов производств. Но, к сожалению, предприятия сельского хозяйства достаточно неравномерно вовлечены в этот процесс.

Сама по себе сельскохозяйственная отрасль – это сложная промышленная деятельность, которая обусловлена высокими рисками. Важно отметить, что развитие сельского хозяйства – задача, находящаяся на государственном уровне. Это объясняется тем, что высокоразвитая сельскохозяйственная отрасль – это независимость страны по обеспечению населения продовольственными товарами в соответствии с нормативно-технической документацией.

В Российской Федерации в сельском хозяйстве особую роль играют агропромышленные комплексы (АПК). По данным Росстата, на долю АПК приходится до 9,5 % численности занятого населения и 6 % ВВП России. АПК обеспечивает значительные мультиплексивные эффекты для экономики: по оценкам, каждый рубль, вложенный в АПК, даёт возврат в смежных отраслях в диапазоне до 4-5 рублей [1; 2]. Однако при создании АПК необходимо учитывать все плюсы и минусы данной стратегии. Все положительные и отрицательные стороны организации деятельности в условиях АПК представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отрицательные и положительные стороны АПК [3]

| Преимущества АПК | Недостатки АПК |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Объединение предприятий способствует объединению капитала, где создаются более благоприятные условия для привлечения инвестиций; - возможность создания организации производства замкнутого цикла, переработки продукции, в результате чего происходит увеличение прибыли АПК; - снижение рисков отдельных предприятий, входящих в АПК; - увеличение роста продаж за счёт увеличения производства при расширении рынков сбыта; - сокращение затрат себестоимости продукции на основе издержек хранения и переработки; - возможность распределения существующих материально-технических ресурсов не только из одного производства в другое, но и между участниками производственного процесса; - возможность привлечения высококвалифицированного и высокооплачиваемого управленческого персонала; обеспечение достойного уровня заработной платы | <ul style="list-style-type: none"> - Отсутствие хозяйственной самостоятельности предприятий, вошедших в АПК; - недостаток и/или отсутствие контроля за деятельностью бухгалтерских и финансовых служб; - отсутствие согласования с хозяйствами-участниками цен на продукцию; - отсутствие распределения прибыли, полученной на конечной стадии единой технологической цепи производства; - возможность принятия выгодного предложения при «вхождении» в АПК; - земельный вопрос: передача земли собственников в аренду интегрированным структурам и перевод её в уставной капитал комплекса. В первом варианте собственники земельных долей не теряют права собственности, второй вариант не гарантирует это право; - сложность управления большим предприятием; - сложность внедрения новых технологий на больших производствах; - дополнительные затраты на переоснащение предприятий, только входящих в АПК; - невозможность «конкуренции» между маленькими и большими комплексами; - снижение широты ассортимента продукции/сырья |



Из табл. 1 видно, что АПК – это отличная альтернатива, но она всё же имеет целый ряд недостатков.

На сегодняшний день особую популярность набирают информационно-технологические платформы или агрегаторы. Данные системы представляют собой «умную бизнес-систему», которая способна координировать работу всех игроков сельскохозяйственной отрасли.

Агрегатор имеет следующий принцип работы – это обмен информацией между участниками внутри системы и применение одновременного непосредственного обучения в нём для удовлетворения потребностей клиентов.

Воплотить в действие работу данной системы – значит создать агрегатор, в котором будет содержаться:

1. Разработка единых требований для участия в информационно-технологической платформе для следующих пользователей:

a) фермы / заводы:

- место нахождения;
- краткое описание производителя;
- описание выращиваемого/производимого сырья/продукта;
- объём выращивания сырья/товара;
- нормативно-техническая документация;
- фото;
- минимальная и максимальная продажа сырья/товара;
- стоимость;

b) поставщики:

- место нахождения;
- краткое описание производителя;
- используемый транспорт для транспортировки сырья/товаров;
- нормативно-техническая документация;
- фото;
- стоимость;

в) точки сбыта:

- место нахождения;
- краткое описание производителя;
- нормативно-техническая документация.

Данные требования необходимы для повышения доверия и согласованности между участниками агрегатора и обеспечивают быстрый поиск необходимого компаньона.

2. Регистрация. Данный пункт позволяет разделить фермы, заводы, поставщиков и розничные точки для упрощённого поиска и общения между участниками деятельности:

- облачный бизнес-центр. Данная система позволяет не только соединить, но и упростить общение в системе. Именно облачный центр не будет требовать мощных операционных систем, для этого достаточно смартфона или иного ИТ-устройства, где будет возможность установить приложение или зайти на сайт;

- создание оптимальной платформы с современными протоколами и интерфейсом;

- внедрение «обучения», т.е. создание ссылок для повышения квалификации и использования новых технологий на производствах.

Таким образом, благодаря данной информационно-технологической платформе будет получена возможность сетевой аналитики и координации данных о работе отдельных разрозненных участников деятельности. Работа агрегатора более направлена на деятельность всех участников взаимодействия, т.к. все они будут находиться в единой системе и каждый сможет выбрать, какой вариант взаимодействия для них более выгодный и возможный, и убедиться в этом. Информационно-технологическая платформа позволит быстро и динамично всем участникам адаптироваться к меняющемуся рынку и предпочтениям потребителя, что даёт возможность поддерживать высокую конкурентоспособность на рынке. На основе количества совершенных сделок можно составлять

статистику о проделанной работе и о рейтинге производителя. Из всего этого вытекает два положительных момента: 1) можно проследить работу предприятия, т.е. отслеживать конкурентоспособность; 2) получая данную статистику, предприятия могут обращаться в банк, например, для получения кредитов. В данном случае необходимо подключать аналитиков, которые смогут присуждать «некий рейтинг», отслеживаемый в ходе практической деятельности. Для создания информационно-технологической платформы необходимы:

1. сбор актуальных данных по установленным требованиям и распределение их по релевантности;

2. проведение всех операций через агрегатор при помощи интернета, т.е. необходима программа, которая будет похожа по образу и подобию на то, как мыслит человек, а не принимающая готовые решения на рынке.

В табл. 2 представлена бизнес-модель Остервальдера, где предлагается новое решение для современного сельского хозяйства.

Таблица 2

Бизнес-модель Остервальдера. Новое решение для производителей сельскохозяйственных продуктов в условиях информационно-технологической среды

| Ключевые партнёры | Ключевые виды деятельности | Целостное предложение | Отношение между собой | Потребительский сегмент |
|--|---|--|---|---|
| - Фермы-производители первичного сырья для производства продуктов питания; - перерабатывающие предприятия рецептурного производства; - розничные точки продаж; - провайдер сайта для ведения базы данных; - провайдер платёжного сервиса; - инвесторы | - Разработка технологической интернет-платформы и алгоритмов для организации поддержки деятельности рецептурного производства; - маркетинговые исследования потребностей клиентов (в плюсе фермы, производства, розничные точки, клиенты (потребители)); - поддержка жизненного цикла производства, обеспечение «прозрачности», качества и возможности доставки пищевого продукта конечным потребителям | - Сокращение времени; - организация автоматизации финансовых расчётов и платежей; - информация (стоимость продукта, данные о предприятиях, фото, отзывы); - конкурентные цены; - удобство по времени (запросы); - удобная регистрация (выбор при регистрации: завод, ферма, розничная точка); - выбор предложения (закупки, продажа) | - Запросы внутри сообщества для координации совместной деятельности; - автоматизированная система для сбора и хранения данных об условиях деятельности | - Фермы; - перерабатывающие производства рецептурного типа; - розничные точки; - удовлетворённые клиенты |
| Структура затрат | | | | |
| - Разработка и поддержание функционирования платформы и приложения; - маркетинг, реклама; - поддержка сервиса | | | | |
| Доходы | | | | |
| - Плата за сервис; - дополнительные сервисы; - информация с потребностями пользователей | | | | |
| Ключевые ресурсы | | | | |
| - Информация о распределённом сообществе специалистов, обеспечивающих эксплуатацию среды деятельности; - программная платформа; - информация о распределённом сообществе производителей продукции потребления | | | | |



Данная бизнес-модель позволяет полностью раскрыть предложенное решение. Она показывает: ключевых партнёров-участников; ключевые виды деятельности, т.е. что предлагается; целостное предложение – здесь конкретно раскрывается, что будет осуществлено; отношения между собой – взаимосвязи между участниками агрегатора; потребительский сегмент – здесь акцент делается не только на конечных потребителей, но и, например, на производителей, которые приобретают сырьё для дальнейшей переработки; структуру затрат и доходы.

Через онлайн-платформу пользователи смогут создавать свои программы лояльности, различные скидки, купоны и т.п. Система позволит производить отслеживание онлайн бизнес-процессов, обеспечить производителей сельскохозяйственной продукции прямыми потоками сырья/продуктов, находить быстрые решения в форс-мажорных ситуациях.

На сегодняшний день в мире нечто подобное уже существует, данное решение пришло к нам из Китая от компании Alibaba. Данная компания была создана в 1999 году и стала одной из самых популярных компаний в мире. Она объединила множество мелких производителей и соединила их при помощи Интернета напрямую с потребителем. Теперь в любой стране мира при помощи смартфона или компьютера потребитель может сделать заказ, а затем получить его с помощью поставщиков. Следовательно, получилась целостная, открытая система электронной коммерции [4].

Таким образом, создание данного агрегатора позволит скоординировать работу предприятий сельского хозяйства для достижения целевого эффекта. В качестве примера авторы предполагают адаптировать существующую модель Alibaba, при помощи которой удастся сократить затраты сельского хозяйства, а именно: чётко оптимизировать существующие производства, создать связи от фермы до потребителя, повысить конкурентоспособность предприятий, создать агрегатор, где возможно будет осуществлять выбор для всех звеньев производства любого пищевого продукта.

При этом агрегатор позволит:

1. создавать качественные пищевые продукты;
2. повысить конкурентоспособность предприятий;
3. создать просматриваемую систему (чем больше данных, тем больше доверия у следующих звеньев производств, а также у самих потребителей);
4. осуществить полный контроль и взаимодействие внутри каждого производства, а именно между филиалами и главным заводом;
5. соединить все звенья производств от фермы до потребителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 15.05.2019).
2. Прогноз научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года / Минсельхоз России; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2017. – 140 с.
3. Кирсанова, О. В. Интеграция в АПК: преимущества и недостатки / О. В. Кирсанова // Никоновские чтения. – 2010. – № 15. – С. 24-25.
4. Мин Цзэн. Как Alibaba построила модель умного бизнеса / Мин Цзэн // Ведомости. – 2018. – 03 ноября.

Болдырев В. В., Горьковый М. А.
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Болдырев В. В., Горьковый М. А.
V. V. Boldyrev, M. A. Gorkavyy

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL CONTROL MODULE OF AUTOMATED AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM

Болдырев Владислав Вячеславович – аспирант кафедры управления инновационными процессами и проектами Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Boldurev16@gmail.com.

Mr. Vladislav V. Boldyrev – Post-Graduate Student, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-na-Amure). Email: Boldurev16@gmail.com.

Горьковый Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления инновационными процессами и проектами Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Uipp@knastu.ru.

Mr. Mikhail A. Gorkavyy – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Management of Innovative Processes and Projects, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-na-Amure). Email: Uipp@knastu.ru.

Аннотация. В работе предложена структура, на основе которой возможна реализация интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения, работающей с n -м количеством источников теплового излучения, расположенных в среде со сложной инфраструктурой, предложена функциональная схема, отображающая взаимосвязь между параметрами внешней среды и элементами объекта управления с целью определения ограничений при синтезе законов управления, направленных на оптимизацию работы систем энергообеспечения, предложена декомпозиция функциональной схемы, отображающая объекты имитационной модели для расчёта потребления преобразованной энергии, полученной излучением от источника, а также представлена реализация части интеллектуального модуля управления – системы оценивания потенциала источников теплового излучения, реализованной на базе нечёткой логики.

Summary. The paper proposes a structure on the basis of which it is possible to implement an intelligent control module for an energy supply system working with the n -number of heat radiation sources located in an environment with a complex infrastructure; a functional diagram is proposed that displays the relationship between the parameters of the external environment and the elements of the control object in order to determine constraints in the synthesis of control laws aimed at optimizing the operation of energy supply systems, a decomposition of a functional diagram is proposed that displays the objects of a simulation model for calculating the consumption of converted energy received by radiation from a source, and also presents realizations, parts of an intelligent control module – a system for assessing the potential of heat radiation sources, implemented on the basis of fuzzy logic.

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, алгоритмы оптимизации, технические системы, системы энергообеспечения, нечёткий вывод, управление техническими объектами и системами.

Key words: intelligent control systems, optimization algorithms, technical systems, energy supply systems, fuzzy inference, management of technical objects and systems.

УДК 62-6:62-69

На современном этапе развития технологий чётко сформировались и продолжают укрепляться тенденции развития альтернативной энергетики, позволяющей снизить нагрузку на традиционные ресурсы планеты, обеспечить снижение негативной экологической обстановки и генерировать энергию на труднодоступных территориях. Одним из перспективных направлений развития



альтернативной энергетики является разработка автономных систем энергообеспечения на базе солнечных коллекторов. Помимо значительного числа преимуществ таких систем системы на базе солнечных коллекторов имеют и недостатки, основным из которых является невысокий КПД. Применительно к таким системам определяющими факторами конечного значения КПД являются эффективность фотоэлемента или вакуумной трубы (в случае вакуумного солнечного коллектора) и эффективность системы преобразования энергии.

Исследования в области повышения эффективности рабочего элемента солнечного коллектора ведутся специалистами крупных корпораций и отдельными учёными, результаты некоторых из них представлены в [14; 15]. Тем не менее все достижения в части эффективности конечных элементов могут быть полностью нивелированы потерями низкоэффективной подсистемы преобразования энергии автономной системы энергообеспечения. Поэтому проблема обеспечения оптимальных условий для получения максимального эффекта работы фотоэлементов или вакуумной трубы является весьма актуальной и может быть решена за счёт разработки оптимальных алгоритмов управления процессом преобразования.

Дополнительным стимулом в поиске решений по повышению эффективности системы преобразования энергии (далее гелиосистемы) является возможность на базе полученных алгоритмов улучшить уже существующие и внедрённые в эксплуатацию местные системы отопления, что обеспечит снижение срока окупаемости и повысит КПД, т.к. гелиосистемы, доступные на рынке, функционально ограничены в части адаптации к изменяющимся условиям внешней среды и не позволяют получить максимальный эффект от преобразования энергии [5; 13].

Таким образом, приоритетной задачей по повышению КПД систем энергообеспечения, является разработка автоматизированной системы управления, включающей в себя информационно-сенсорные, оптимизационные и прогнозирующие модули и контролирующей исполнительные устройства, корректирующие положение рабочего органа (панели) в пространстве в зависимости от изменений значений внешних факторов.

При формировании системы управления необходимо учитывать имеющийся аппаратный комплекс: так, можно выделить подвижные преобразователи, ориентирующиеся непосредственно на источник излучения [1], и преобразователи, меняющие положение рабочей поверхности по фиксированному алгоритму [3]. Первые способны адаптироваться к изменениям параметров внешней среды, но затрачивают дополнительную энергию (движение исполнительных устройств). Вторые же абсолютно индифферентны к градиенту излучения источников внешней среды. Каждая из двух представленных стратегий реализации системы управления эффективна в своём сегменте. Системы с программируемым алгоритмом перемещения эффективны в ситуациях, когда средняя мощность излучения источников достаточно высока, системы основанные на принципе слежения эффективны в ситуациях, когда необходимо максимизировать сбор энергии излучения в условиях нестабильности внешней среды. Адаптивные управляющие системы коллекторов являются более сложным, но и более универсальным решением [7].

Для поиска эффективных законов управления авторами был агрегирован список входных параметров, приведённых в табл. 1 (в том числе факторов внешней среды), которые могут оказывать влияние на КПД системы энергообеспечения.

Представленный в табл. 1 список параметров, оказывающих влияние на эффективность гелиосистемы, не является исчерпывающим [9], необходимость учёта всего объёма представленных параметров определяет высокую степень сложности законов управления. Для этого предлагается использовать систему управления, представленную на рис. 1, имеющую в своем составе имитационную модель, интеллектуальные алгоритмы вывода, построенные на базе нейро-нечётких подсистем [11; 12], модуль прогнозирования целесообразности принятия конкретного управляющего решения, базы знаний и пользовательского интерфейса.

Таблица 1

Список параметров, оказывающих влияние на эффективность гелиосистемы

| Наименование параметра <i>1</i> | Единица измерения <i>2</i> | Характеристика влияния на эффективность системы энергообеспечения <i>3</i> | Степень влияния на эффективность системы <i>4</i> |
|---|-------------------------------|--|--|
| 1. Угол наклона рабочей поверхности коллектора к нормали | ° | Определяет значение углового коэффициента | Средняя |
| 2. Средняя мощность излучения в год | Дж/м ² *с | Определяет потенциал генерации энергии | Высокая |
| 3. Максимально возможное значение температуры внешней среды | °C | Определяет потенциал применимости гелиоустановки, её конфигурацию и режимы работы, ограничивающие максимальное и минимальное количество преобразуемого тепла в единицу времени | Средняя |
| 4. Минимально возможное значение температуры внешней среды | °C | | Высокая |
| 5. Порог чувствительности полупроводника | лм*Гц ^{-1/2} | Определяет конфигурацию солнечной панели и её производительность | Ниже средней |
| 6. Оптический КПД абсорбера | % | Влияет на удельную производительность вакуумного солнечного коллектора | Высокая |
| 7. Площадь рабочей поверхности | м ² | Влияет на удельную производительность преобразователя и габариты системы преобразователей | Высокая |
| 8. Степень черноты объекта, участвующего в передаче энергии излучением | % | Определяет эффективность процесса передачи энергии от источника к преобразователю | Выше средней |
| 9. Температура источника | °C | Определяет количество тепла, передаваемого от более нагретого тела (источника) к менее нагретому (преобразователю) | Высокая |
| 10. Диапазон спектральной чувствительности полупроводника в преобразователе (λ_{max}) | мкм | Определяет зону спектра для эффективного преобразования энергии | Выше средней |
| 11. Длина волны излучения источника энергии | мкм | Определяет способность преобразователя реагировать на излучение | Ниже средней |
| 12. КПД трансформатора тока | % | Влияет на количество потерь полезной энергии в процессах преобразования электромагнитного излучения в электричество, а затем в тепло | Ниже средней |
| 13. КПД трубчатого электронагревателя | % | | Низкая |
| 14. КПД аккумулятора | % | | Низкая |
| 15. Расстояние между источником и преобразователем | м | Влияет на эффективность процесса передачи энергии излучением в среде с заданной температурой | Выше средней |
| 16. Угловой коэффициент | - | Влияет на эффективность процесса передачи энергии излучением с учётом положения источника и преобразователя в пространстве | Высокая |



Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--------------------------------------|---|--------------|
| 17. Время суток | ч | Определяет количество преобразуемой энергии от Солнца | Высокая |
| 18. Продолжительность процесса излучения тепла от источника к преобразователю | с | Определяет количество преобразуемой энергии от нагретых объектов | Высокая |
| 19. Взаимное излучение источника и преобразователя | Вт/(м ² ·К ⁴) | Определяет часть лучей, дошедших от более нагревшего тела к менее нагретому телу, находящимся в пространстве на расстоянии, поверхности которых параллельны и площади которых приблизительно соизмеримы | Высокая |
| 20. Тепловое излучение объекта на единицу времени | Дж/м ² *с | Влияет на эффективность процесса передачи энергии излучением в среде с заданной температурой | Высокая |
| 21. Работа по преобразованию в электрическую энергию | Дж | Определяет общую эффективность системы теплообеспечения после преобразования электричества в тепло | Высокая |
| 22. Работа по преобразованию в тепловую энергию | Дж | Определяет общую эффективность системы теплообеспечения | Высокая |
| 23. Полное количество теплоты | Дж | Определяет потенциал количества преобразуемой энергии, полученной в результате излучения нагретым телом | Высокая |
| 24. Мощность оборудования для потребления тепла | Вт | Определяет минимальную производительность системы энергообеспечения для соответствия нормам по отоплению помещений | Высокая |
| 25. Мощность оборудования, участвующего в процессе преобразования электричества в тепло | Вт | Определяет минимальную производительность системы преобразования электричества в тепло | Высокая |
| 26. Потребление тепла в единицу времени | кал*ч | Влияет на запас нагревшего жидкого теплоносителя внутри системы теплоснабжения | Средняя |
| 27. Потребление электричества в единицу времени | Вт*ч | Влияет на запас преобразованного электричества | Ниже средней |

Задающее воздействие (например, требуемая температура помещения, °С) средствами модуля «Интерфейс пользователя» преобразуется в значение параметра, характеризующего производительность системы (например, потребление тепла в единицу времени, кал*ч), и направляется на блок синхронизации, где формируется последовательность операций для обеспечения значений параметров системы энергообеспечения, соответствующих задающему воздействию. В начале последовательности производится сравнение значений параметров объекта управления с требуемыми значениями производительности. В случае выполнения равенства модуль управления обеспечит поддержание текущего состояния до следующего задающего воздействия. Кроме задающего воздействия на состояние равенства действуют внешние факторы, определяемые результатами измерений и оценки, синтезированными информационно-сенсорными модулями, и выраженные значениями параметров объекта управления и внешней среды.

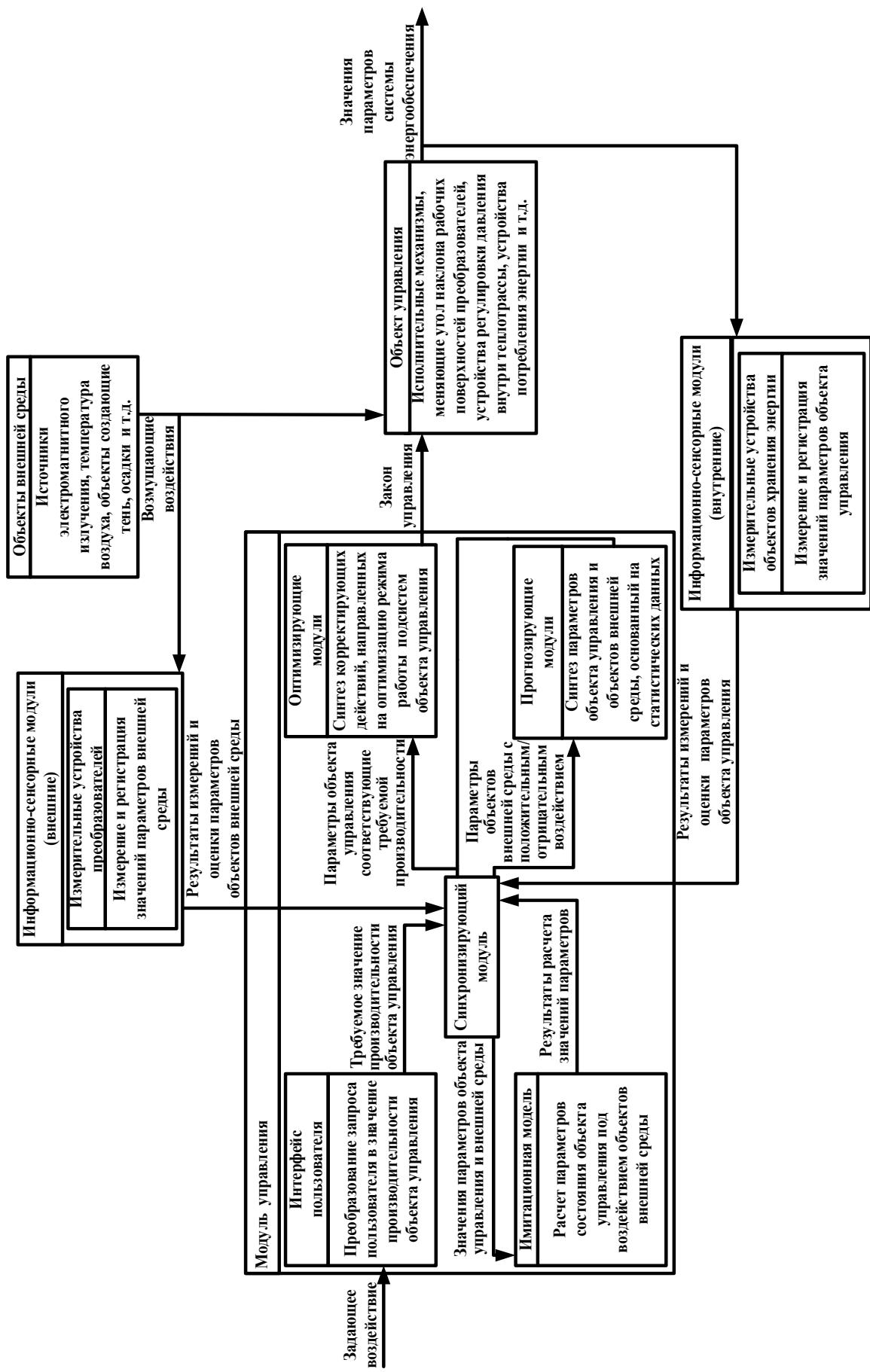


Рис. 1. Структура системы управления

Затем выполняется определение характера и степени влияния внешнего воздействия, и в случае высокой степени влияния задействуется имитационная модель, позволяющая рассчитать параметры состояния объекта управления под воздействием объектов внешней среды. Полученные результаты расчёта повторно проверяются на соответствие равенству, сохраняются в прогнозирующем модуле, после чего определяется следующая операция, связанная с оптимизирующими модулями. Входом для оптимизирующих модулей являются параметры объекта управления, соответствующие требуемой производительности, при этом они могут быть получены от прогнозирующего модуля без задействования дополнительных вычислительных мощностей для имитационной модели. В результате последовательности операций модуля управления синтезируется закон управления объектом управления, содержащим регулируемые объекты для обеспечения оптимального взаимодействия с объектами внешней среды.

Одной из наиболее важных задач по оптимизации работы системы энергообеспечения является минимизация затрат невосполняемой энергии, поэтому модуль управления содержит имитационную модель, направленную на расчёт параметров состояния объекта управления под воздействием внешних факторов. Назначение модели – это сокращение затрат дополнительных ресурсов за счёт сокращения дискретности регулировок подсистем объекта управления. Структурно-функциональная схема имитационной модели представлена на рис. 2.

Имитационная модель объединяет параметры объектов, участвующих в процессе преобразования электромагнитного излучения в тепло. Математическая модель позволяет вычислить количество потреблённой энергии, преобразованной от конкретного источника в определённых условиях среды распространения электромагнитного излучения. В условиях бесконечного количества регистрируемых параметров меняющихся внешних условий необходимо оптимизировать нагрузку вычислительной мощности имитационной модели. Поэтому необходима первичная оценка степени влияния внешнего воздействия на объект управления.

Одним из ключевых действующих факторов является действие источника излучения на производительность преобразователя. Наибольшее влияние оказывают источники с очень «хорошими» и очень «плохими» показателями. Оценка потенциала источника выполняется для разнородных источников (количество регистрируемых источников ограничено количеством измерительных устройств), при этом система распознаёт источник не как физический объект, а как плоскость в пространстве с определёнными регистрируемыми параметрами. Параметры отображают потенциал источника (температуру), доступность для передачи энергии излучением (угловой коэффициент) и чувствительность (способность к преобразованию излучения в электричество) к источнику рабочей поверхности преобразователя (длина волны излучения). Источником с наилучшим потенциалом является тот, который позволит нагреть жидкий теплоноситель. Поэтому он должен иметь температуру около 80° С, быть прямо направленным на центр преобразователя и быть на минимальном расстоянии (угловой коэффициент больше единицы), иметь длину волны излучения в пределах от 1450 до 1500 нм. Отклонение от этих параметров снижает оценку потенциала источника для жидкого теплоносителя, но может повысить её для преобразователей с полупроводниками. Таким образом данная система оценивания потенциала позволит сформировать рейтинг источников, параметры которых будут положительно влиять на объект управления. Определять «хорошие» и «плохие» источники предложено с применением нечёткой логики. Нечёткий логический вывод работает с функциями принадлежности значений параметров, отображающих высокий и низкий потенциал характеристик источников для гибридных преобразователей (на основе полупроводников и с жидким теплоносителем).

В табл. 2 приведена характеристика системы нечёткого логического вывода на основе алгоритма Мамдани для оценки потенциала источника теплового излучения.

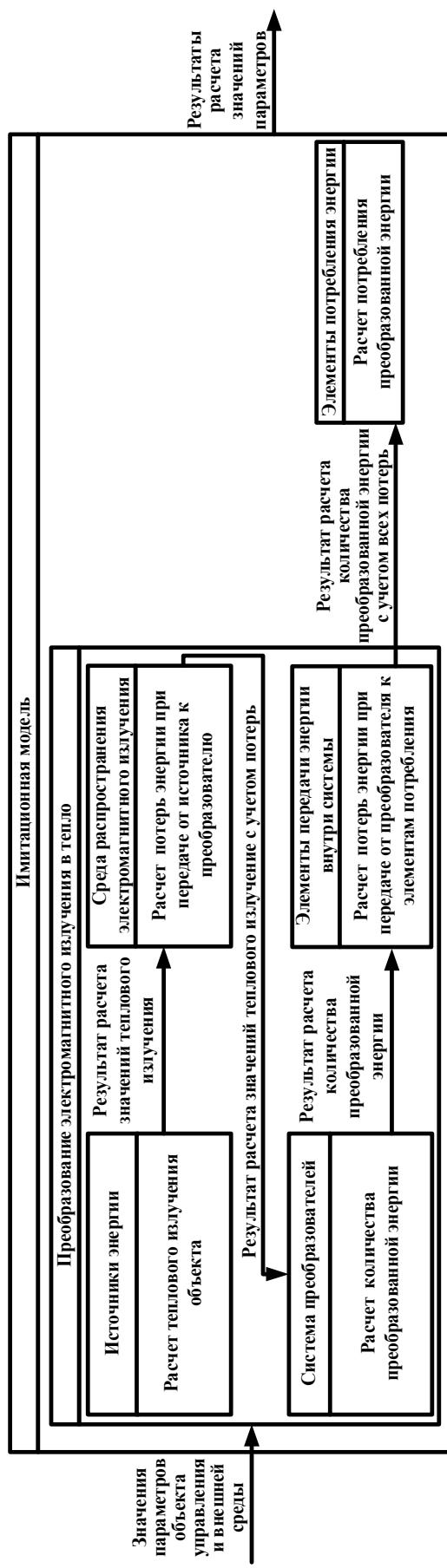


Рис. 2. Структурно-функциональная схема имитационной модели



Таблица 2

Система нечёткого логического вывода на основе алгоритма Мамдани
«Оценка потенциала источника теплового излучения»

| Общие характеристики | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| Метод расчёта | Количество входов | Количество выходов | Количество правил | Характеристика логических операторов |
| Алгоритм Мамдани | 3 | 1 | 75 | AndMethod=min OrMethod=max ImpMethod=min AggMethod=max DefuzzMethod=centroid |
| Характеристика выхода системы | | | | |
| Наименование выхода | Диапазон значений | Характеристики функций принадлежности MF _{выход} | | |
| Оценка потенциала источника | От 2 до 5 баллов | MF1='Низкий_потенциал':'trimf', [1.9 2 3] MF2='Средний_потенциал':'trimf', [3.6 4 4.2] MF3='Высокий_потенциал':'trimf', [4.5 4.99 5.1] MF4='Ниже_среднего_потенциал':'trimf', [2.9 3.1 3.7] MF5='Выше_среднего_потенциал':'trimf', [4.1 4.6 4.7] | | |
| Характеристики входов системы | | | | |
| Наименование выхода | Диапазон значений | Характеристики функций принадлежности MF _{вход} | | |
| Вход № 1: Температура источника | От 10 до 100° С | MF1='Низкая':'trimf', [1 10 20] MF2='Средняя':'trimf', [36.5 36.5 55] MF3='Высокая':'trimf', [70 100 150] MF4='Ниже_средней':'trimf', [18 20 40] MF5='Выше_средней':'trimf', [48 70 72] | | |
| Вход № 2: Угловой коэффициент | От -1 до 2 без единиц измерения | MF1='>0':'trapmf', [-1 -1 0 0.1] MF2='0-1':'trimf', [0 1 1.5] MF3='1<':'trimf', [1.2 2 3] | | |
| Вход № 3: Длина ИК-волны | От 0.4 до 3 мкм | MF1='Наивысший_потенциал_для_кремниевого_преобразователя':'gauss2mf',[0.2 1.1 0.03 1.1] MF2='Наивысший_потенциал_для_нагрева_жидкого_теплоносителя':'trapmf',[1.35 1.4 1.45 1.55] MF3='Наивысший_потенциал_для_композитного_преобразователя':'trapmf',[0.795 1.9 1.9 2] MF4='Излучение_тел_нагретых_более_100_градусов_цельсия':'trimf',[2.5 3 3] MF5='Слепая_зона':'trapmf',[1.95 1.98 2.5 2.55] | | |
| Синтаксис правил | | | | |
| Порядок входов | Номер функции принадлежности входа | Номер функции принадлежности выхода | Структура правила | |
| No 1 No 2 No 3 | MF _{вход} – от 1 до 5 | MF _{выход} – от 1 до 5 | 1MF _{вход} 2MF _{вход} 3MF _{вход} , MF _{выход} (вес правила): выполнение | |

Продолжение табл. 2

| Правила в индексном формате | | | | |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1) 1 1 1, 1 (1) : 1 | 18) 3 1 4, 1 (1) : 1 | 35) 2 2 5, 1 (1) : 1 | 52) 1 3 2, 4 (1) : 1 | 69) 4 3 4, 1 (1) : 1 |
| 2) 2 1 1, 1 (1) : 1 | 19) 4 1 4, 1 (1) : 1 | 36) 3 2 1, 5 (1) : 1 | 53) 1 3 3, 4 (1) : 1 | 70) 4 3 5, 1 (1) : 1 |
| 3) 3 1 1, 1 (1) : 1 | 20) 5 1 4, 1 (1) : 1 | 37) 3 2 2, 2 (1) : 1 | 54) 1 3 4, 1 (1) : 1 | 71) 5 3 1, 5 (1) : 1 |
| 4) 4 1 1, 1 (1) : 1 | 21) 1 1 5, 1 (1) : 1 | 38) 3 2 3, 5 (1) : 1 | 55) 1 3 5, 1 (1) : 1 | 72) 5 3 2, 3 (1) : 1 |
| 5) 5 1 1, 1 (1) : 1 | 22) 2 1 5, 1 (1) : 1 | 39) 3 2 4, 5 (1) : 1 | 56) 2 3 1, 2 (1) : 1 | 73) 5 3 3, 5 (1) : 1 |
| 6) 1 1 2, 1 (1) : 1 | 23) 3 1 5, 1 (1) : 1 | 40) 3 2 5, 1 (1) : 1 | 57) 2 3 2, 2 (1) : 1 | 74) 5 3 4, 1 (1) : 1 |
| 7) 2 1 2, 1 (1) : 1 | 24) 4 1 5, 1 (1) : 1 | 41) 4 2 1, 4 (1) : 1 | 58) 2 3 3, 5 (1) : 1 | 75) 5 3 5, 1 (1) : 1 |
| 8) 3 1 2, 1 (1) : 1 | 25) 5 1 5, 1 (1) : 1 | 42) 4 2 2, 1 (1) : 1 | 59) 2 3 4, 1 (1) : 1 | |
| 9) 4 1 2, 1 (1) : 1 | 26) 1 2 1, 4 (1) : 1 | 43) 4 2 3, 4 (1) : 1 | 60) 2 3 5, 1 (1) : 1 | |
| 10) 5 1 2, 1 (1) : 1 | 27) 1 2 2, 1 (1) : 1 | 44) 4 2 4, 1 (1) : 1 | 61) 3 3 1, 3 (1) : 1 | |
| 11) 1 1 3, 1 (1) : 1 | 28) 1 2 3, 4 (1) : 1 | 45) 4 2 5, 1 (1) : 1 | 62) 3 3 2, 3 (1) : 1 | |
| 12) 2 1 3, 1 (1) : 1 | 29) 1 2 4, 1 (1) : 1 | 46) 5 2 1, 5 (1) : 1 | 63) 3 3 3, 3 (1) : 1 | |
| 13) 3 1 3, 1 (1) : 1 | 30) 1 2 5, 1 (1) : 1 | 47) 5 2 2, 2 (1) : 1 | 64) 3 3 4, 3 (1) : 1 | |
| 14) 4 1 3, 1 (1) : 1 | 31) 2 2 1, 2 (1) : 1 | 48) 5 2 3, 2 (1) : 1 | 65) 3 3 5, 1 (1) : 1 | |
| 15) 5 1 3, 1 (1) : 1 | 32) 2 2 2, 4 (1) : 1 | 49) 5 2 4, 1 (1) : 1 | 66) 4 3 1, 4 (1) : 1 | |
| 16) 1 1 4, 1 (1) : 1 | 33) 2 2 3, 2 (1) : 1 | 50) 5 2 5, 1 (1) : 1 | 67) 4 3 2, 4 (1) : 1 | |
| 17) 2 1 4, 1 (1) : 1 | 34) 2 2 4, 1 (1) : 1 | 51) 1 3 1, 2 (1) : 1 | 68) 4 3 3, 4 (1) : 1 | |

На диапазоне значений «Температура источника» предложены функции принадлежности, определяющие границы температур, при которых возможен процесс передачи тепла разным типам преобразователей (хорошим источником будет тот, который имеет значение температуры, находящееся в промежутке между функциями принадлежности «средняя» и «высокая»). Диапазон значений углового коэффициента – между функциями принадлежности «0-1» (от нуля до единицы) и «1<» (больше единицы), т.к. при расчёте полного количества теплоты между источником и преобразователем данное значение эквивалентно КПД (чем больше значение, тем большее количество тепла будет передано преобразователю, т.е. направление излучения будет направлено в центр преобразователя при минимальном расстоянии). Диапазон значений «длина ИК-волны» эквивалентен диапазону чувствительности полупроводников (кремния и германия), кроме того, высшая оценка присваивается диапазону от 1450 до 1500 нм, т.к. при данных длинах волн лучше всего происходит нагрев жидкости.

Далее в табл. 3 приведены результаты тестирования системы нечёткого логического вывода. Для тестирования была выполнена экспертная оценка потенциала источников с заданными параметрами, оценки эксперта приняты за эталон.

Таблица 3
Тестирование системы оценки потенциала источника теплового излучения

| Примеры оценки потенциала источника | | | | | |
|--|----------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Темпера-тура | Угловой коэффициент | Длина ИК-волны | Оценка системы | Оценка эксперта | Отклонение |
| 75° C | 1.1 | 1.45 мкм | 4.2 балла | 4.4 балла | 4.76 % |
| 75° C | 0 | 1.45 мкм | 2.45 балла | 2.4 балла | 2.04 % |
| 34° C | 1.1 | 1.45 мкм | 3.51 балла | 3.5 балла | 0.28 % |
| 34° C | 1.1 | 0.9 мкм | 3.91 балла | 3.8 балла | 2.81 % |
| 48° C | 0.6 | 0.7 мкм | 4.1 балла | 4 балла | 2.43 % |
| 85° C | 2 | 1.45 мкм | 4.8 балла | 4.8 балла | 0 % |
| 85° C | 0 | 2.2 мкм | 2.41 балла | 2.2 балла | 4.56 % |

Реализация нечёткого алгоритма оценки результатов измерений параметров источника теплового излучения позволяет оптимизировать ресурсы, задействованные модулем управления, и является одной из начальных операций алгоритмического программного обеспечения, цель которого – обеспечение критерия эффективности: максимизация принимаемой энергии инфракрасного диапазона с учётом минимизации невозобновляемой энергии на корректировку работы элементов объекта управления. В дальнейшем будет разработан и представлен полный алгоритм работы системы управления гелиоустановками, направленный на повышение их эффективности. Предложенный подход позволит программными средствами повысить потенциал эффективности местных систем отопления, эксплуатируемых на территориях со сложной инфраструктурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2693968 Российской Федерации, МПК F24S 30/00. Адаптируемый к положению естественного источника инфракрасного излучения (солнца) держатель рабочей поверхности солнечного коллектора: № 2018101835: заявл. 17.01.2018: опубл. 08.07.2019 / Болдырев В. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». – 11 с.
2. Болдырев, В. В. Программа для СППР автоматического ориентирования рабочей поверхности солнечного коллектора на источник электромагнитного излучения // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611784. 2020.
3. Система автоматического наведения гелиоустановок с параболическими и параболоцилиндрическими концентриаторами на солнце / О. М. Саламов, И. А. Гаджигасанов, Ф. Ф. Мамедов, У. Ф. Самедова, Г. И. Исаков // Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология. – 2017. – № 10. – С. 102.
4. Степаненко, В. П. Выбор ресурсосберегающих источников и накопителей энергии в системах автономного энергоснабжения / В. П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 1. – С. 185-194.
5. Оценка целесообразности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения удалённых потребителей в климатических условиях севера Российской Федерации / М. А. Сурков, С. Г. Обухов, И. А. Плотников, Л. П. Сумарокова, М. М. Попов, С. А. Байдали // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 88.
6. Оценка прогнозируемого энергозамещения зданий с использованием систем солнечного тепло- и холодоснабжения / Т. В. Щукина, Д. М. Чудинов, В. В. Шичкин, И. А. Потехин, Р. А. Шепс // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2018. – № 1(4). – С. 54-61.
7. Boldyrev V. V., Gorkavyy M. A., Solovev D. B. Designing an adaptive software and hardware complex for converting solar energy / International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934085, 2019.
8. Dvoretskaia N., Bolshakova A. D., Mozharov A. M., Soboleva M. S., Kirilenko D. A., Baranova A. I., Mikhailovskii V. Y., Neplokh V. V., Morozova I. A., Fedorova V. V., Mukhinab I. S. GaN-based photovoltaic device integrated on si substrate. St. Petersburg Academic University, doi: j.solmat – 110282, 2019.
9. Falter C. P., Pitz-Paal R. A generic solar-thermochemical reactor model with internal heat diffusion for counter-flow solid heat exchange / Solar Energy, 2017.
10. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Petrukhin A. B., Oparina L. A., Martynov L. A. Analysis of conditions when designing energy saving heat pump systems for autonomous textile manufactures / Bulletin of the Volga State University of Technology, 2018.
11. Gorkavyy M. A., Gorkavyy A. I., Solovyev V. A. Conceptual model of intelligent system supporting situation evaluation, forecast and control at power grid companies. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings, 2017.
12. Gorkavyy M. A., Gudim A. S., Efimov A. Y., Solovev D. B. Algorithmization and principles of construction of information support of the automated module for energy outlays optimization of technological processes at robotized productions. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 2018.
13. Iwafune Y., Kanamori J., Sakakibara H. A comparison of the effects of energy management using heat pump water heaters and batteries in photovoltaic-installed houses, Energy Conversion and Management, 2017.
14. Protsishen A. A., Ulitskaya E. O. Development of the algorithm of management of the heating system and hot water supply using renewable energy sources. Automation of technological and business processes, 2017.
15. Rakhmatulin R., Kirpichnikova I. M. Analysis of the economic efficiency of the use of solar energy in the process of development of electrical and heat energy using the steam turbine in the territory of Russian Federation, Bulletin of Cherepovets State University, 2017.

Бузикаева А. В., Черный С. П., Суздорф В. И.
СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Бузикаева А. В., Черный С. П., Суздорф В. И.
A. V. Buzykaeva, S. P. Cherny, V. I. Susdorf

СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

SYNTHESIS OF ENERGY-SAVING SERIES-WOUND MOTOR CONTROL

Бузикаева Алина Валерьевна – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

Ms. Alina V. Buzikaeva – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Sergey P. Cherny – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

Суздорф Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Viktor I. Susdorf – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

Аннотация. Современное медицинское хирургическое электрифицированное оборудование, бытовые механизмы, строительный и другой ручной инструмент питаются от автономных накопителей электрической энергии, что дополнительно требует улучшения энергоэффективности работы. Электроприводы, которые являются основой функционирования подобных приборов, работают практически всё время в переходных режимах. Однако вопросам энергоэффективности динамических процессов таких приводов не уделяется достаточно внимания. Авторами предложен подход к синтезу энергосберегающего управления двигателем последовательного возбуждения на основе нелинейной коррекции параметров и оптимизации его движения с точки зрения минимизации потерь электрической энергии.

Summary. Modern medical surgical electrified equipment, household machinery, construction and other hand tools are powered by autonomous storage of electrical energy, which further requires improving the energy efficiency of work. Electric drives, which are the basis for the operation of such devices, work almost all the time in transient modes. However, the energy efficiency of dynamic processes of such drives is not given sufficient attention to. The authors propose an approach to the synthesis of energy-saving control of a series-wound motor based on nonlinear parameter correction and optimization of its motion in terms of minimizing electrical energy losses.

Ключевые слова: двигатель последовательного возбуждения, энергоэффективность, нелинейная коррекция, оптимальное управление, динамические режимы, моделирование, электрифицированный инструмент.

Key words: series-wound motor, energy efficiency, nonlinear correction, optimal control, dynamic modes, simulation, electrified tool.



Классический функционал, определяющий критерий оптимальности системы электропривода, требует определения ограничений на физически реализуемые параметры движения. Для двигателей постоянного тока такими традиционными ограничениями являются: темп нарастания тока через двигатель, максимально допустимый пусковой ток, максимально допустимое напряжение питания [15; 16]. Кроме ограничений на фазовые координаты двигателя, существенным ограничением для всего привода являются параметры устойчивого движения. Для определения условий устойчивости системы необходимо провести её структурный и параметрический анализ.

В работе [12] предложено ввести гибкую обратную связь в виде параллельного корректирующего звена на входе системы, имеющего передаточную функцию:

$$W_k(p) = \frac{A_k p T_{*k}}{1 + p T_{*k}},$$

где T_{*k} , A_k – постоянная времени звена в рабочей точке и статический коэффициент передачи звена соответственно.

После ряда преобразований автор получил выражение для частоты среза системы:

$$\omega_{*среза} = \frac{\sqrt{2} i_*}{A_k(R + k\omega_*)},$$

где $\omega_{*среза}$, i_* , $(R + k\omega_*)$ – соответственно частота среза, ток двигателя в рабочей точке, эквивалентное сопротивление цепи якоря двигателя.

Предлагаемое решение заключается во введении корректирующего сигнала путём использования функциональной зависимости производных тока двигателя от скорости. Поставленная цель достигается тем, что во время переходного процесса управляющий преобразователь формирует напряжение питания двигателя на уровне максимального значения на всё время нарастания тока двигателя, которое прямо пропорционально постоянной времени двигателя, а в дальнейшем формирует напряжение питания в соответствии с требуемым законом регулирования (например, по пропорционально-интегральному закону).

Интервал нарастания тока при ограничении на напряжение питания нелинейно зависит от скорости двигателя и его нагрузки на валу. Динамика работы двигателя зависит от постоянной времени двигателя [11]:

$$T_* = \frac{T_\Theta}{(1 + k \cdot \Omega)},$$

где T_Θ – электромагнитная постоянная обмоток двигателя (зависит только от индуктивности и активного сопротивления обмоток двигателя), с; Ω – скорость вращения вала, рад/с; k – коэффициент, учитывающий коэффициент ЭДС якоря и аппроксимацию кривой намагничивания.

Таким образом, блок динамической коррекции формирует на входе системы дополнительный сигнал $U_{\text{корр}} = K_{\text{корр}} T_\Theta / (1 + k \cdot \Omega)$, где $K_{\text{корр}}$ – коэффициент передачи корректирующего звена, определяющий темп изменения тока двигателя и стабилизацию частоты среза системы.

Выбирая между требуемыми значениями быстродействия и кратностью пускового тока двигателя, устанавливают требуемую полосу пропускания системы, удовлетворяющую критерию устойчивости во всём диапазоне регулирования скорости электродвигателя.

Структурная схема электропривода с динамической коррекцией движения приведена на рис. 2.

Поскольку предложенная коррекция обеспечивает независимость времени t_p от скорости двигателя, то управление будет оптимальным по критерию минимума потерь во всём диапазоне регулирования.

Для проверки приведённых соображений в настоящей работе проведён компьютерный эксперимент с целью установления влияния на сделанные выводы наличия статического преобразователя на входе двигателя и, соответственно, дискретности управления.

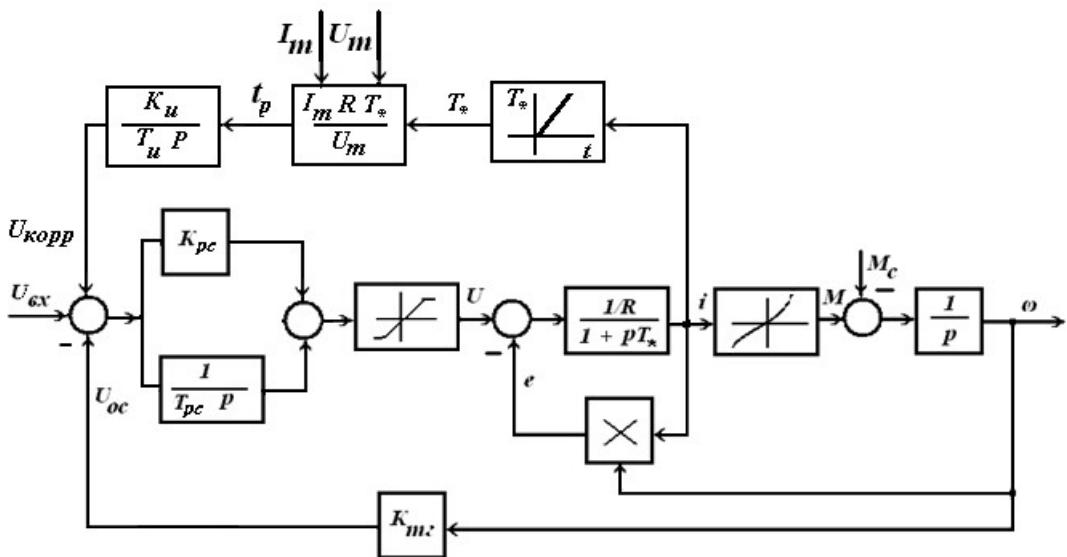


Рис. 2. Структурная схема электропривода

3. Анализ результатов реализации оптимального закона управления ДПВ

Полученные выражения (2) и (3) позволяют упростить математическое описание системы, состоящей из ДПВ и статического преобразователя (с широтно-импульсной модуляцией), и использовать известные пакеты моделирования, например MatLab Simulink [17; 18; 19].

Согласно представленным положениям, величину постоянной времени можно определить двумя способами: прямым расчётом или измерением темпа спадания тока самоиндукции в момент, когда проводящий вентиль выключен и двигатель отключён от сети. В разработанной модели применяется второй способ. Для этой цели используется блок обнуляемого дискретного интегратора. На рис. 3 представлен блок измерения темпа спадания ЭДС двигателя последовательного возбуждения.

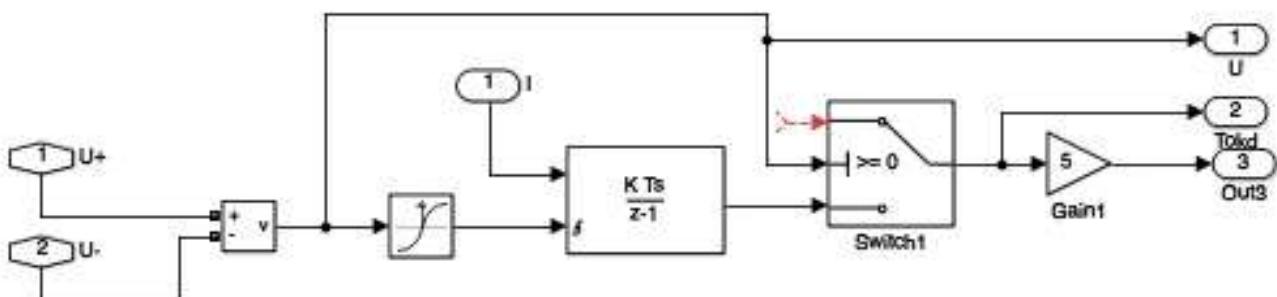


Рис. 3. Блок измерения темпа спадания ЭДС ДПВ

На рис. 4 показана разработанная схема модели электропривода. Задающий сигнал *Signal Builder* через блок ограничения *Saturation Dynamic* задаёт ток двигателя. Максимальное значение ± 10 В соответствует предельному значению тока двигателя.

На рис. 5 приведены кривые переходных процессов при скачке входного воздействия и различных значениях установившейся скорости. При частоте коммутации преобразователя, равной 100 Гц, время переходного процесса легко определять по количеству пульсов тока (один пульс соответствует 0,01 с). Из графиков видно, что зависимость времени переходного процесса от тока весьма существенно зависит от скорости двигателя – для двигателя с параметрами серии КОО 561 увеличилась практически в 8 раз при разгоне на скорость 30 рад/с и на 1200 рад/с.



$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \frac{\cos 2\pi i}{N} x + \sum_{i=1}^n b_i \sin \frac{2\pi i}{N} x, \quad (4)$$

где a_0, a_i, b_i – неизвестные параметры; n – число гармоник; N – объём выборки.

Для нахождения параметров уравнений (3) и (4) применяется классический метод наименьших квадратов.

Рассмотрим использование нейронных сетей для решения поставленной задачи.

Решения математических задач с помощью нейронных сетей, как правило, сталкиваются с проблемой выбора типа и структуры нейронной сети.

Задачи аппроксимации экспериментальных данных можно решать с помощью искусственных нейронных сетей следующих типов: многослойного персептрана, сетей с радиально-базисными функциями, вероятностных сетей, обобщённо-регрессионных сетей [13-16].

Рассмотрим решение данной задачи с помощью радиально-базисной нейронной сети (RBF).

При решении задач с помощью нейронных сетей следует учитывать, что обрабатываемые данные должны находиться в строго определённом диапазоне значений: чаще всего это диапазоны $[0;1]$ или $[-1;1]$. Выполним предобработку данных по формуле

$$y'_i = \frac{y_i - My}{\sqrt{Dy}}, \quad (5)$$

где y'_i – новая переменная; $My = \frac{1}{n} \sum_i y_i$ – выборочная оценка математического ожидания;

$$Dy = \frac{1}{n-1} \sum_x (y_i - My)^2 \text{ – выборочная оценка дисперсии.}$$

Суть решения задачи состоит в обучении нейронной сети. Смысл обучения состоит в следующем. Имеются значения функции в заданных точках, система базисных функций, а также система векторов коэффициентов. Необходимо расставить весовые коэффициенты в базисных функциях таким образом, чтобы их комбинация давала зависимость, наиболее полно аппроксимирующую исходную выборку.

Нейронная сеть типа RBF имеет три слоя: входной, выходной и промежуточный. При этом промежуточный слой состоит из радиальных элементов, каждый из которых соответствует функции вида

$$\phi(s) = \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ – радиус влияния каждой из набора базисных функций.

Выбор трёхслойной архитектуры нейронной сети обусловлен нелинейностью как входных данных, так и базисных функций промежуточного слоя – при таких условиях введение дополнительных слоёв не имеет необходимости.

Для комбинации выходов скрытых радиальных элементов достаточно взять их линейную комбинацию.

Для решения поставленной задачи разработана RBF-нейронная сеть с допустимой среднеквадратической ошибкой $E(\omega) = 0,2$ и параметром влияния, равным 10. Значение последнего следует устанавливать тем большим, чем больший диапазон входных значений должен быть использован. Входными элементами приняты x_i , а выходными – y'_i .

Для создания и моделирования нейронной сети использован пакет Neural Network Toolbox (NNT) системы Matlab. Создание и обучение нейронной сети выполняется функцией $\text{net} = \text{newtb}(x; y'; 0.2; 10)$. Моделирование нейронной сети выполняется помощью функции $y' = \text{sim}(\text{net}, x)$.

Обратное масштабирование данных (ранее они были масштабированы функцией (5)) выполняется с помощью функции

$$yn_i = yn'_i \sqrt{Dy} + My.$$

Сравнительный анализ и выводы

Для оценки качества аппроксимации различными методами воспользуемся коэффициентом детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - My)^2}, \quad (6)$$

где y_i – исходные значения; \hat{y}_i – выровненные значения; My – выборочное среднее исходных данных.

Качество аппроксимации тем выше, чем коэффициент (6) ближе к значению 1.

В табл. 1 приведены значения коэффициента R^2 для рассмотренных методов аппроксимации.

Таблица 1

Результаты расчётов

| Метод аппроксимации | Значение коэффициента детерминации |
|---|------------------------------------|
| Аппроксимация периодической функцией | 0,6751 |
| Аппроксимация рядом Фурье | 0,7865 |
| Аппроксимация с использованием нейронной сети | 0,9816 |

По приведённым данным можно сделать вывод о том, что применение нейронных сетей даёт приемлемый (достаточно высокий) уровень аппроксимации исходных наблюдаемых данных, прежде всего благодаря наличию в RBF-нейросетях скрытого слоя нейронов с нелинейными радиально-базисными функциями активации, которые позволяют отслеживать малейшие изменения в уровнях исследуемого временного ряда. При использовании нейронной сети получили $R^2 = 0,9816$. Это случай, когда реальный выход нейросети и желаемый выход (что по смыслу совпадает с оценочными и реальными значениями) практически совпадают. Применением традиционных методов практически невозможно достичь такого высокого значения коэффициента детерминации.

Исследование показало, что использование нейронной сети позволяет достичь наилучшего качества аппроксимации в рассматриваемой задаче.

Таким образом, применение алгоритма на основе нейронных сетей позволяет достичь наибольшей эффективности алгоритма работы преобразователя энергии перепада температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Челухин, В. А. Ёмкостные электромеханические преобразователи тепла / В. А. Челухин // Электромеханика. – 1985. – № 5. – С. 90-94.
2. Челухин, В. А. Электротепловой преобразователь низкопотенциальной энергии перепада температур / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электротехника. Вестник ТОГУ. – 2014. – № 4(35). – С. 93-98.
3. Челухин, В. А. Оценка эффективности использования перепада температур день-ночь для целей энергетики / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон. М. С. Кружаев // Промышленная энергетика. – 2018. – № 6. – С. 45-49.
4. Патент № 2526535 Российской Федерации, МПК H02M 3/04(2006.01). Преобразователь энергии перепада температур с жидкокометаллическим электродом: № 2012152676: заявлено 06.12.2012: опубликовано 27.08.2014 / Челухин В. А., Челухин И. В.; заявитель ФГБОУВПО «КнАГТУ». – 4 с.
5. Патент № 2513539 Российской Федерации, МПК H02M 3/04(2006.01). Преобразователь энергии перепада температур с электродом из жидкого диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости: № 2012152673: заявлено 06.12.2012: опубликовано 20.04.2014 / Челухин В. А., Челухин И. В.; заявитель ФГБОУВПО «КнАГТУ». – 4 с.

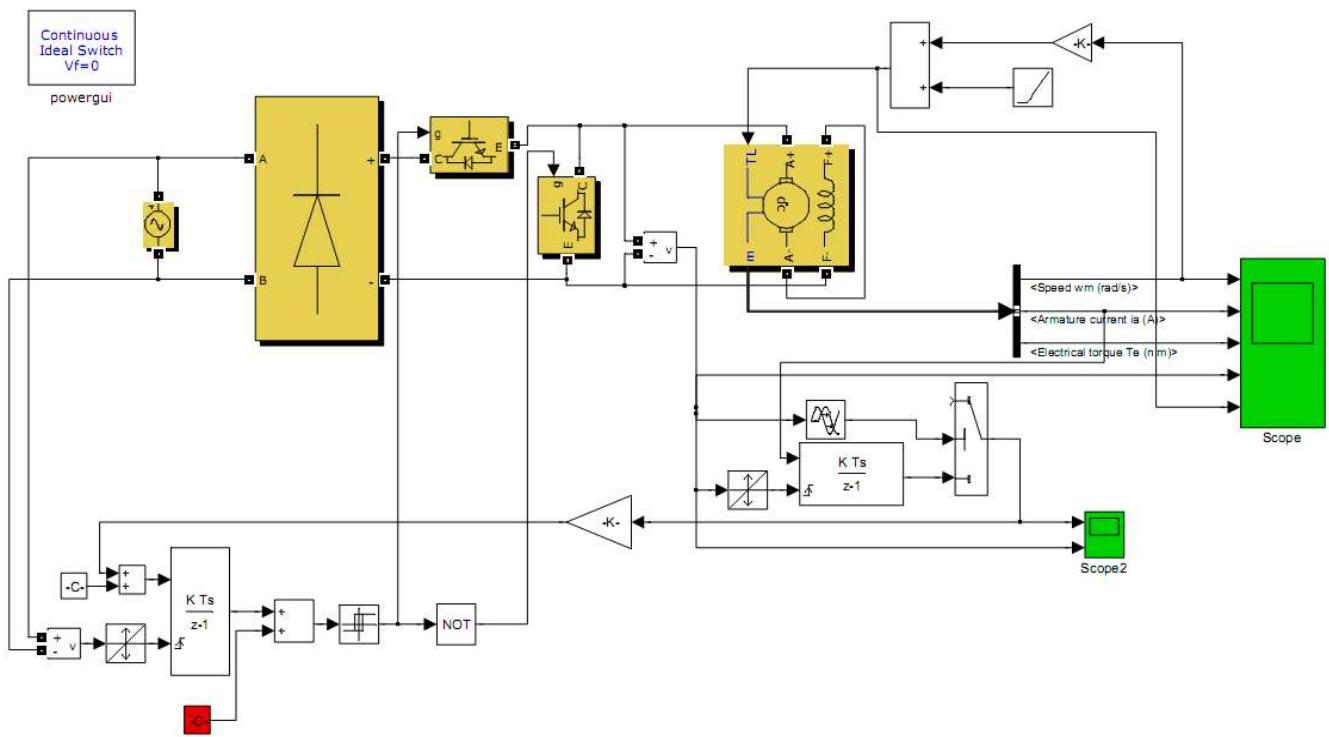


Рис. 4. Схема модели управления двигателем последовательного возбуждения

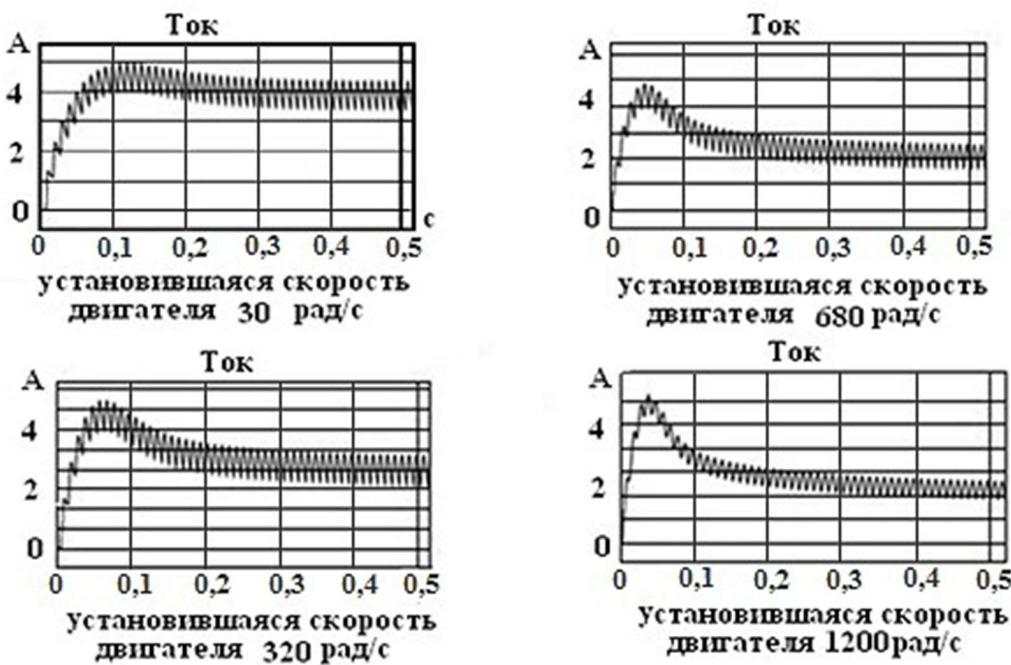


Рис. 5. Кривые переходного процесса по току двигателя при отработке ступеньки управляющего воздействия

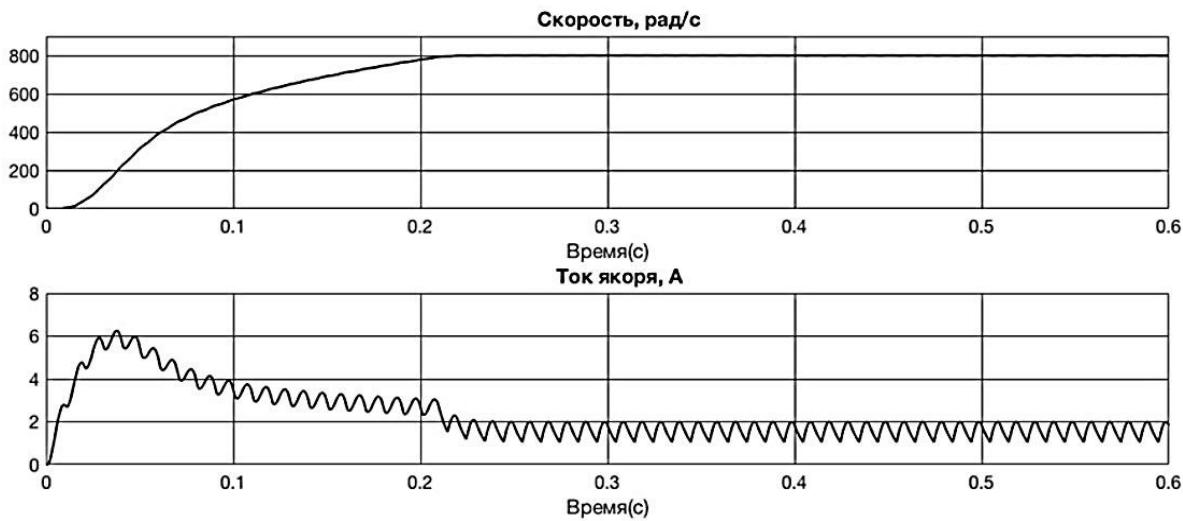


Рис. 6. Результаты моделирования метода управления ДПВ.
Переходные процессы при пуске ДПВ на скорость 800 рад/с

На рис. 6 и 7 представлены результаты моделирования системы управления ДПВ. Анализ полученных результатов фиксирует наличие четырёх пульсов тока двигателя при отработке различных приращений скорости (соответствует 0,04 с). Таким образом, можно констатировать, что предложенный способ коррекции позволяет обеспечить независимость динамики электромагнитных процессов от скорости двигателя во всём диапазоне регулирования.

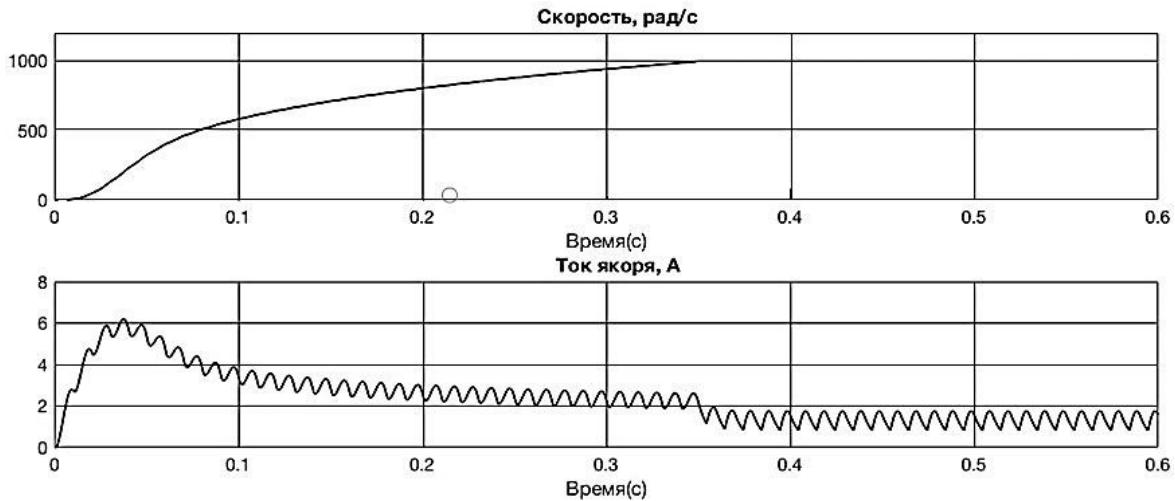


Рис. 7. Результаты моделирования метода управления ДПВ.
Переходные процессы при пуске ДПВ на скорость 1000 рад/с

Введённый в закон управления корректирующий сигнал стабилизирует динамические свойства системы, скорость нарастания тока зависит только от величины токоограничения. Полученная коррекция обеспечивает оптимальное управление приводом для всех режимов работы.

На рисунках 8, 9 и 10 показаны результаты практического исследования. При анализе эти результаты исследования совпадают с теоретическими. Легко увидеть, что для всех значений скорости время реакции по току двигателя одинаково (на рисунках чётко просматривается по 2 пульса тока, токоограничение установлено на уровне 2 А).

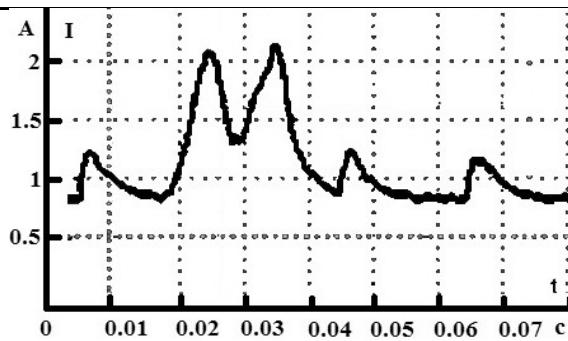


Рис. 8. Скачок управляющего воздействия
($\omega_{\text{нач}} = 600$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 800$ рад/с)

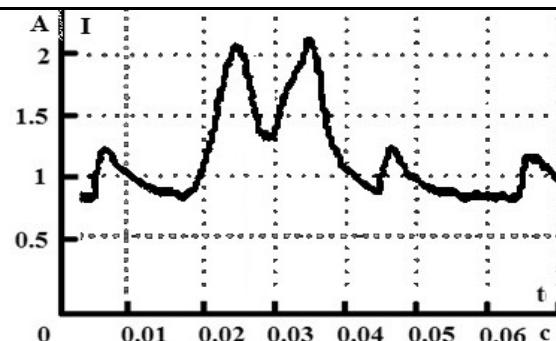


Рис. 9. Скачок управляющего воздействия
($\omega_{\text{нач}} = 400$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 600$ рад/с)

Из сравнения экспериментальных и расчётных кривых динамических электромагнитных процессов в электроприводе видно, что предложенный способ коррекции динамики электропривода эффективно стабилизирует время реакции системы.

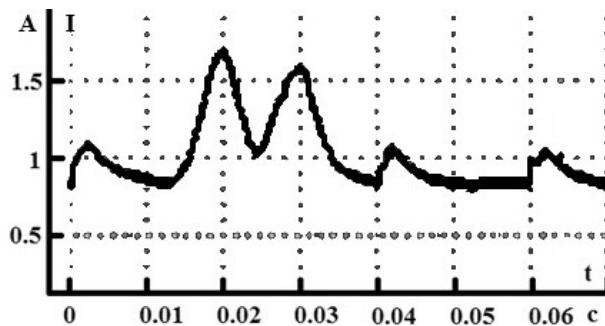


Рис. 10. Скачок управляющего воздействия
($\omega_{\text{нач}} = 200$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 400$ рад/с)

На рис. 11 приведены экспериментально снятые зависимости потреблённой энергии при пуске электропривода, а на рис. 12 – при переменной нагрузке на валу двигателя (режим перфоратора).

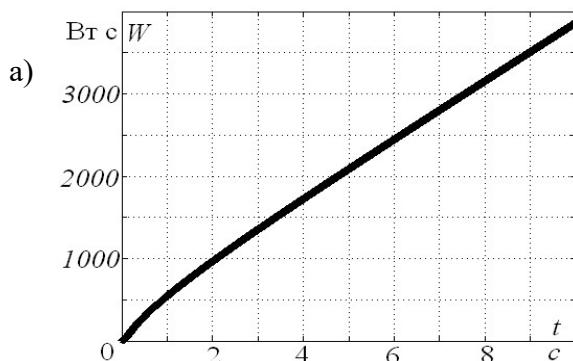
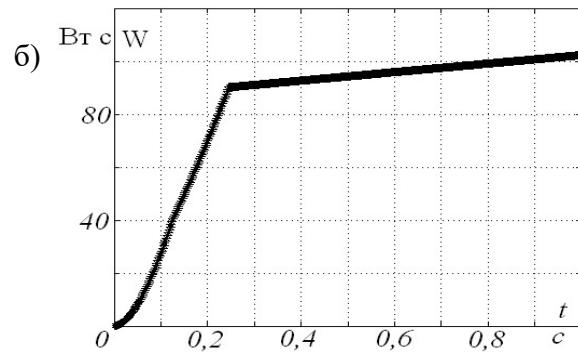


Рис. 11. Кривые потребляемой энергии при пуске на скорость $\omega_{\text{уст}} = 400$ рад/с:
а – прямой пуск; б – оптимальная траектория



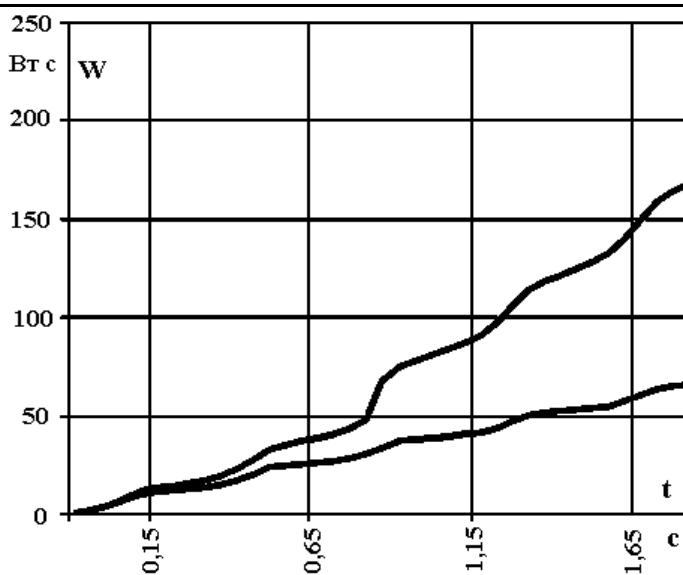


Рис. 12. Характеристики потребления электрической энергии для системы электропривода перфоратора с ПИ-регулятором (верхняя кривая) и потребляемой электрической энергии для разработанной системы (нижняя кривая)

Анализ полученных экспериментальных данных подтвердил, что разработанные способы и устройства управления снижают энергопотребление в рабочем диапазоне нагрузок. При помощи эксперимента подтверждено, что разработанные способы и устройства управления обеспечивают снижение энергопотребления при работе в рабочем диапазоне нагрузок, потребление энергии разработанной системой управления уменьшилось в 2,4 раза за рассматриваемый период работы, а в режиме пуска на скорость двигателя 300 рад/с – уменьшилось в 36 раз.

Заключение

Предложен способ энергосберегающего управления ДПВ с нелинейной коррекцией движения, обеспечивающий устойчивость системы при заданных ограничениях на координаты движения по оптимальному закону управления в диапазоне регулирования скорости двигателя, а также независимую от скорости двигателя длительность переходных процессов по току двигателя при соблюдении ограничений на координаты движения.

Экспериментально подтверждено, что разработанный способ управления обеспечивает снижение энергопотребления при работе в рабочем диапазоне нагрузок, потребление энергии разработанной системой управления уменьшилось в 2,4 раза за рассматриваемый период работы, а в режиме пуска на скорость двигателя 300 рад/с – уменьшилось в 36 раз (для испытуемого электродвигателя серии КОО-561 с потребляемой номинальной мощностью 300 Вт).

ЛИТЕРАТУРА

1. Obruch, I. V. Closed-loop systems of series motor drive control based on neural networks / I. V. Obruch, Yu. N. Kutowoy // Neural networks, fuzzy logic and genetic algorithms in electrical machinery, Kharkov, 2004, pp. 488-490.
2. Myrtellari, A. Optimal Control of DC Motor Using Performance Index of Energy / A. Myrtellari, P. Marango, M. Gjonaj // American Journal of Engineering Research, vol. 5, Issue – 11, pp. 257-261.
3. Mehta, S. Nonlinear Control of a Series DC Motor: Theory and Experiment / S. Mehta, J. Chiasson // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 1, February 1998, pp. 134-141.
4. Maghfiroh, H. Optimal Energy Control of DC Motor Speed Control: Comparative Study / H. Maghfiroh, Ah. Ataka, O. Wahyunggoro, A. I. Cahyadi // 2013 International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications, pp. 89-93.



5. Sahoo, S. Optimal Speed Control of DC Motor using Linear Quadratic Regulator and Model Predictive Control / S. Sahoo, B. Subudhi, G. Panda // 978-1-4678-6503-1/15/\$31.00 © 2015 IEEE.
6. Chlasson, J. Nonlinear Differential-Geometric Techniques for Control of a Series DC Motor // IEEE Transactions on Control Systems Technology. Vol. 2, no. 1, pp. 35-42.
7. Aung, M. T. Power-efficient series motor control / M. T. Aung, V. I. Susdorf // Kuzbass State Technical University Reporter. 2017. No. 5 (123). – Pp. 137-145.
8. Susdorf, V. I. Dynamic correction of series motor drive / M. T. Aung, V. I. Susdorf // Magnitogorsk State Technical University Reporter. 2018. No. 1. – Pp. 54-60.
9. Susdorf, V. I. Functional control synthesis in single-phase LP drives / Yu. N. Dementyev, A. S. Meshkov, M. T. Aung, V. I. Susdorf // South Ural State University Reporter. «ENERGY» Series. Vol. 18. No. 3. – Pp. 98-105.
10. Susdorf, V. I. Design of series-wound motor control / V. I. Susdorf, M. T. Aung, A. S. Meshkov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Electronic resource, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076346.
11. Susdorf, V. I. Energy saving control of series motor / Yu. N. Dementyev, K. N. Negodin, M. T. Aung, V. I. Susdorf // In collection: MATEC Web of Conferences 4. 4th International Youth Forum «Smart Grids 2016», 2016. DOI: 10.1051/matecconf/20179101045.
12. Susdorf, V. I. Functional Control Synthesis of Single-Phase Low Power Motor Drives / Yu. N. Dementyev, V. I. Susdorf, N. V. Koyain, A. S. Meshkov // Energy Web and Information Technologies Energy Web and Information Technologies ew 18, e 7, 2018. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.12-9-2018.155861>.
13. Susdorf, V. I. Microcontroller Control of Series Motor / V. I. Susdorf, M. T. Aung // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018. DOI:10.1109/FarEastCon.2018.8602556.
14. Susdorf, V. I. Power-efficient series motor control // 4th International Forum of Young Scientists and Postgraduates, Tomsk, TPU, 10.10.2016.
15. Aung, M. T. Power-efficient series motor control // Scientific and Technical Work of Postgraduates and Students: Materials of the 47th Scientific and Technical Conference Among Students and Postgraduates, Komsomolsk-on-Amur, April 10-21, 2017 / edit. board: E. A. Dmitriyeva (publ. editor) and others. – Komsomolsk-on-Amur: KnASTU, 2017. – Pp. 753-758.
16. Aung, M. T. Series motor control method // Improvement of reliability and power efficiency of electrotechnical systems and complexes: Interacademic collection of scientific works (with international participation) / publ. editor: V. A. Shabanov, edit. board: S. G. Konesev, V. M. Sapelnikov, M. I. Khakimyanov, P. A. Khlyupin, R. T. Kha ziyeva. – Ufa: publ. by Energodiagnostika, 2018. – Pp. 41-44.
17. Adnan, A. Analysis of Speed Control of Series DC Motor Using Diverter and observation of Speed Saturation // 2nd Int. Conf. on Electrical Engineers and information and Communication Technology (ICEECT), 2015.
18. Соловьев, В. А. Разработка и исследование методики синтеза нечёткого идентификатора по прямым показателям качества / В. А. Соловьев, В. С. Попова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1(33). – С. 20-27.

Власьевский С. В., Лыткина Е. М., Федоренко А. И.

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ МОСТОВЫХ
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ИХ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Власьевский С. В., Лыткина Е. М., Федоренко А. И.

S. V. Vlasevsky, E. M. Lytkina, A. I. Fedorenko

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ МОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ИХ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

CONTROL AUTOMATIC DEVICE OF THYRISTORS OF BRIDGE RECTIFIERS WITH OUTPUT VOLTAGE STABILIZATION FOR OBJECTS OF TRANSPORT VEHICLES

Власьевский Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, г. Хабаровск).

Mr. Stanislav V. Vlasevsky – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of «Electrotechnics, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk).

Лыткина Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Эксплуатация железных дорог» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, г. Красноярск).

Mrs. Ekaterina M. Lytkina – PhD in Engineering, Head of the Department of «Rail operation», Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State Transport University (Russia, Krasnoyarsk).

Федоренко Анна Ивановна – аспирант кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Mrs. Anna I. Fedorenko – Post-Graduate Student, Department of «Electrical engineering, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk).

Аннотация. Статья посвящена разработке устройства автоматического управления тиристорами мостовых выпрямителей со стабилизацией их выходного напряжения, применяемых в транспортной технике. Рассмотрены требования, предъявляемые к работе стабилизованных источников питания постоянного тока и их системам управления. Изложены принципы построения стабилизированного источника питания постоянного тока и его системы управления. В качестве примера рассмотрены принцип построения и работа устройства системы автоматического управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя трёхфазного переменного тока, служащего источником питания постоянного тока для электродвигателей беспилотного летательного аппарата (БЛА). Показана диаграмма процессов работы устройства для управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя. Разработано устройство для управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя, позволяющее осуществить автоматическую стабилизацию выходного напряжения выпрямителя в условиях широкого диапазона изменения величин напряжения и частоты синхронного генератора на входе выпрямителя. При изменении линейного напряжения синхронного генератора с 40 до 80 В и частоты переменного тока с 400 до 800 Гц стабилизация выходного напряжения выпрямителя на уровне 50 В осуществляется с отклонением в сторону увеличения до 54 В и в сторону уменьшения до 47 В, что составляет 7 % отклонения при увеличении и 6 % при уменьшении.

Summary. The article focuses on design of automatic control device of thyristors of bridge rectifiers with output voltage stabilization used in transport vehicles. The requirements of standards for regulated direct current power supply operation and their control systems were considered. It outlines the principles of construction of regulated direct current power supply and its control system. As a case in point construction and operation of device of automatic control system of thyristors of controlled 3-phase alternating current bridge rectifier used as direct current power source for electric motor of unmanned aerial vehicle (UAV) were considered. The diagram of working process of control device of thyristors of 3-phase bridge rectifier was shown. The device for control device of thyristors of 3-phase bridge rectifiers permitting automatic output voltage stabilization of rectifier under conditions of wide range changing of voltage and frequency of synchronous generator was designed. When changing line voltage of synchronous generator from 40 to 80 V and alternating current frequency from 400 to 800 Hz stabilization of output voltage of rectifier is around 50 V realizes with deviation in an upward direction to 54 V and in a downward direction to 47 V that represents 7 % deviation with increasing and 6 % with decreasing.



Ключевые слова: мостовой выпрямитель трёхфазного тока, тиристор, транзистор, устройство управления, система автоматического управления, стабилизация напряжения.

Key words: 3-phase current bridge rectifier, thyristor, transistor, control device, automatic control system, voltage stabilization.

УДК 629.423

Введение

В бортовом электрооборудовании различных объектов транспортной техники имеются многочисленные источники питания постоянного тока. Так, на электроподвижном составе переменного тока электрифицированных железных дорог в состав бортового электрооборудования входит источник электрической энергии постоянного тока напряжением 50 В, который питает цепи управления электрических и электромеханических аппаратов, освещения, сигнализации, ограждения локомотива бортовыми огнями и различных вспомогательных устройств [1; 2]. На воздушных летательных аппаратах имеется бортовая система электроснабжения постоянного тока, предназначенная для питания электрических цепей и устройств аппаратуры управления, регулирования и защиты от внешних воздействий [3]. Подобная бортовая система электроснабжения имеется и на беспилотных летательных аппаратах (БЛА), которые в настоящее время бурно развиваются и применяются как в военной технике, так и во многих отраслях народного хозяйства [4].

Для таких объектов транспортной техники необходимо создавать источники питания постоянного тока, которые прежде всего требуют стабилизации напряжения на их выходе [5]. Стабилизация напряжения источника питания – это способность электрической схемы источника автоматически поддерживать заданное значение величины его выходного напряжения с определённой точностью при изменяющихся возмущающихся воздействиях. Основными возмущающимися воздействиями обычно являются изменения входного напряжения источника и его выходного тока нагрузки. Стабилизация выходного напряжения источников питания продиктована требованиями по выполнению устойчивого и точного функционирования большинства объектов транспортной техники и влиянием на них факторов внешнего воздействия при их эксплуатации.

Для объектов указанной выше транспортной техники чаще всего требуются стабилизованные источники питания постоянного тока с уровнем мощности в диапазоне от 1 до 50 кВт [6]. Источники такой мощности лучше всего создавать на основе преобразования переменного тока в постоянный, т.е. путём применения выпрямительных устройств [7; 8; 9]. С точки зрения получения более высокой энергоэффективности источник питания лучше всего выполнить на базе трёхфазного мостового управляемого выпрямителя на основе тиристоров [10; 11; 12]. Система управления тиристорами такого выпрямителя может быть построена с помощью транзисторов [13].

Требования, предъявляемые к работе стабилизованных источников питания постоянного тока и их системам управления. К работе источников питания постоянного тока со стабилизацией их выходного напряжения предъявляются следующие требования: быстродействие и точность стабилизации выходного напряжения.

Быстродействие источника питания со стабилизованным напряжением – это есть скорость его реакции (отклика) на действие возмущения. Наиболее распространённым возмущением для источника является изменение его входного напряжения. Быстродействие тем выше, чем быстрее стабилизированный источник отреагирует на изменение входного напряжения. Быстродействие источника определяют величиной времени, за которое источник способен изменить выходное напряжение на величину в один вольт (с/В).

Точность стабилизации выходного напряжения – это есть предельно допустимое отклонение выходного напряжения в процентах от номинальной величины. Так, например, согласно ГОСТ 32144-2013 на общепромышленные сети переменного тока предельно допустимое отклонение выходного напряжения источника переменного тока от номинального значения составляет 10 %. Для большинства источников постоянного тока точность стабилизации колеблется от 1 до 5 %.

К построению системы управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя трёхфазного или однофазного тока предъявляются следующие требования, определяемые свойствами тиристоров:

1. обеспечить надёжное включение тиристоров в схеме выпрямителя, основанное на подаче в их цепь управления таких величин тока и напряжения управления, которые соответствуют входным характеристикам применяемых тиристоров;
2. обеспечить синхронизацию подачи импульсов управления на тиристоры в соответствующую фазу трёхфазного напряжения источника переменного тока;
3. обеспечить регулирование фазового угла (сдвиг по фазе) импульсов управления на каждый тиристор относительно его анодного напряжения в соответствии с той фазой (A, B или C), которая подаётся на тиристор;
4. обеспечить слежение за изменением величины входного напряжения выпрямителя с целью коррекции величины регулируемого фазового угла импульсов управления тиристорами для обеспечения стабилизации величины выходного напряжения выпрямителя.

Принципы построения стабилизированного источника питания постоянного тока и его системы управления. Исходя из требований к работе источника питания постоянного тока можно предложить следующую структурную схему его построения (см. рис. 1).

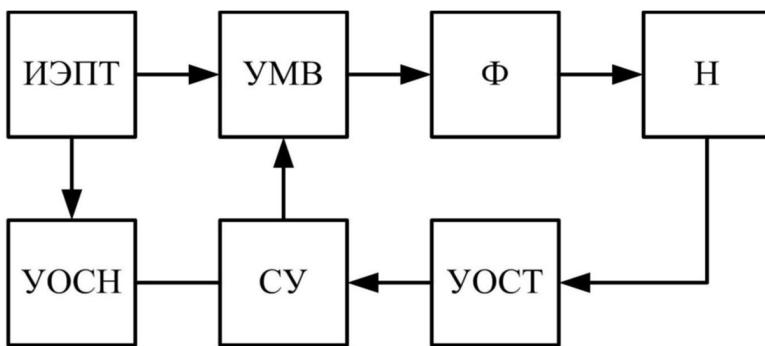


Рис. 1. Структурная схема источника питания постоянного тока:

ИЭПТ – источник электроэнергии переменного тока; УМВ – управляемый мостовой выпрямитель;

УОСН – устройство обратной связи по напряжению; СУ – система управления тиристорами выпрямителя;

УОСТ – устройство обратной связи по току нагрузки

Исходя из требований к построению системы управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя (УМВ) трёхфазного или однофазного тока можно построить следующую функциональную схему системы автоматического управления (САУ) тиристорами УМВ (см. рис. 2).

В качестве примера рассмотрим принцип построения и работу устройства системы автоматического управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя трёхфазного переменного тока, служащего источником питания постоянного тока для электродвигателей БЛА. В системе электроснабжения БЛА имеется основной источник энергии переменного тока в виде генератора трёхфазного тока, который приводится во вращение непосредственно от вала двигателя внутреннего сгорания (ДВС). ДВС является основным источником создания механического движения БЛА при его подъёме, полёте над местностью и спуске на землю. В конце подъёма, при полёте и в начале спуска кроме основных винтов аппарата, вращающихся от ДВС, в работу должны включаться и вспомогательные винты, расположенные по краям БЛА и предназначенные для стабилизации, маневрирования и изменения направления движения аппарата. Эти вспомогательные винты приводятся во вращение электрическими двигателями постоянного тока, для питания которых и предназначен источник стабилизированного напряжения постоянного тока. Работа этих двигателей происходит по определённой программе управления, задаваемой оператором. Особенностью работы БЛА

является то, что источник питания постоянного тока, составляющий основу системы электроснабжения аппарата, включается в работу после подъёма БЛА на определённую небольшую высоту после старта только тогда, когда ДВС, а следовательно, и генератор переменного тока достигнут определённой величины частоты вращения их валов. Поэтому начиная от старта аппарата и до этого момента подъёма, а также при спуске с целью посадки аппарата на землю вся система электроснабжения аппарата питается от аккумуляторных батарей. В момент достижения необходимой частоты вращения (об/мин) ДВС и, соответственно, генератора должен подключиться источник питания постоянного тока, который заменит аккумуляторные батареи, переведя их в режим заряда от этого источника. При спуске аппарата всё произойдёт наоборот, т.е. источник отключится, а батареи включатся. Следовательно, источник питания и аккумуляторные батареи своими положительными и отрицательными выводами (клещами) должны быть подключены напрямую друг к другу (по схеме буфера). Одним из основных требований к источнику питания является то, что начиная от его подключения к схеме питания двигателей и до его выключения напряжение источника питания должно быть стабилизированным по величине, равным номинальному напряжению электродвигателей. Такое требование к стабилизации напряжения источника питания продиктовано необходимости обеспечения номинальных моментов вращения валов двигателей, а следовательно, и винтов БЛА, обеспечивающих устойчивую и надёжную работу БЛА в процессе его полёта.

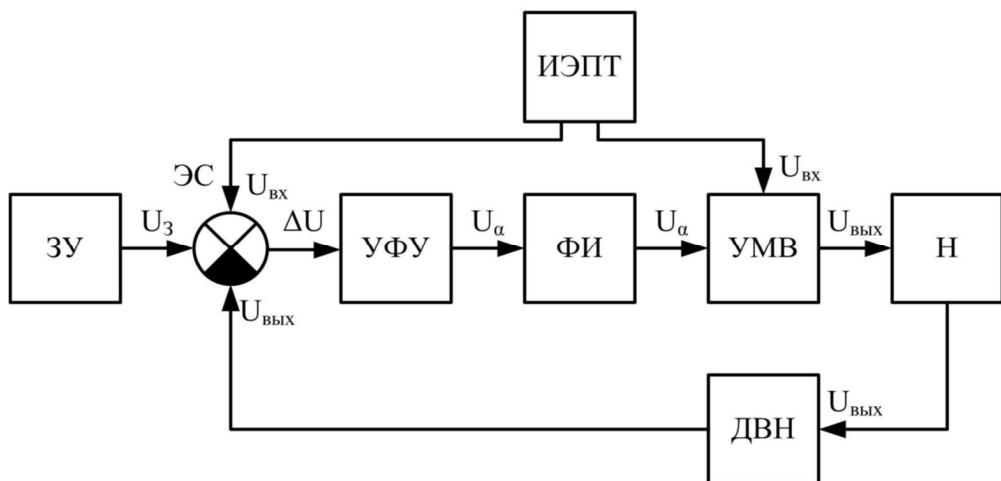


Рис. 2. Функциональная схема устройства системы автоматического управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя: ЗУ – задающее устройство; ЭС – элемент сравнения; УФУ – устройство фазового управления; ФИ – формирователь импульсов; УМВ – управляемый мостовой выпрямитель переменного тока; Н – нагрузка; ДВН – датчик выходного напряжения; ИЭПТ – источник электроэнергии переменного тока

Особенностью работы источника питания на БЛА является то, что напряжение генератора трёхфазного переменного тока, которое является входным напряжением для мостового выпрямителя, изменяется в очень широком диапазоне по сравнению с изменениями напряжения в промышленных сетях трёхфазного переменного тока и на электрифицированном железнодорожном транспорте. Если в сетях промышленности отклонение напряжения от номинального значения в большую сторону составляет не более 10 %, а на электрифицированном железнодорожном транспорте не более 16 %, то в генераторе БЛА такое отклонение составляет более чем в 2 раза, т.е. более 100 %. Положение усугубляется ещё тем, что помимо увеличения в 2 раза амплитуды напряжения увеличивается также в 2 раза и её частота. Большое изменение двух параметров (амплитуды и частоты) входного напряжения значительно усложняет задачу обеспечения стабилизации выходного напряжения источника. И поэтому выполнить стабилизацию выходного напряжения оказалось возможным только с помощью применения оригинальной схемы автоматического управления.

Устройство системы автоматического управления тиристорами управляемого мостового выпрямителя трёхфазного переменного тока. Предлагаемое устройство системы автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя осуществляется в устройстве, содержащем три канала управления согласно трёх фаз A, B, C, в каждом из которых осуществляется синхронизация, управление и регулирование фазы прямоугольных импульсов управления, их формирование и усиление, а также слежение за изменением величины амплитуды и частоты входного напряжения трёхфазного мостового выпрямителя, что обеспечивает в итоге стабилизацию величины выходного напряжения выпрямителя. На рис. 3 представлена схема устройства системы автоматического управления тиристорами управляемого трёхфазного мостового выпрямителя.

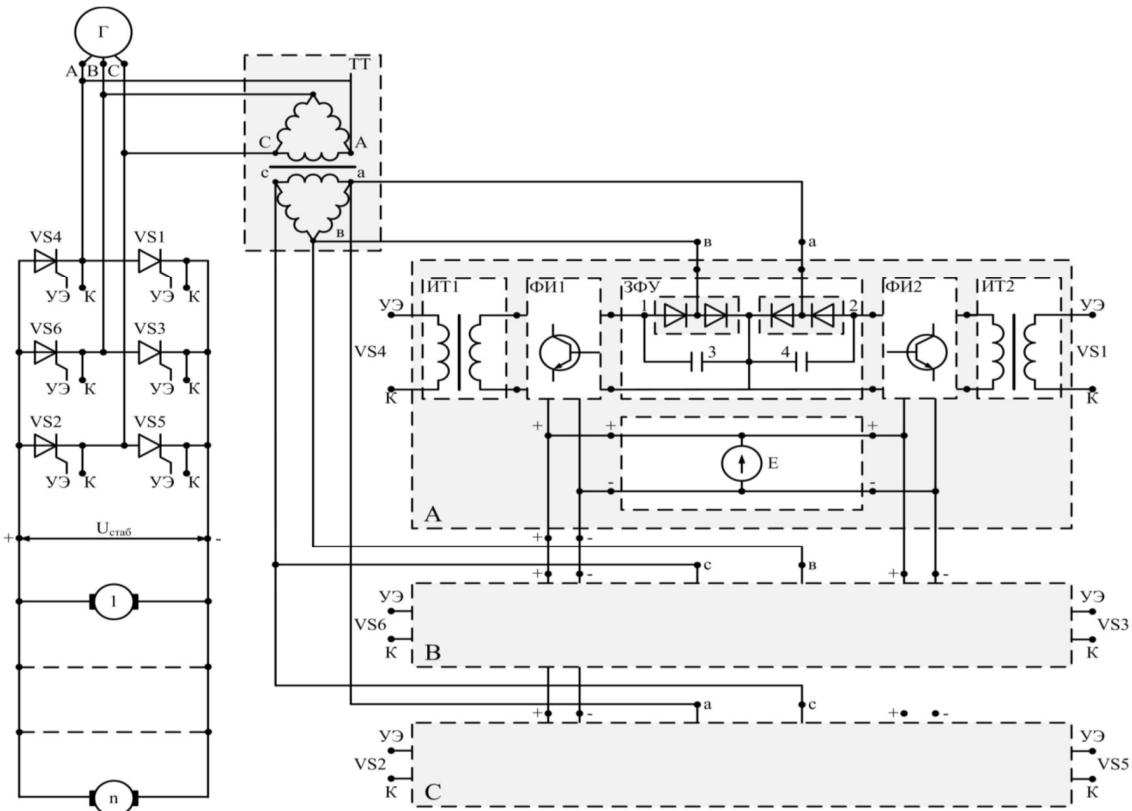


Рис. 3. Схема системы автоматического управления тиристорами управляемого трёхфазного мостового выпрямителя

От синхронного генератора трёхфазное напряжение A, B, C подаётся не только на трёхфазный мостовой выпрямитель, но и на понижающий трёхфазный трансформатор (ТТ), который выступает в качестве источника синхронизированного и одновременно управляющего напряжения. Со вторичных обмоток ТТ это напряжение подаётся на входы каналов управления. Каждый канал управления (A, B, C) содержит задатчик фазового угла (ЗФУ), на вход которого подаётся линейное напряжение соответствующей фазы. С помощью ЗФУ в формирователях импульсов ФИ1 и ФИ2 в каждом полупериоде напряжения формируется прямоугольный импульс управления, фазовый угол которого определяется величиной амплитуды и частоты задающего напряжения. ФИ1 и ФИ2 построены на основе транзисторов, работающих в режиме ключа, которые управляются напряжением заряжаемых конденсаторов ЗФУ. Коллекторная цепь каждого транзистора нагружена на первичную обмотку импульсных трансформаторов ИТ1 и ИТ2. Со второй обмотки этих импульсных трансформаторов сигнал управления подаётся на управляющий электрод соответствующего силового тиристора выпрямителя. В результате тиристоры в каждом полупериоде соответствующей фазы со сдвигом на 60° между собой открываются с регулируемым фазовым углом и на выходе выпрямителя

образуется стабилизированная величина выпрямленного напряжения. Уровень стабилизации напряжения поддерживается автоматически благодаря обратной связи по входному линейному напряжению, амплитуду и частоту которого устройство контролирует с помощью ЗФУ.

Каждый канал управления работает согласно линейному напряжению той фазы, которая подаётся на вход его ЗФУ. С выходов каналов управления сформированные импульсы управления подаются на открытие соответствующих силовых тиристоров выпрямителя.

Процессы работы устройства для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя. На рис. 4 представлена диаграмма процессов работы устройства для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя.

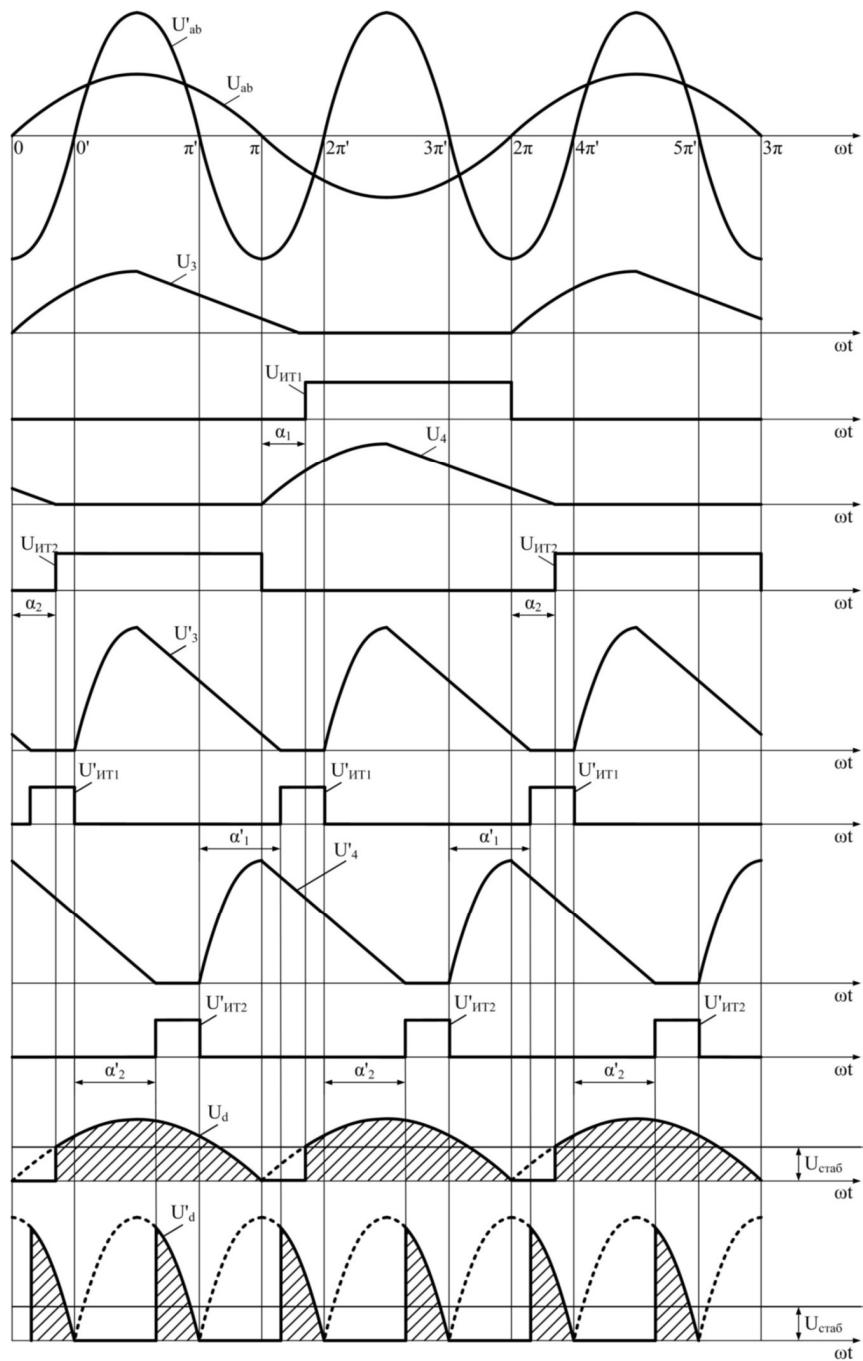


Рис. 4. Диаграмма процессов работы устройства для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя

Устройство для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя работает следующим образом. В соответствии с рис. 3 в один из полупериодов линейного напряжения источника синхронизированного и одновременно управляющего напряжения, снимаемого со вторичных обмоток ТТ, например фазы А $U_{\text{л}} = U_{ab}$, заряжается конденсатор 3, напряжение которого держит в закрытом состоянии транзистор формирователя ФИ1. После разряда конденсатора 3 до нуля в момент времени на интервале второго полупериода транзистор ФИ1 открывается и формирует импульс управления на первичной обмотке ИТ1, который трансформируется во вторичную обмотку, а затем подаётся на открытие соответствующего силового тиристора выпрямителя. Аналогичный процесс происходит в отношении транзистора формирователя ФИ2, состояние которого определяется зарядом и разрядом конденсатора 4 при смене полупериода для линейного напряжения U_{ba} фазы А генератора. Сформированный в ФИ2 импульс управления сдвинут на 180° относительно импульса управления в ФИ1. По такому принципу работают транзисторы формирователей импульсов всех каналов управления.

Величина зарядного напряжения конденсаторов 3 и 4 зависит от уровня напряжения управления (оно же напряжение синхронизации), поступающего с фазы А вторичной обмотки трёхфазного трансформатора. Если линейное напряжение трёхфазного источника переменного тока, в качестве которого выступает синхронный генератор переменного тока Г, повышается, то увеличивается и напряжение управления фазы А трёхфазного трансформатора, а значит, увеличивается зарядное напряжение конденсаторов 3 и 4, что приводит к увеличению постоянной времени его разряда и увеличению фазового угла выходного прямоугольного импульса управления, подаваемого для открытия тиристоров VS4 и VS1 трёхфазного мостового выпрямителя. При уменьшении линейного напряжения генератора Г фазовый угол прямоугольного импульса управления уменьшается. Однако с увеличением частоты вращения генератора Г увеличивается не только амплитуда его линейного напряжения, но и его частота, что вызывает уменьшение времени периода изменения этого напряжения. Чтобы постоянная времени разряда конденсаторов 3 и 4 не перекрыла уменьшенное время периода изменения линейного напряжения генератора Г, необходимо скорректировать постоянную времени разряда конденсаторов 3 и 4 в сторону её уменьшения. С этой целью в ФИ1 и ФИ2 имеется узел коррекции.

Таким образом, увеличение или уменьшение амплитуды напряжения и частоты генератора Г не вызовет изменения величины стабилизированного выходного напряжения U_{stab} выпрямителя.

В каналах управления фаз В и С происходят аналогичные процессы, описанные для фазы А, с той лишь разницей, что регулирование прямоугольных импульсов управления осуществляется в интервалах линейных напряжений U_{bc} (U_{cb}) для фазы В и U_{ca} (U_{ac}) для фазы С.

Проведённое математическое моделирование работы устройства для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового управляемого выпрямителя с настройкой устройства для управления тиристорами на стабилизацию выходного напряжения выпрямителя на уровень 50 В показало, что при изменении линейного напряжения синхронного генератора с 40 до 80 В и частоты переменного тока с 400 до 800 Гц стабилизация выходного напряжения U_{stab} трёхфазного мостового выпрямителя была осуществлена на уровне 50 В с отклонением в сторону увеличения до 54 В и в сторону уменьшения до 47 В, что составляет 7 % отклонения при увеличении и 6 % при уменьшении. Это является хорошим результатом стабилизации.

Выводы:

1. Разработано устройство для автоматического управления тиристорами трёхфазного мостового выпрямителя, позволяющее осуществить автоматическую стабилизацию выходного напряжения выпрямителя в условиях широкого диапазона изменения величин напряжения и частоты синхронного генератора на входе выпрямителя.

2. При изменении линейного напряжения синхронного генератора с 40 до 80 В и частоты переменного тока с 400 до 800 Гц стабилизация выходного напряжения выпрямителя на уровне 50 В осуществляется с отклонением в сторону увеличения до 54 В и в сторону уменьшения до 47 В, что составляет 7 % отклонения при увеличении и 6 % при уменьшении.



ЛИТЕРАТУРА

1. Тихменев, Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты: учеб. для вузов / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) «Ермак». Руководство по эксплуатации. Кн. 1. Электрические схемы. – Новочеркасск, 2004. – 248 с.
3. Электрооборудование летательных аппаратов / С. А. Грузков, С. Ю. Останин, А. М. Сугробов и др.; под ред. С. А. Грузкова. – М.: Изд-во МЗИ, 2005. – 438 с.
4. Системы электроснабжения летательных аппаратов / С. П. Халютин, Б. В. Жмиров, М. Л. Тюляев, В. В. Иванов [и др.]; под ред. С. П. Халютина. – М.: Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2010. – 379 с.
5. Мони, В. С. Стабилизированные тиристорные преобразователи / В. С. Мони. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 287 с.
6. Четти, П. Проектирование ключевых источников электропитания / П. Четти. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 386 с.
7. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники: учеб. для вузов / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1980. – 424 с.
8. Розанов, Ю. К. Основы силовой электроники / Ю. К. Розанов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
9. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, А. А. Кваснюк. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 632 с.
10. Уильямс, Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление / Б. Уильямс; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 583 с.
11. Воронин, П. А. Силовые полупроводниковые ключи / П. А. Воронин. – М.: Додэка, 2001. – 248 с.
12. Диоды и тиристоры в преобразовательных установках / М. П. Абрамович, В. М. Бабайлов, В. Е. Либер [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 364 с.
13. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 386 с.

Егоров В. А., Егорова Ю. Г., Плотников Е. В.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ
С УПРОЩЁННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Егоров В. А., Егорова Ю. Г., Плотников Е. В.

V. A. Egorov, Yu. G. Egorova, E. V. Plotnikov

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ С УПРОЩЁННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

MICROCONTROLLER OPERATING SYSTEM OF AUTONOMOUS INVERTER WITH SIMPLIFIED SPACE-VECTOR LATITUDE-PULSE MODULATION

Егоров Владислав Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: egoroff_v@list.ru.

Mr. Vladislav A. Egorov – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: egoroff_v@list.ru.

Егорова Юлия Георгиевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: egorova_jg@mail.ru.

Mrs. Yulia G. Egorova – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Applied Mathematics and Informatics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: egorova_jg@mail.ru.

Плотников Евгений Викторович – бакалавр кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: borodobj@gmail.com.

Mr. Evgeny V. Plotnikov – Bachelor's Degree Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: borodobj@gmail.com.

Аннотация. Описаны алгоритм, математическая модель и программная реализация блока формирования модулирующих функций автономного инвертора с упрощенным методом пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции. Приведены результаты тестирования разработанного блока управления.

Summary. The algorithm, mathematical model and software implementation of the block for the formation of modulating functions of an autonomous inverter with simplified space-vector latitude-pulse modulation are described. The test results of the developed control unit are presented.

Ключевые слова: микроконтроллер, пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция, автономный инвертор, модулирующая функция, таймер.

Key words: microcontroller, space-vector latitude-pulse modulation, autonomous inverter, modulating function, timer.

УДК 62-503.51;004.94

Введение

Метод пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции при управлении автономным инвертором, предназначенным для систем автоматизированного электропривода, в настоящее время является преобладающим.

Существенным недостатком метода при его цифровой реализации является наличие высоких требований к вычислительным ресурсам управляющего микроконтроллера. Это обусловлено необходимостью:



- использовать установленные правила переключения;
- идентифицировать сектор для определения правил переключения;
- в каждом цикле выполнять расчёты времени переключения.

В работе предлагается адаптированный для цифровой реализации упрощённый метод пространственно-векторной модуляции, который не требует проведения упомянутых выше вычислений, что существенно снижает требования к вычислительным ресурсам управляющего микроконтроллера.

Предлагаемый алгоритм адаптированного для цифровой реализации упрощённого метода пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции проверен математическим моделированием и реализацией экспериментального макета системы управления силовым драйвером автономного инвертора на основе однокристального микроконтроллера STM32F407VG.

Для получения трёхфазного ШИМ-модулированного синусоидального сигнала используются таймеры TIM1 и TIM6 микроконтроллера. Значения точек модулирующих функций вычисляются в прерывании от таймера TIM6 и выводятся в регистры сравнения соответствующего канала таймера TIM1. Это позволяет получить на выходе таймера трёхфазный ШИМ-модулированный синусоидальный сигнал, который поступает на входы силового драйвера и формирует трёхфазное синусоидальное напряжение на выходе инвертора.

Алгоритм

Алгоритм упрощённого метода пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции:

- определить минимальное из опорных фазных напряжений:

если $(U_B > U_A) \& (U_A < U_C)$, $U_{\min} = U_A$;

$(U_A > U_B) \& (U_B < U_C)$, $U_{\min} = U_B$;

$(U_A > U_C) \& (U_C < U_B)$, $U_{\min} = U_C$;

- определить максимальное из опорных фазных напряжений:

если $(U_B < U_A) \& (U_A > U_C)$, $U_{\max} = U_A$;

$(U_A < U_B) \& (U_B > U_C)$, $U_{\max} = U_B$;

$(U_A < U_C) \& (U_C > U_B)$, $U_{\max} = U_C$;

- определить смещение функций предмодуляции:

$$T_{offset} = \frac{T_{\text{ц}}}{2} - \frac{(U_{\max} + U_{\min})}{2},$$

где период широтно-импульсной модуляции

$$T_{\text{ц}} = \frac{1}{f_{\text{ц}}};$$

- вычислить модулирующие функции:

$$U_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}(U_A + T_{offset}) + \text{ARR_2};$$

$$U_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}(U_B + T_{offset}) + \text{ARR_2};$$

$$U_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}(U_C + T_{offset}) + \text{ARR_2},$$

где ARR_2 – смещение опорного сигнала, равное половине диапазона счёта таймера TIM1.

Моделирование

Математическая модель автономного инвертора с микроконтроллерным управлением (см. рис. 1) имеет ряд особенностей. Треугольный опорный сигнал формируется счётчиком таймера TIM1. Диапазон счёта таймера ARR = 21 000 дискретных единиц (д.е.). Поэтому в модель системы управления введено смещение ARR_2 = 10 500 (д.е.), являющееся «нулём» опорного сигнала.

Описанный выше алгоритм управления силовыми ключами инвертора реализован в функциональном блоке SVPWM.

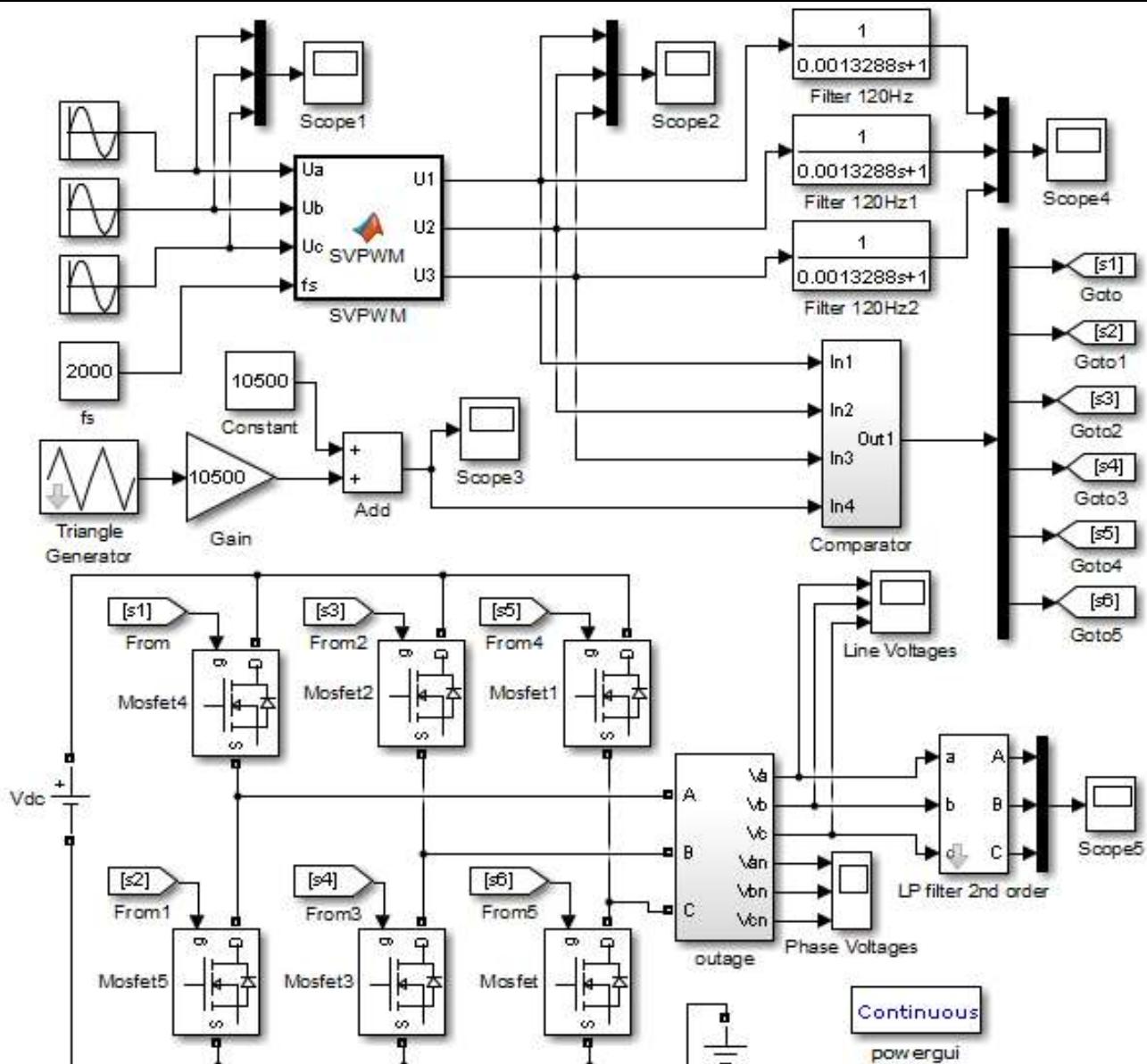


Рис. 1. Модель автономного инвертора с микроконтроллерным управлением

Результаты моделирования работы автономного инвертора представлены на рис. 2. На рис. 2, а и в показаны модулирующие функции U_1 , U_2 , U_3 и опорный сигнал, формируемый таймером TIM1. Максимальному управляемому сигналу в 10 500 (д.е.) соответствует линейное напряжение на выходе инвертора с амплитудным значением $220\sqrt{2}$ (В) (см. рис. 2, г). На рис. 2, б изображены модулирующие функции U_1 , U_2 , U_3 после прохождения через низкочастотные фильтры с полосой пропускания 120 Гц. Фильтры моделируют восстановление формы модулирующих функций из ШИМ-сигналов на выходах таймера TIM1 экспериментальной установки.

Описание экспериментальной установки

Основой экспериментальной установки является однокристальный микроконтроллер STM32F407VG. В прерывании от таймера TIM6 (см. рис. 3) реализован алгоритм упрощенного метода пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции. Таймер TIM1 используется для управления силовыми ключами. Линии PE9, PE11 и PE13 микроконтроллера определены как выходы фаз А, В и С таймера.

Настройки таймера TIM6: farb1tc = 84 MHz – частота тактирования таймера; N = 41 + 1 – коэффициент предделителя; ARR = 199 + 1 – диапазон счёта таймера.

Настройки таймера TIM1: $\text{farb2tc} = 168 \text{ MHz}$ – частота тактирования таймера; $N = 2$ – коэффициент предделителя; $\text{ARR} = 21\,000$ – диапазон счёта таймера TIM1; Center Aligned mode2 – режим работы; PWM Generation Cannel 1,2,3 / CH Polarity – High – установки прямого ШИМ.

Частота широтно-импульсной модуляции $f_s = 2000 \text{ (Гц)}$. Смещение модулирующей функции $\text{ARR}/2 = 10\,500$.

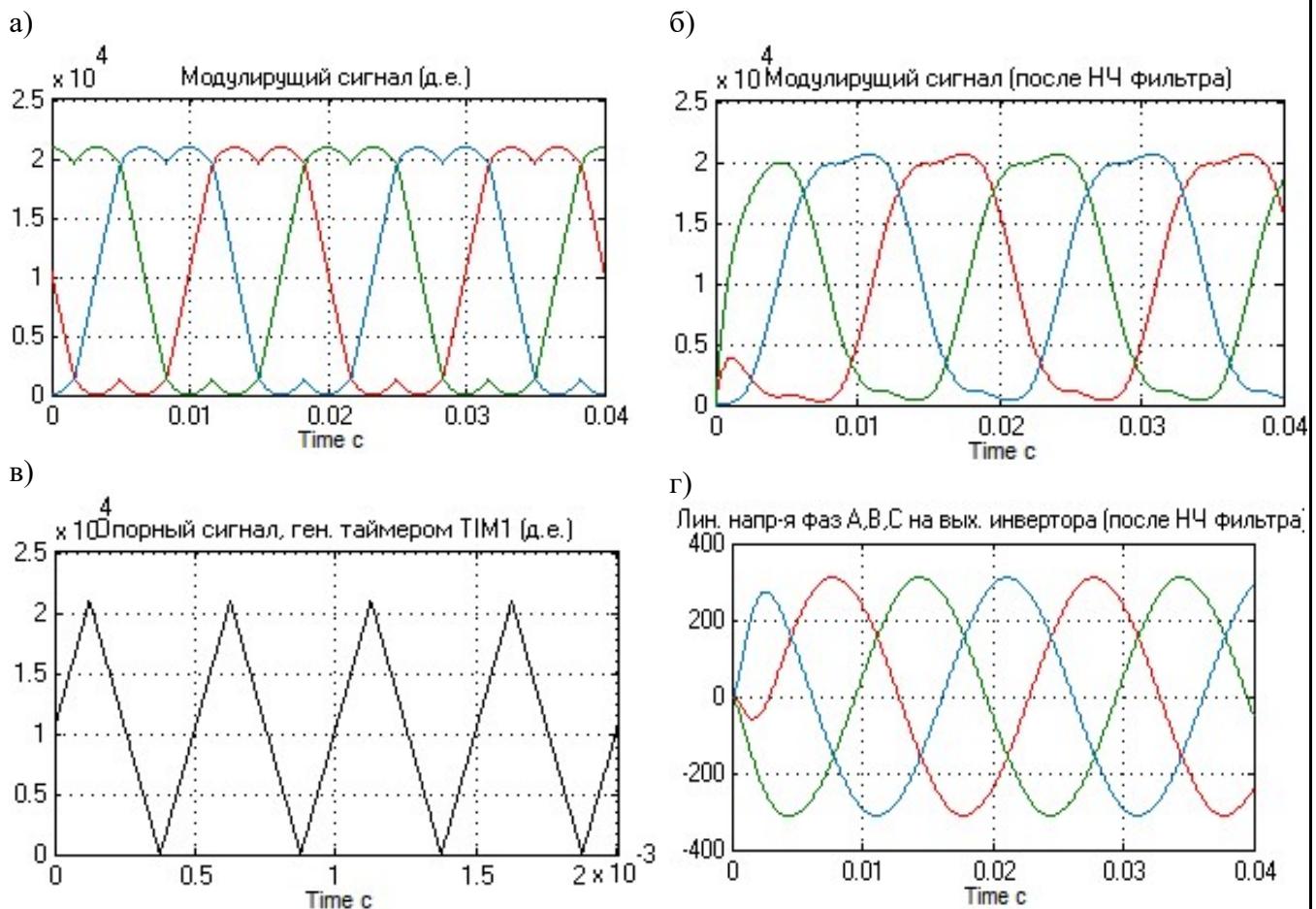


Рис. 2. Результаты моделирования автономного инвертора

Для проверки работоспособности трёхфазного ШИМ-модулятора линии микроконтроллера PE9, PE11, PE13 были подключены ко входам осциллографа через RC-фильтры первого порядка с частотой среза 120 Гц. Сигналы фаз А и В показаны на рис. 4.

Из рис. 4, а видно, что период модулирующей функции составляет 10 клеток по 2 мс, что соответствует частоте 50 Гц. На рис. 4, б период модулирующей функции составляет 8 клеток по 5 мс, что соответствует частоте 25 Гц. Амплитуда модулирующей функции на частоте 50 Гц в два раза больше амплитуды на частоте 25 Гц. Искажение формы модулирующей функции на частоте 50 Гц вызвано наличием в измерительном канале низкочастотного фильтра с полосой пропускания 120 Гц (см. рис. 2, б и 4, а). При снижении частоты модулирующей функции до 25 Гц искажение формы функции отсутствует (см. рис. 4, б).

```

74 void TIM6_DAC_IRQHandler(void)
75 {
76     HAL_TIM_IRQHandler(&htim6);
77     /* USER CODE BEGIN TIM6_DAC_IRQHandler */
78     //-----
79     //Амплитуда модулирующей функции
80     //A=ARR*w/(2*fmax*p*2*PI)=(21000/(2*25*2*2*3.1415))*w=33.42253804929802*w
81     //-
82     f=(i*50/4095);
83     w=2*PI*f; dw=2*PI/3; //f-частота синуса, dw-фазовый сдвиг 120 градусов
84     A=33.42253804929802f*w;
85     yA=10500+A*arm_sin_f32(w*t); //вычисление значений опорных функций
86     yB=10500+A*arm_sin_f32(w*t-dw);
87     yC=10500+A*arm_sin_f32(w*t+dw);
88     t+=0.0001f; //dt=1/fT6=1/10000=0.0001с - приращение времени
89     if(w*t>=2*PI) t=0; //если угол достигает 2*PI, время t обнуляется
90     //Определение Umin
91     if((yB>yA)&&(yA<yC)) Umin=yA;
92     if((yA>yB)&&(yB<yC)) Umin=yB;
93     if((yA>yC)&&(yC<yB)) Umin=yC;
94     //Определение Umax
95     if((yB<yA)&&(yA>yC)) Umax=yA;
96     if((yA<yB)&&(yB>yC)) Umax=yB;
97     if((yA<yC)&&(yC>yB)) Umax=yC;
98     //Определение Toffset
99     Toffset=(T1-(Umax+Umin))/2;
100    //вычисление значений модулирующих функций
101    U1=1.15470053837925f*(yA+Toffset);
102    U2=1.15470053837925f*(yB+Toffset);
103    U3=1.15470053837925f*(yC+Toffset);
104    y1A=(uint16_t)U1; //преобразование из вещественного в целое
105    y1B=(uint16_t)U2;
106    y1C=(uint16_t)U3;
107    TIM1->CCR1=y1A; //задание скважности ШИМ
108    TIM1->CCR2=y1B;
109    TIM1->CCR3=y1C;
110    /* USER CODE END TIM6_DAC_IRQHandler */
111 }

```

Рис. 3. Программная реализация упрощённого метода пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции в прерывании TIM6

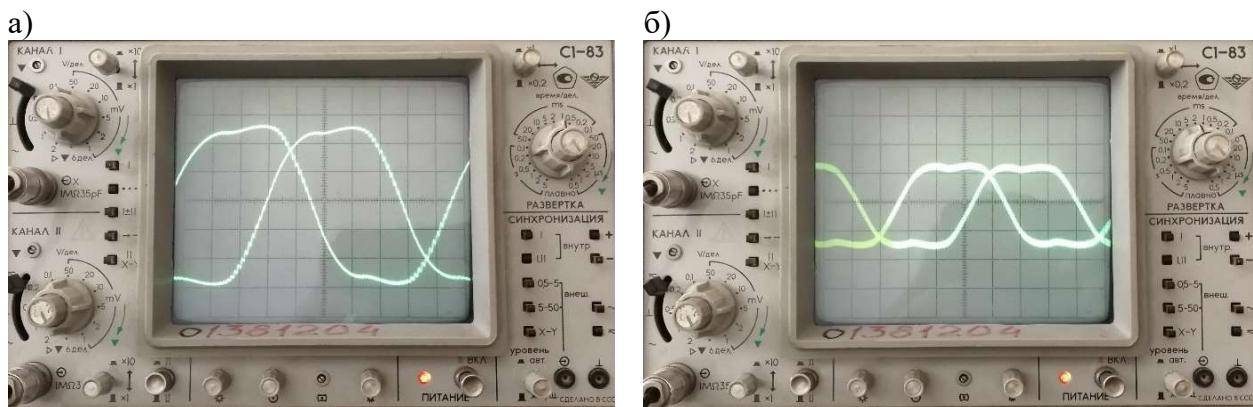


Рис. 4. Сигналы фаз А и В трёхфазного ШИМ-модулятора:

а – модулирующие функции фаз А и В при частоте выходного напряжения инвертора 50 Гц;
б – модулирующие функции фаз А и В при частоте выходного напряжения инвертора 25 Гц



Таким образом, упрощённый метод пространственно-векторной модуляции работоспособен, требует меньших вычислительных ресурсов по сравнению с классическим треугольным методом и является предпочтительным для цифровой реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т имени В. И. Ленина, 2008. – 298 с.
2. Space vector PWM inverter [Электронный ресурс] / Course Hero, Inc. – Режим доступа: <https://www.coursehero.com/file/31050995/SpaceVector-PWM-Inverterpdf> (дата обращения: 01.03.2020).
3. Vinoth K. K., Prawin A. M., Joseph P. J., Suresh S. K. Simulation and comparison of spwm and svpwm control for three phase inverter [Электронный ресурс] // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2010. – P. 7. URL: http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2010/jeas_0710_362.pdf (дата обращения: 01.03.2020).
4. Devisree S., Jisha K. P. Modelling and simulation of svpwm inverter fed permanent magnet brushless dc motor drive [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – P. 30. URL: https://www.ijareeie.com/upload/may/30_MODELLING.pdf (дата обращения: 01.03.2020).

Горелик В. А., Золотова Т. В.

ВСТРОЕННЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕНДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Горелик В. А., Золотова Т. В.

V. A. Gorelik, T. V. Zolotova

ВСТРОЕННЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕНДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

INTEGRATED DATA TRANSFORMATION METHOD IN REGRESSION ANALYSIS AND ITS APPLICATION TO THE SETTING UP OF THE FAR EASTERN REGION TRENDS

Горелик Виктор Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, профессор Института математики и информатики МПГУ (Россия, Москва). E-mail: vgor16@mail.ru.

Mr. Victor A. Gorelik – Doctor of Science, Professor, Leading Researcher of Dorodnicyn Computing Centre FRC CSC RAS (Russia, Moscow). E-mail: vgor16@mail.ru.

Золотова Татьяна Валерьевна – доктор физико-математических наук, доцент, профессор Департамента анализа данных, принятия решений и финансовых технологий Финансового университета при Правительстве РФ (Россия, Москва). E-mail: tgold11@mail.ru.

Mrs. Tatiana V. Zolotova – Doctor of Science, Associated Professor, Professor of Financial University under the Government of the Russian Federation (Russia, Moscow). E-mail: tgold11@mail.ru.

Аннотация. Рассматривается линейная задача регрессионного анализа в предположении наличия шумов в выходной и входных переменных. Геометрическая интерпретация заключается в построении гиперплоскости в $(n+1)$ -мерном пространстве, которая проходит ближе всех к заданным точкам в смысле выбранной меры близости. Эта задача аппроксимации может также интерпретироваться как несобственная задача интерполяции, для которой требуется оптимальным образом изменить (корректировать) положения точек так, чтобы они все лежали на одной гиперплоскости. Для оценки меры аппроксимации исходных данных использована метрика l_1 , которая имеет вероятностное обоснование как метод максимального правдоподобия при двустороннем экспоненциальном распределении шумов. Кроме того, рассматривается случай необходимости предварительного линейного преобразования данных, при том что коррекции подлежит исходная информационная матрица. Показано, что эти задачи аппроксимации (коррекций) сводятся к совокупности задач линейного программирования. Данный подход применён для построения зависимости уровня заболеваемости от показателей роста промышленного производства и затрат на охрану окружающей среды для Дальневосточного региона РФ.

Summary. The linear problem of regression analysis is considered under the assumption of the presence of noise in the output and input variables. The geometric interpretation is the construction of a hyperplane in an $(n+1)$ -dimensional space, which passes closest to the given points in the sense of the chosen proximity measure. This approximation problem can also be interpreted as an improper interpolation problem, for which it is necessary to change (correct) optimally the positions of the points so that they all lie on the same hyperplane. To estimate the approximation measure of the initial data, we used the metric l_1 , which has a probabilistic justification as the maximum likelihood method for a two-sided exponential noise distribution. In addition, the case of the need for preliminary linear data transformation is considered, moreover that the original information matrix is subject to correction. It is shown that these approximation (correction) problems are reduced to the set of linear programming problems. This approach is used to build the dependence of the disease frequency on industrial production growth rates and environmental protection costs for the Far Eastern region of the Russian Federation.

Ключевые слова: обработка данных, регрессионный анализ, матрица коррекции, метод максимального правдоподобия, экспоненциальное распределение.

Key words: data processing, regression analysis, matrix correction, maximum likelihood method, exponential distribution.



УДК 519.7

Введение

Задача регрессионного анализа состоит в выборе функции, которая в некотором смысле достаточно точно описывает заданные таблично экспериментальные данные. Так как точное описание, как правило, невозможно, то её можно интерпретировать как несобственную (не имеющую решения) задачу интерполяции. Последняя состоит в построении функции $f: X \rightarrow Y$ из некоторого класса Φ такой, что исходные данные $(x^1, y^1), \dots, (x^m, y^m)$ удовлетворяют системе уравнений

$$y^i = f(x^i), i = 1, \dots, m, f \in \Phi. \quad (1)$$

Геометрически это означает, что поверхность, описываемая данной функцией, проходит через заданные точки. Так как данные обычно получены экспериментальным путём и включают неточности измерения или шумы, то эта задача, как правило, не имеет решения для фиксированного класса функций. В таком случае рассматривается задача оптимальной коррекции (аппроксимации): требуется найти функцию, которая удовлетворяет условию (1) для некоторых других данных $[X_h, y_h]$, причём эти данные являются в некотором смысле ближайшими к исходным $[X, y]$. Эта задача формализуется путём введения меры близости как некоторой матричной нормы и нахождения минимальной в смысле этой нормы матрицы коррекции $A = [X_h, y_h] - [X, y]$.

Методы матричной коррекции (по совокупности всех исходных данных) получили в настоящее время широкое применение при решении несовместных и неустойчивых систем линейных алгебраических уравнений и неравенств и несобственных задач линейного программирования (см., например, [1; 2]). Использование методов коррекции в задачах обработки экспериментальных данных в условиях наличия шумов при измерении не только выходных, но и входных переменных, составляет содержание полного метода наименьших квадратов (TLS в англоязычной терминологии, см. [8; 9]). Этот метод имеет вероятностное обоснование как метод максимального правдоподобия в случае нормального распределения ошибок как при измерении векторного аргумента x , так и значений функции y .

Нередко при моделировании случайных процессов в сложных системах, в частности в экономике и финансах, распределения величин не соответствуют нормальному закону. Это связано с тем, что значение эксцесса больше у статистических распределений, основанных на реальных данных. Такие распределения случайных величин имеют «тяжёлые хвосты», т.е. соответствующая плотность распределения медленнее в сравнении с нормальной убывает при $|x| \rightarrow \infty$. Это подтверждается как видом эмпирических плотностей, так и стандартными статистическими критериями. Принято считать, что распределение имеет тяжёлый правый хвост, если вероятность того, что случайная величина превосходит достаточно большое x , имеет величину порядка $x^{-\alpha}$ (например, распределения Стьюдента, Парето [6]).

Метод наименьших квадратов (в том числе полный) теряет своё вероятностное обоснование, если распределение шумов в статистических данных отличается от нормального. В работе [6] приведены примеры реальных финансовых показателей, которые хорошо описываются двусторонним распределением Лапласа (заметим, что классически под именем Лапласа фигурирует одностороннее экспоненциальное распределение). Это распределение не имеет тяжёлого хвоста в указанном выше смысле, но всё же убывает медленнее по сравнению с нормальным законом. В работе [4] показано, что метод максимального правдоподобия при использовании гипотезы экспоненциального распределения шумов приводит в качестве меры аппроксимации к полиздральной норме l_1 матрицы (под которой понимается сумма модулей её элементов, т.е. матрица рассматривается как «расширенный» вектор). В частности, для класса аффинных функций геометрическая интерпретация означает, что в пространстве R^{n+1} требуется найти такую гиперплоскость $L: y = (a, x) + b$, которая расположена ближе всех гиперплоскостей к заданным точкам в смысле суммы расстояния в метрике l_1 .

Как известно, решение задачи матричной коррекции по норме l_1 сводится к решению ряда задач линейного программирования (различные варианты соответствующих методов содержатся, например, в работах [4; 10; 11]).

В данной работе этот результат обобщается на задачу построения линейной регрессии для данных, которые необходимо предварительно подвергнуть линейному преобразованию. Это приводит к новым более сложным задачам коррекции (аппроксимации) и необходимости разработки методов параметрической коррекции. Показано, что такие задачи тоже можно свести к линейному программированию. Разработанные методы проиллюстрированы на тестовых примерах, а затем применены к практической задаче с реальными данными.

Широко распространённой процедурой, предшествующей построению регрессии, является трансформация данных, которая заключается в оптимизации их представлений и форматов (нормализация, стандартизация и т.д.).

Нормализация – это процедура предобработки входных данных, при которой значения признаков (объясняющих переменных) в обучающих или тестовых выборках приводятся к некоторому заданному диапазону (например, [0,1]). Нормализация необходима тогда, когда во входном векторе содержатся значения, отличающиеся друг от друга на несколько порядков. При нормализации требуется масштабировать столбцы информационной матрицы. Это может быть произведено линейным преобразованием с умножением информационной матрицы X справа на диагональную матрицу, состоящую из различных масштабирующих коэффициентов, и прибавлением матрицы, меняющей начало шкалы отсчёта.

Стандартизация – это преобразование данных с гауссовым распределением, которое вычитает среднее значение и делит результат на стандартное отклонение выборки данных. Это приводит к преобразованию данных со средним значением, равным нулю, и со стандартным отклонением, равным 1. Результатирующее распределение называется стандартным распределением Гаусса, или стандартным нормальным. Однако аналогичное преобразование можно применять и к другим законам распределения данных, например, к распределению Лапласа.

С помощью подходящих линейных преобразований можно также изменять свойства многомерных распределений. Так, если данные, представленные матрицей X , коррелированы, а Σ есть ковариационная матрица, то для устранения корреляции данных можно использовать разложение $\Sigma = AA^T$ и преобразование $A^{-1}X$, которое приводит к единичной ковариационной матрице.

Значительное внимание в современной литературе по регрессионному анализу уделяется проблеме выбросов – атипичным данным в выборке (см., например, [5]). Для сглаживания таких данных предлагаются различные эвристические методы (вплоть до исключения атипичных точек). Однако, на наш взгляд, более корректно их сглаживать с помощью линейных преобразований. Так как при этом нормировке подлежат строки информационной матрицы, то такое преобразование удобно осуществлять умножением информационной матрицы слева на диагональную матрицу.

Таким образом, многие (но, конечно, не все) процедуры трансформации данных могут быть представлены в виде линейного преобразования информационной матрицы, т.е. умножения её слева или справа на специально подобранныю матрицу соответствующей размерности, а также прибавления соответствующей матрицы. Оказывается, что выбор варианта умножения информационной матрицы влияет на способ решения получающейся оптимизационной задачи, поэтому далее они рассматриваются отдельно.

Обобщённая задача построения линейной регрессии в метрике l_1 с левосторонним умножением информационной матрицы

Математическая постановка задачи регрессии заключается в следующем. Зависимость величины (числового значения) определённого свойства некоторого процесса или явления от другого свойства зарегистрирована на множестве точек $x^i \in R^n$, $i = 1, \dots, m$, множеством значений $y^i \in R$, $i = 1, \dots, m$.



Введём в рассмотрение матрицу исходных данных $Z = \begin{pmatrix} -y^1 & x_1^1 & \cdots & x_n^1 \\ -y^2 & x_1^2 & \cdots & x_n^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -y^m & x_1^m & \cdots & x_n^m \end{pmatrix}$.

Предполагается, что ошибки наблюдения (шумы) имеют место как во входных данных (объясняющих переменных), так и в выходных данных (объясняемой переменной). Поэтому все элементы этой матрицы будем подвергать линейному преобразованию и аддитивной коррекции. В качестве частных случаев нетрудно рассмотреть варианты коррекции (аппроксимации) только по входным или выходным данным.

В этом разделе мы рассмотрим вариант линейного преобразования исходных данных вида

$$D(Z) = D_0 + D_1 Z, \quad (2)$$

где Z – матрица размера $m \times (n + 1)$; D_0 – матрица размера $m \times (n + 1)$; D_1 – невырожденная матрица размера $m \times m$.

Использование гипотезы линейной зависимости (объясняемой от объясняющих переменных) предполагает, что после преобразования (2) все точки должны лежать на одной гиперплоскости, т.е. удовлетворять матричному уравнению

$$D(Z)\bar{a} = -be, \quad (3)$$

где $e = (1, 1, \dots, 1)^T \in R^m$, $\bar{a} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T$, $a_0 = 1$, $b \in R$.

Вследствие наличия шумов в исходных данных переопределённая система уравнений (3) относительно неизвестных \bar{a} , b является, как правило, несовместной. Задача аппроксимации эквивалентна минимальной коррекции исходных данных, при которой данная система становится совместной.

Обычно в случае необходимости предварительной обработки исходных данных процесс построения регрессии состоит из двух этапов. Сначала производится преобразование исходной информационной матрицы, а затем для полученной информационной матрицы решается задача аппроксимации. Однако гипотеза о наличии шумов с некоторым законом распределения относится, вообще говоря, к исходным данным, полученным экспериментальным путём. Поэтому предлагается идея, состоящая в совместном использовании процедур преобразования и аппроксимации, т.е. варьировании при аппроксимации исходных данных. Заметим, что наличие свободного члена b в классе аффинных функций означает, по существу, введение дополнительной фиктивной переменной, принимающей значение 1. Поэтому это значение не подлежит коррекции.

Сформулируем постановку задачи коррекции данных, для которой возможна непосредственная коррекция элементов матрицы Z , а элементы матрицы D подвергаются изменению согласно (2).

В качестве минимизируемого критерия величины коррекции здесь будем использовать норму матрицы l_1 . Обозначим матрицу коррекции параметров матрицы Z через H . Эта матрица должна удовлетворять условию $D_0\bar{a} + D_1(Z - H)\bar{a} = -eb$ или

$$H\bar{a} = D_1^{-1}D_0\bar{a} + Z\bar{a} + D_1^{-1}eb. \quad (4)$$

Рассмотрим задачу нахождения минимальной по норме l_1 матрицы H , для которой система уравнений (4) совместна:

$$\min_{\bar{a}, b, H} \{ \|H\|_1 | H\bar{a} = D_1^{-1}D_0\bar{a} + Z\bar{a} + D_1^{-1}eb \}, \quad (5)$$

где $\|H\|_1$ – норма l_1 матрицы H .

Задача (5) относится к классу задач параметрической коррекции. В работе [7] был предложен метод решения задач подобного типа, сводящий их к совокупности задач линейного программирования. Применительно к задаче (5) имеет место следующее утверждение: если существует такое решение (u^*, v^*, w^*, j^*) задачи

$$\begin{aligned} \min_{u,v,w,j} & \{\langle e, u \rangle \mid u \geq \pm(D_1^{-1}D_0v + Zv + D_1^{-1}ew), \\ & u \geq 0, |v_i| \leq 1, i = 0, \dots, n, |v_j| = 1\}, \end{aligned} \quad (6)$$

что $v_0^* \neq 0$, то $\bar{a}^* = \frac{v^*}{v_0^*}$, $b^* = \frac{w^*}{v_0^*}$ является решением задачи (5), элементы матрицы коррекции H^*

определяются по формулам

$$h_{ij^*}^* = \frac{(D_1^{-1}D_0\bar{a}^* + Z\bar{a}^* + D_1^{-1}eb^*)_i}{\max_{0 \leq j \leq n} |\bar{a}_j^*|}, h_{ij}^* = 0, j \neq j^*, i = 1, \dots, m,$$

где $j^* = \arg \max_{0 \leq j \leq n} |\bar{a}_j^*|$, $\|H^*\|_1 = \langle e, u^* \rangle$, $(\cdots)_i$ – i -я компонента вектора, стоящего в скобках.

Заметим, что в силу однородности ограничений в (6) при значениях $v_j = \pm 1$ решения получаются одинаковыми. Поэтому достаточно решить $(n+1)$ задачу ЛП.

Обобщённая задача построения линейной регрессии в метрике l_1 с правосторонним умножением информационной матрицы

В данном разделе мы рассмотрим вариант линейного преобразования исходных данных вида

$$D(Z) = D_0 + ZD_2, \quad (7)$$

где Z – матрица размера $m \times (n+1)$; D_0 – матрица размера $m \times (n+1)$; D_2 – невырожденная матрица размера $(n+1) \times (n+1)$.

Гипотеза линейной зависимости (объясняемой от объясняющих переменных) предполагает, что после преобразования (7) все точки должны лежать на одной гиперплоскости, т.е. удовлетворять матричному уравнению (3).

Сформулируем постановку задачи коррекции данных, для которой возможна непосредственная коррекция элементов матрицы Z , а элементы матрицы D подвергаются изменению согласно (7).

В качестве минимизируемого критерия величины коррекции здесь будем также использовать норму матрицы l_1 . Матрица H коррекции параметров матрицы Z должна удовлетворять условию $D_0\bar{a} + (Z - H)D_2\bar{a} = -eb$. В данном случае использованный выше приём умножения на обратную матрицу не проходит. Поэтому здесь мы используем другой приём, а именно замену переменных $\tilde{a} = D_2\bar{a}$. Если мы найдём вектор \tilde{a} , то коэффициенты регрессии определяются по формуле $\bar{a} = D_2^{-1}\tilde{a}$. В новых переменных получаем уравнение

$$H\tilde{a} = D_0D_2^{-1}\tilde{a} + Z\tilde{a} + eb. \quad (8)$$

Рассмотрим задачу нахождения минимальной по норме l_1 матрицы H , для которой система уравнений (8) совместна:

$$\min_{\tilde{a}, b, H} \{ \|H\|_1 \mid H\tilde{a} = D_0D_2^{-1}\tilde{a} + Z\tilde{a} + eb\}.$$

Используя указанный выше подход, можно показать, что имеет место следующее утверждение: если существует такое решение (u^*, v^*, w^*, j^*) задачи

$$\begin{aligned} \min_{u,v,w,j} & \langle e, u \rangle \mid u \geq \pm(D_0 D_2^{-1} v + Zv + ew), \\ & u \geq 0, |v_i| \leq 1, i = 0, \dots, n, |v_j| = 1 \}, \end{aligned} \quad (9)$$

что $v_0^* \neq 0$, то $\tilde{a}^* = \frac{v^*}{v_0}$, $b^* = \frac{w^*}{v_0}$ является решением задачи (9), элементы матрицы коррекции H^* определяются по формулам

$$h_{ij^*}^* = \frac{(D_0 D_2^{-1} \tilde{a}^* + Z\tilde{a}^* + eb^*)_i}{\max_{0 \leq j \leq n} |\tilde{a}_j^*|}, h_{ij}^* = 0, j \neq j^*, i = 1, \dots, m,$$

где $j^* = \arg \max_{0 \leq j \leq n} |\tilde{a}_j^*|$, $\|H^*\|_1 = \langle e, u^* \rangle$, $(\cdots)_i$ – i -я компонента вектора, стоящего в скобках.

Исходная задача опять сводится к решению $(n+1)$ задач ЛП и последующему определению коэффициентов регрессии по формуле $\bar{a} = D_2^{-1} \tilde{a}$.

Пример преобразования данных при построении демографического тренда

Рассмотрим практический пример, основанный на реальных данных, взятых с сайта Росстата [12]. Мы будем анализировать показатель заболеваемости населения субъектов Российской Федерации по Дальневосточному федеральному округу в зависимости от двух факторов: промышленного производства и охраны окружающей среды.

В табл. 1 приведены данные за 2018 год по 11 субъектам: заболеваемость на 1000 человек населения, прирост промышленного производства, затраты на охрану окружающей среды. Анализ показателей указывает, что Республика Саха и Еврейская автономная область выделяются среди остальных регионов.

Таблица 1

Анализируемые социально-экономические показатели по субъектам
Дальневосточного федерального округа России за 2018 год

| Дальневосточный федеральный округ | Заболеваемость на 1000 человек насе- ления, доли | Прирост промышленно- го производства, % к предыдущему году | Затраты на охрану окружающей среды, млрд р. |
|--------------------------------------|--|--|---|
| Республика Бурятия | 0.6327 | 3.7 | 4.318 |
| Республика Саха (Якутия) | 1.0153 | 9.0 | 20.671 |
| Забайкальский край | 0.7269 | 3.1 | 5.166 |
| Камчатский край | 0.7996 | 9.6 | 1.630 |
| Приморский край | 0.7647 | 1.0 | 5.257 |
| Хабаровский край | 0.6916 | 0.6 | 7.696 |
| Амурская область | 0.8529 | -2.4 | 2.839 |
| Магаданская область | 0.6576 | 9.5 | 1.496 |
| Сахалинская область | 0.7550 | 5.5 | 2.699 |
| Еврейская автономная область | 0.6572 | 7.8 | 0.493 |
| Чукотский автономный округ | 0.12783 | 1.0 | 0.709 |

Элементами информационной матрицы Z являются данные из табл. 1, только для первого столбца матрицы они идут со знаком «минус».

По исходным данным построим линейную регрессию в метрике l_1 без преобразования данных, т.е. $D_0 = (0)_{11 \times 3}$ (нулевая матрица), а $D_1 = E_{11 \times 11}$ (единичная матрица). Минимальное значение нормы матрицы коррекции $\langle e, u \rangle = 1.160$. Уравнение регрессии имеет вид $y = -0.003x_1 + 0.018x_2 + 0.674$.

Вообще говоря, вопрос о знаке коэффициента при переменной прироста промышленного производства не является однозначным и определяется видом вводимых новых технологий. Если

речь идёт о вредных производствах, то их наращивание может приводить к росту заболеваемости. С другой стороны, развитие промышленности в регионе приводит к увеличению отчислений в социальные фонды (в том числе, в фонд обязательного медицинского страхования) и росту доходов населения. Это способствует улучшению социально-экономической ситуации в регионе и, как следствие, уменьшению заболеваемости. В данном случае коэффициент при переменной прироста промышленного производства получился отрицательным, что говорит, по-видимому, о том, что рост промышленного производства был связан с введением новых «чистых» технологий.

А вот положительный коэффициент при переменной экологических затрат является явной аномалией. Конечно, сами по себе затраты на экологию не могут одномоментно улучшить состояние здоровья населения, особенно если эти затраты не связаны с первоочередными проблемами. Однако вреда здоровью они точно приносить не должны. Поэтому полученный результат говорит об атипичных данных (выбросах), наличие которых следует проанализировать.

Республика Саха имеет самые большие затраты на охрану окружающей среды при относительно высоком приросте промышленного производства, а заболеваемость является одной из самых высоких. Еврейская автономная область осуществляет минимальные затраты на охрану окружающей среды также при относительно высоком приросте промышленного производства, а показатель заболеваемости имеет один из самых низких значений по сравнению с остальными субъектами Дальневосточного региона. Таким образом, можно предположить, что в данном случае мы имеем дело с наличием выбросов. С одной стороны, эти регионы являются элементами общей картины и должны учитываться при построении тренда заболеваемости, с другой стороны они являются весьма атипичными. По-видимому, в этих субъектах заболеваемость определяется другими важными факторами (климатом, условиями труда и т.д.).

Исключим Республику Саха и Еврейскую автономную область и построим линейную регрессию в метрике l_1 без преобразования данных, т.е. $D_0 = (0)_{9 \times 3}$, а $D_1 = E_{9 \times 9}$. Минимальное значение нормы матрицы коррекции $\langle e, u \rangle = 0.685$. Уравнение регрессии имеет вид $y = -0.021x_1 - 0.033x_2 + 0.962$.

Таким образом, исключение этих субъектов изменяет результат: второй коэффициент регрессии (при переменной экологических затрат) меняет знак, а значение нормы становится почти в два раза меньше. Это подтверждает предварительное заключение о наличии выбросов. Однако в соответствии с предлагаемым подходом мы будем учитывать данные по этим субъектам, но подвергнем их сглаживающему преобразованию.

По исходным данным построим линейную регрессию в метрике l_1 с левосторонним умножением информационной матрицы. В качестве матриц линейного преобразования данных возьмём

$$D_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1.02 & 9 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.66 & 7.8 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, D_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 0 \\ 0 & 1/\rho & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\rho & 1 \end{pmatrix},$$

где $\rho = 20.671$ (значение полиэдральной нормы l_∞ матрицы Z).

$$\text{Тогда } D_0 + D_1 Z = \begin{pmatrix} -0.71 & 4.51 & 5.34 \\ -1.10 & 9.81 & 1.12 \\ -0.81 & 3.91 & 6.19 \\ -0.88 & 10.41 & 2.65 \\ -0.85 & 1.81 & 6.28 \\ -0.77 & 1.41 & 8.71 \\ -0.93 & -1.59 & 3.86 \\ -0.74 & 10.31 & 2.52 \\ -0.84 & 6.31 & 3.72 \\ -0.71 & 8.24 & 6.00 \\ -1.36 & 1.81 & 1.73 \end{pmatrix}.$$

Минимальное значение нормы матрицы коррекции $\langle e, u \rangle = 0.849$. Уравнение регрессии имеет вид $y = -0.025x_1 - 0.072x_2 + 1.341$.

По исходным данным построим линейную регрессию в метрике l_1 с правосторонним умножением информационной матрицы. В качестве матриц линейного преобразования данных возьмём

$$D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{pmatrix}, D_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 4.32 \\ 0 & 0 & -0.2 \\ 0 & 0 & 5.17 \\ 0 & 0 & 1.63 \\ 0 & 0 & 5.26 \\ 0 & 0 & 7.70 \\ 0 & 0 & 2.84 \\ 0 & 0 & 1.50 \\ 0 & 0 & 2.70 \\ 0 & 0 & 6 \\ 0 & 0 & 0.71 \end{pmatrix}.$$

$$\text{Тогда } D_0 + ZD_2 = \begin{pmatrix} -0.63 & 3.7 & 4.36 \\ -1.02 & 9 & 0.01 \\ -0.73 & 3.1 & 5.22 \\ -0.80 & 9.6 & 1.65 \\ -0.76 & 1 & 5.31 \\ -0.69 & 0.6 & 7.77 \\ -0.85 & -2.4 & 2.87 \\ -0.66 & 9.5 & 1.51 \\ -0.76 & 5.5 & 2.73 \\ -0.66 & 7.8 & 6.01 \\ -1.28 & 1 & 0.72 \end{pmatrix}.$$

Минимальное значение нормы матрицы коррекции $\langle e, u \rangle = 0.896$. Уравнение регрессии имеет вид $y = -0.009x_1 - 0.0004x_2 + 0.943$.

Результаты расчётов показывают, что сглаживание данных позволяет сохранить общий вид тренда и в то же время улучшить значение критерия аппроксимации. Вычислительные эксперименты показали, что при решении проблемы выбросов левостороннее умножение информационной матрицы даёт значение нормы погрешности меньше, чем правостороннее умножение. Это подтверждает высказанное во введении положение о выборе линейных преобразований для проблем нормировки данных и выбросов. Конечно, выбор линейного преобразования носит эмпирический характер, что затрудняет объективное сравнение с другими подходами, которые также, по существу, носят эвристический характер (см., например, [5]). Здесь надо найти компромисс между требованиями устойчивости общего вида тренда (знаков коэффициентов зависимости) и уменьшения меры точности аппроксимации, что требует предварительного анализа данных.

Заключение

В данной статье была рассмотрена несобственная задача интерполяции и подход к её решению, основанный на линейном преобразовании информационной матрицы и матричной коррекции получающейся системы линейных уравнений.

В качестве меры аппроксимации использована норма матрицы l_1 , которая имеет вероятностное обоснование как метод максимального правдоподобия при двухстороннем экспоненциальном распределении шумов во входных и выходных данных и приводит к решению задач линейного программирования. Заметим, что данный подход в вычислительном плане оказывается проще по сравнению с полным методом наименьших квадратов, который приводит к более сложным вычислительным задачам нахождения собственных чисел и векторов матриц большой размерности даже без преобразования данных (как совместить его с преобразованием данных – вообще пока неясно).

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик, В. А. Методы коррекции несобственных задач и их применение к проблемам оптимизации и классификации / В. А. Горелик, О. В. Муравьева. – М.: ВЦ РАН, 2012. – 148 с.
2. Горелик, В. А. Численные методы коррекции несобственных задач линейного программирования и структурных систем уравнений / В. А. Горелик, В. И. Ерохин, Р. В. Печенкин. – М.: ВЦ РАН, 2006. – 150 с.
3. Горелик, В. А. Вопросы формирования оптимального портфеля акций российских компаний с вероятностной функцией риска / В. А. Горелик, Т. В. Золотова // Научно-исследовательский финансовый институт. Финансовый журнал. – 2016. – № 3. – С. 35-44.
4. Горелик, В. А. Решение задачи линейной регрессии с использованием методов матричной коррекции в метрике l_1 / В. А. Горелик, О. С. Трембачева (Баркалова) // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – Т. 56. – № 2. – С. 202-207.
5. Шибзуков, З. М. О принципе минимизации эмпирического риска на основе усредняющих агрегирующих функций / З. М. Шибзуков // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 476. – № 5. – С. 495-499.
6. Ширяев, А. Н. Основы стохастической финансовой математики. Т. 1. Факты. Модели / А. Н. Ширяев. – М.: ФАЗИС, 1998. – 512 с.
7. Gorelik, V. A. and Zolotova, T. V.; Parametric correction of inconsistent systems of linear equations and improper linear programming problems. IX Moscow International Conference on Operation Research (ORM2018): Proceedings, Vol. I. Moscow, MAKS Press, 2018. – Pp. 142-146.
8. Markovsky, I. Bibliography on total least squares and related methods. Statistics and its interface. 2010. Vol. 2. – Pp. 1-6.
9. Markovsky, I. and Van Huffel, S. Overview on total least squares methods. Signal Processing. 2007. Vol. 87. – Pp. 2283-2302.
10. Osborne, M. and Watson, J. An analysis of the total approximation problem in separable norms, and an algorithm for the total l_1 problem. SIAM J. Sci. Stat. Comput. 1985. Vol. 6. No. 2. – Pp. 410-424.
11. ROSEN J. B., PARK H., GLICK J. Total least norm formulation and solution for structured problems. SIAM Journal on Matrix Anal. Appl. 1996. Vol. 17. No. 1. – Pp. 110-128.
12. Регионы России. Социально-экономические показатели 2019 [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: https://gks.ru/bgd/regl/b19_14p/Main.htm (дата обращения: 02.03.2020).



Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В.

K. I. Kim, K. K. Kim, V. V. Veshkin

МЕТОД РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ

METHOD FOR CALCULATING TRANSITION PROCESSES IN THE CONTROL OF ASYNCHRONOUS MACHINE

Ким Константин Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.
Mr. Konstantin I. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); Russia, Sankt-Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Theoretical Foundations of Electrical Engineering», Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); Russia, Sankt-Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Вешкин Вадим Витальевич – ассистент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: toe@pgups.ru.

Mr. Vadim V. Veshkin – Assistant, Theoretical Foundations of Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); Russia, Sankt-Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: toe@pgups.ru.

Аннотация. В статье изложен графоаналитический метод расчёта асинхронной машины при пусковых режимах и внезапном набросе нагрузки. Приводится алгоритм расчёта вращающегося электромагнитного момента при известных параметрах нагрузки. Представлены результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных, полученных при генераторной нагрузке машины постоянного тока. Показаны осциллограммы тока статора, скорости и ток якоря нагруженной машины для режимов пуска и наброса нагрузки. Приведены расчётные скоростные характеристики, с достаточной точностью подтверждаемые опытными результатами. Также рассмотрены режимы торможения асинхронного двигателя механической нагрузкой и разгон двигателя при пуске при различных параметрах холостого хода. Предложенный метод позволяет рассматривать переходные взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы и определить как врачающий момент, так и скорость ротора. Метод рассчитан на анализ переходных процессов асинхронных машин нормальной конструкции, но применим для некоторых типов специальных машин, например, в двигателях с глубоким пазом.

Summary. The article describes the graphoanalytical method for calculating an asynchronous machine under starting conditions and a sudden load surge. An algorithm for calculating the rotating electromagnetic moment with known load parameters is presented. The results of comparing the calculated and experimental data obtained at the generator load of a DC machine are presented. Oscillograms of stator current, speed and armature current of a loading machine for start-up and load surge modes are shown. The calculated speed characteristics are given, with sufficient accuracy confirmed by experimental results. The authors also consider the braking modes of an induction motor with a mechanical load and the acceleration of the motor during start-up at various idling parameters. The proposed method allows us to consider transient, interconnected electromagnetic and mechanical processes and determine both the torque and rotor speed. The method is designed for the analysis of transients of normal-design asynchronous machines, but is applicable for some types of special machines, for example, in deep groove motors.

Ключевые слова: асинхронная машина, переходный режим, метод расчёта.

Key words: asynchronous machine, transient mode, calculation method.

УДК 621.3.019

Введение. В практических расчётах переходных процессов в электроприводах с асинхронной машиной при необходимости определения движения ротора пользуются общезвестным соотношением для вращающих моментов, предложенным М. Клоссом.

При инженерных расчётах переходных характеристик асинхронной машины последовательно рассматриваются дифференциальные уравнения для переходных токов, вращающих электромагнитных моментов и уравнение для определения ускорения ротора. С практической точки зрения наиболее важными являются характеристики скорости и вращающих моментов. Вопрос о токах приобретает практический интерес главным образом при рассмотрении коммутационных переходных процессов.

Описание метода исследования. Рассмотрим приведённое в [1] уравнение:

$$Ra_n^2 + (Q - H)a_n + (N - M_c) = 0. \quad (1)$$

В уравнении (1) величины R , Q и N зависят как от скольжения, так и от коэффициента затухания роторной обмотки. Однако независимо от значения этих величин и ускорения всегда соблюдается условие

$$\frac{N - M_c}{Q - H} \ll 1.$$

Поэтому при пользовании обычными формулами для корней квадратного уравнения расчёт подкоренного выражения приходится вести с учётом достаточно большого количества знаков во избежание получения неверных результатов. Это можно исключить, если применять тригонометрический способ решения. При этом ускорение определяется с помощью одной из следующих формул:

$$a_n = \pm \sqrt{\frac{N - M_c}{R}} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{2\sqrt{R(N - M_c)}}{Q - H} \quad (2)$$

при отрицательном $\frac{N - M_c}{R}$ и $\pm \frac{Q - H}{R}$ или

$$a_n = \mp \sqrt{\frac{N - M_c}{R}} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad \sin \varphi = \frac{2\sqrt{R(N - M_c)}}{Q - H} \quad (3)$$

при положительном $\frac{N - M_c}{R}$ и $\pm \frac{Q - H}{R}$.

В соответствии с уравнением (1) выражение для вращающих электромагнитных моментов можно представить в следующем виде:

$$M = Ra_n^2 + Qa_n + N. \quad (4)$$

Причём величины R , Q и N определяются таким же образом, как и при расчёте ускорения ротора.

Таким образом, можно составить следующий алгоритм расчёта переходных процессов:

1. Определяются значения параметров и моментов нагрузки в относительных единицах; инерционная постоянная системы выражается в электрических радианах.

2. Рассчитываются величины R , Q и N согласно выражениям [1]



$$\begin{aligned}
 R &= 0,35M_{n0}t^2 \left\{ t^2 - \frac{4t}{\rho_2(1+k^2)} + \frac{6-2k^2}{\rho_2^2(1+k^2)^2} + \frac{e^{-\rho_2 t}}{\rho_2^2(1+k^2)^2} [(6k - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2}{k}) \sin(s_{n_0} t) - (6-2k^2) \cos(s_{n_0} t)] \right\}, \\
 Q &= -\frac{0,83R}{t^2} - 0,58M_{n0} \left\{ -0,5t^2 + \frac{(1-k^2)2t}{\rho_2 k(1+k^2)} - \frac{2-6k^2}{\rho_2^2 k(1+k^2)^2} - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{e^{-\rho_2 t}}{\rho_2^2(1+k^2)^2} (6-2k^2) \sin(s_{n_0} t) + (6k - \frac{2}{k}) \cos(s_{n_0} t) \right\}, \\
 N &= M_{n0}[1 - e^{-\rho_2 t}(\delta'_n \sin(s_{n_0} t) + \delta''_n \cos(s_{n_0} t))],
 \end{aligned} \tag{5}$$

при этом считают $\delta'_n = 0$, $\delta''_n = 0$, если переходный процесс начинается с некоторого установившегося режима.

3. По формулам (2) или (3) определяют ускорение при различных значениях t , причём расчёт ведут до такого $t_m < \sqrt{\frac{\pi}{3a_n}}$, пока отклонение ускорения от среднего его значения на данном участке (a_n) не превысит наперёд заданной величины.

4. По формуле (4) рассчитывают врачающий электромагнитный момент.

Для перехода к следующему участку определяют коэффициенты δ''_n и δ'_n . Первый из них находится по формуле

$$\delta''_n = \frac{M_{n0} - M_n}{M_{n0}},$$

где M_n и M_{n0} – соответственно переходный и статический моменты на границе участков n и $n+1$; δ'_n – коэффициент, определяемый из условия равенства моментов, получаемых по формуле (4) при n и $n+1$, в точке $t_m - \Delta t$, здесь Δt – достаточно малый промежуток времени. При малых значениях начального скольжения δ'_n можно не учитывать.

В дальнейшем расчёт продолжают в такой же последовательности.

Необходимо отметить, что в тех случаях, когда наблюдается незначительное изменение ускорения, последнее можно рассматривать как параметр, что делается относительно скорости в обычных расчётах переходных процессов.

Анализ точности метода. Для выяснения точности изложенного способа расчёта переходных процессов было произведено экспериментальное рассмотрение следующих режимов: внезапное приложение механической нагрузки при $s_0 = 0,0067$ и разгон двигателя при пуске.

В качестве экспериментальной машины был взят асинхронный двигатель со следующими паспортными данными и параметрами (параметры даны в относительных единицах, $R_{баз} = 26,8$ Ом): тип НОР 46/4, $P = 3,85$ кВт, $U_1 = 220/380$ В, $I_1 = 14/8,2$ А, $n = 1435$ мин⁻¹, $\cos \varphi_n = 0,8$, $U_2 = 105$ В, $I_2 = 18$ А, $r_1 = 0,041$, $r_2 = 0,052$, $x_{1\sigma} = 0,077$, $x_{2\sigma} = 0,112$, $x_{12} = 1,7$, $gD^2 = 0,18$ кгм².

В качестве нагруженной машины в режиме внезапного приложения нагрузки была использована машина постоянного тока. Причём параметры её составляли:

- сопротивление якорной обмотки (R_a) – 3,2 Ом;
- сопротивление обмотки возбуждения (r_b) – 740 Ом;
- $gD^2 = 0,50$ кгм².

Режим внезапного приложения нагрузки осуществлялся путём замыкания якорной обмотки машины постоянного тока при повышенном постоянном возбуждении ($i_b = 0,4$ А) через небольшое внешнее сопротивление ($R_b = 1,16$ Ом). Причём для увеличения постоянных времени обмоток экспериментальной машины в цепь статора было включено индуктивно-активное сопротивление $Z = 0,6 + j6,6$ Ом.

Таким образом, параметры экспериментальной машины составили:

- в режиме наброса нагрузки $x'_1 = 0,424$; $\rho_1 = 0,148$; $\rho_2 = 0,137$; $\sigma = 0,21$;
- в режиме пуска $x'_1 = 0,178$; $\rho_1 = 0,23$; $\rho_2 = 0,288$; $\sigma = 0,1$.

При этом инерционные постоянные соответственно составляли:

- в первом случае – 252 эл. рад.,
- во втором – 65 эл. рад.

В каждом из рассматриваемых случаев с помощью осциллографа записывались ток в одной из фаз статора (i_a) и скорость вращения ротора (ω). Кроме того, в первом случае записывался ток якоря нагрузочной машины (J_y). При этом кривая скорости определялась с помощью тахогенератора, вал которого имел жёсткое соединение с валом испытуемой машины.

На рис. 1 приведены осциллограммы величин i_a , ω и J_y для первого режима; на рис. 2 – осциллограммы величин i_a и ω для второго режима.

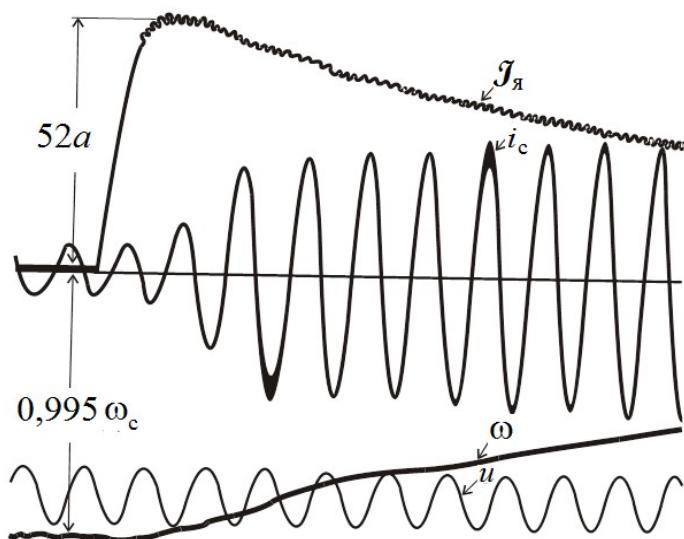


Рис. 1. Осциллограммы тока статора, скорости и ток якоря нагрузочной машины для режима наброса нагрузки

На рис. 3 представлены опытные кривые потерь холостого хода нагрузочной машины, на рис. 4 – расчётная кривая моментов нагрузки в относительных единицах (при $M_{баз.} = 34,4 \text{ Вт}\times\text{с}$), полученная на основании осциллограммы якорного тока и кривых потерь холостого хода нагрузочной машины.

Для обоих режимов рассчитывалась характеристика скорости. Результаты расчётов представлены на рис. 5 и 6 в виде значков (x). На тех же рисунках для сравнения показаны опытные кривые скорости из рис. 1 и 2.

Сравнение расчётных кривых скорости с опытными (см. рис. 5 и 6) показывает, что результаты, полученные с помощью расчёта, достаточно хорошо совпадают с действительными.

Кроме этих опытов с аналогичной целью были рассмотрены два примера: торможение асинхронного двигателя механической нагрузкой и разгон двигателя при пуске при следующих параметрах и данных режима: $\rho_1 = \rho_2 = 0,0634$; $x'_1 = 0,158$; $\sigma = 0,051$; $U_{m1} = 1$; $a = \mp \frac{1}{48\pi}$; начальное скольжение при торможении $s_0 = 0,01$; начальное скольжение при пуске $s_0 = 1$.

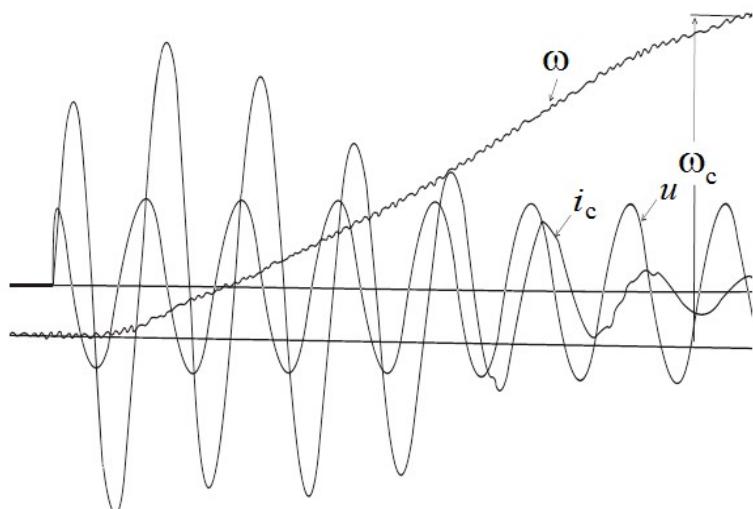


Рис. 2. Осциллограммы тока статора, скорости и ток якоря нагрузочной машины для режима пуска

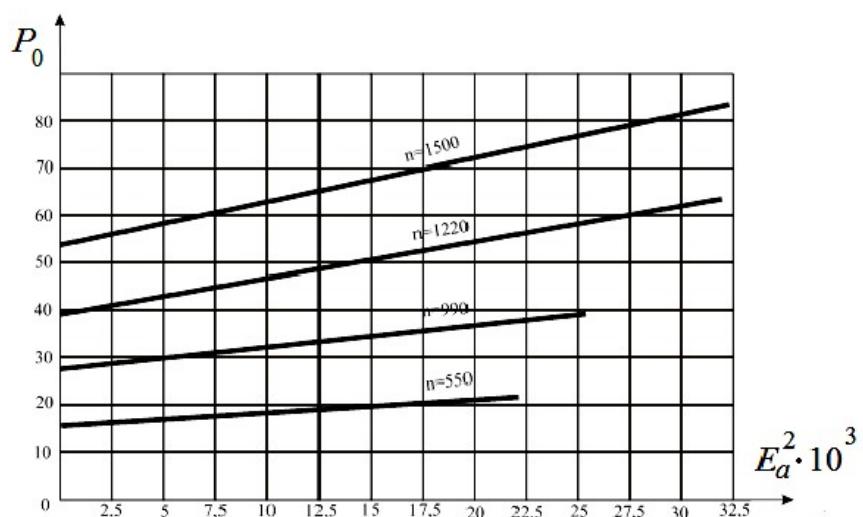


Рис. 3. Опытные кривые потерь холостого хода нагрузочной машины



Рис. 4. Расчётная кривая моментов нагрузки

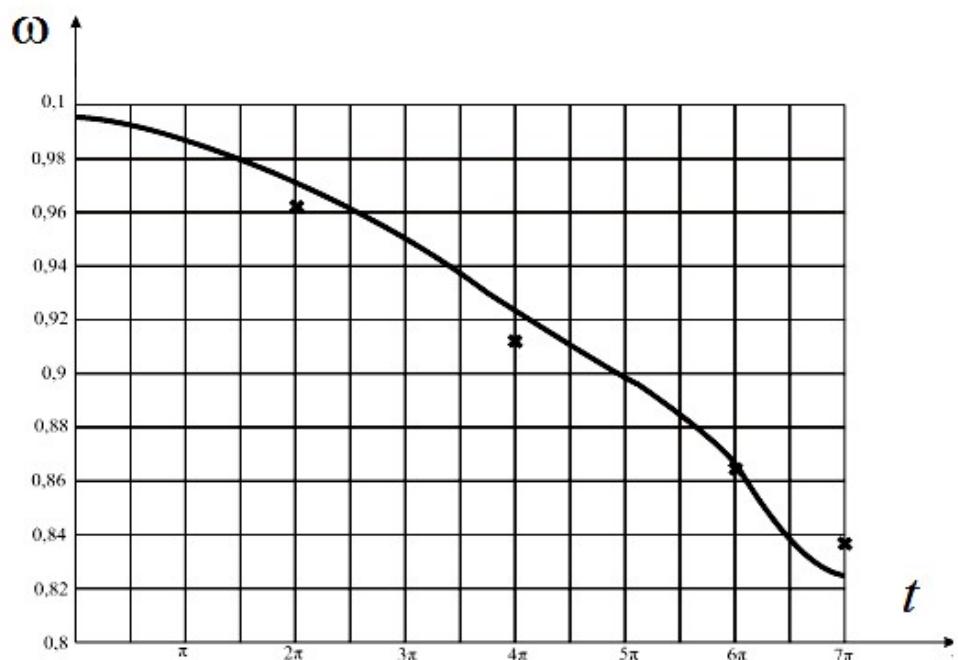


Рис. 5. Изменение скорости при набросе нагрузки

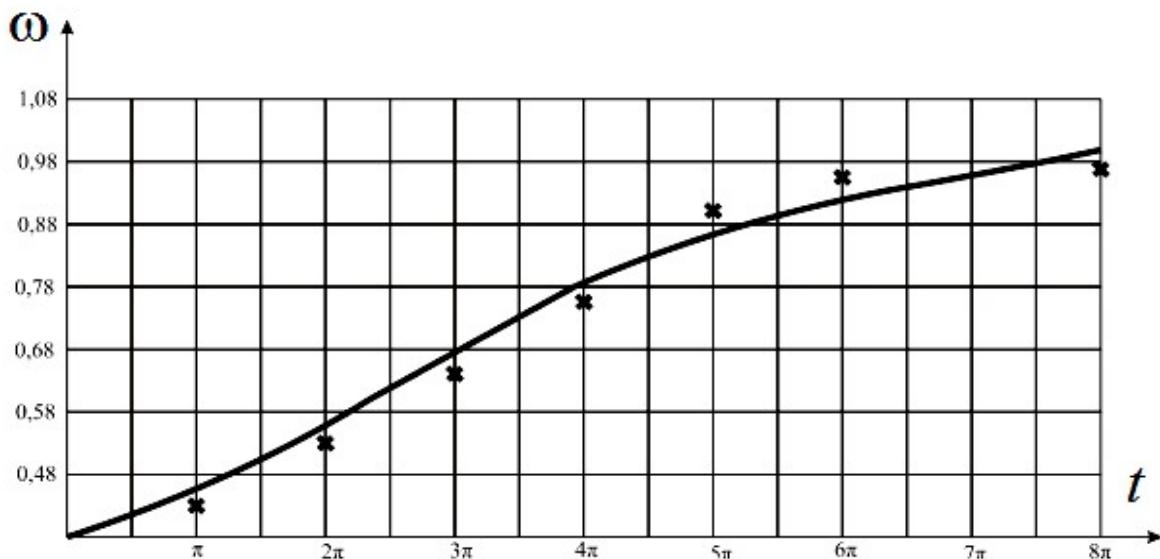


Рис. 6. Изменение скорости при пуске

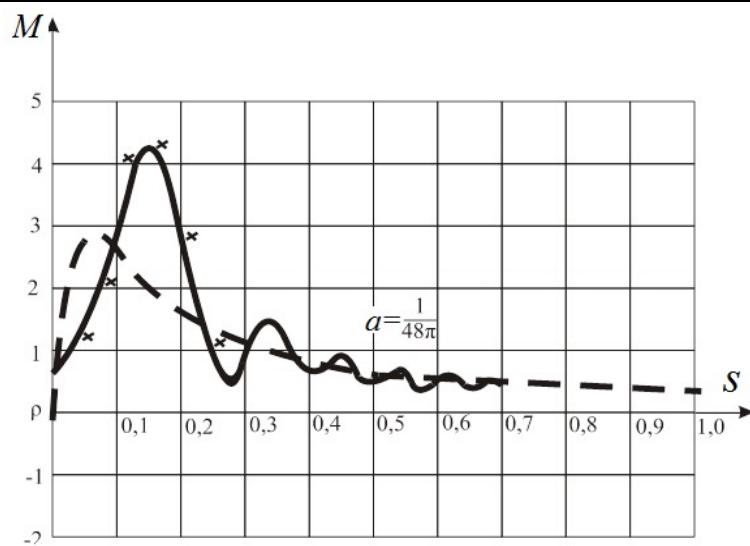


Рис. 7. Сравнение расчётных данных в режиме разгона

Сопоставление расчётных данных (см. рис. 7 и 8) с кривыми моментов [2] показывает, что формула (4) даёт вполне приемлемые результаты.

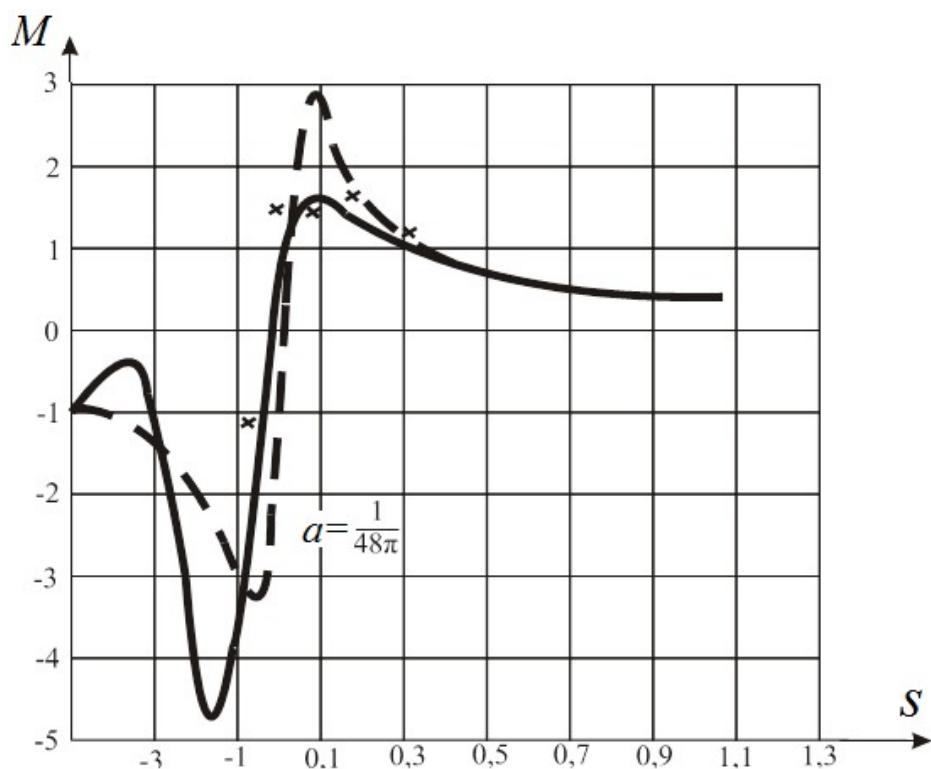


Рис. 8. Сравнение расчётных данных в режиме торможения

Выводы.

Изложенный метод расчёта переходных процессов при своей относительной простоте даёт вполне удовлетворительные для практических целей результаты.

Данный метод рассматривает переходные электромагнитные и механические процессы в их взаимной связи.

Формулы (1), (3), (4), (5), лежащие в основании метода, позволяют одновременно получить как врачающий момент, так и скорость ротора.

Метод может быть применён при анализе переходных процессов как в машинах нормальной конструкции, так и в некоторых типах специальных машин, например в двигателях с глубоким пазом. В области, где необходимо учитывать изменение скорости, апериодическая составляющая статорного тока незначительна, благодаря чему эффект вытеснения тока в указанной области практически не играет роли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Характеристики асинхронной машины в режимах регулирования скорости / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 25-36.
2. Казовский, Е. Я. Обобщённое рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах / Е. Я. Казовский // Электросила. – 1945. – № 2-3.
3. Ким, К. К. Влияние скорости ротора асинхронной машины на характер протекания переходных электромагнитных процессов / К. К. Ким, К. И. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 28-36.
4. Иванов, С. Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1 (26). – С. 4-8.
5. Kim, K. K. Heat-generating electromechanical converter / K. K. Kim, S. N. Ivanov, I. M. Karpova // Russian Electrical Engineering. – September 2008. – Volume 79. – Issue 9. – P. 508-513.
6. Kim, K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters // Russian Electrical Engineering. – August 2009. – Volume 80. – Issue 8. – P. 459-465.
7. Kim K. I., Kim K. K. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor // Elektrichestvo. – 1989. – Issue 1. – P. 10-22.



Левицкий Е. Е., Власьевский С. В.

E. E. Levitsky, S. V. Vlasevsky

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ В АППАРАТЕ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ELECTRICAL DRIVE IN THE APPARATUS FOR OSTEOSYNTHESIS

Левицкий Евгений Евгеньевич – аспирант кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, ведущий инженер-метролог АО «ННК-Хабаровский НПЗ» (Россия, Хабаровск). E-mail: levitskiy.e@rambler.ru.

Mr. Evgeniy E. Levitsky – Post-Graduate Student, Department of «Electrotechnics, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University, Lead Metrology Engineer of «NNK-Khabarovsk Oil Refinery» (Russia, Khabarovsk). E-mail: levitskiy.e@rambler.ru.

Власьевский Станислав Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Mr. Stanislav V. Vlasevsky – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of «Electrotechnics, Electronics and Electromechanics», Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: vlas@festu.khv.ru.

Аннотация. Статья посвящена разработке системы автоматического управления электрическим приводом, применяемой в аппарате для остеосинтеза, основанном на принципе закрепления костных отломков при помощи колец и спиц, проходящих через кольца и костные отломки, и выбранном в качестве объекта управления [1]. Изложены принципы автоматического управления электрическим приводом по отклонению управляемой величины от требуемого значения. Это возможно осуществить путём введения в структуру аппарата для остеосинтеза индукционных датчиков для определения положения костных отломков и спиц, генератора магнитного поля и измерительного блока. Результатом такого построения является отказ от использования упрощённых датчиков положения в электрическом приводе, возможность автоматической работы электрического привода и постоянного контроля за положением костных отломков и спиц, что недоступно с использованием традиционных методов лечения переломов с использованием рентгенограмм. Это ведёт к улучшению условий регенерации костных тканей без осложнений в виде неправильного сращивания костных отломков. Работа объекта для управления основана на автоматическом управлении штоками электрического привода, которые в итоге перемещают костные отломки. Перемещение осуществляется по предварительно созданной программе управления, которая изменяется в режиме реального времени исходя из текущих координат костных отломков и спиц.

Summary. The article focuses on automatic control system of electrical drive design of apparatus for osteosynthesis based on the principle of bone fragments fixation with rings and wires inserted through rings and bone fragments and chosen as control object. It outlines the principles of automatic control of electrical drive by deviation of controlled variable from required value. This is possible through adding movement tracking inductive sensors for bone fragments and wires, magnetic field generator and measuring unit in structure of the apparatus for osteosynthesis. The result is in abandoning of simplified position sensors in electrical drive, possibility of automatic operation of electrical drive and permanent control on position of bone fragments and wires, which is unable to be reached using conventional methods of bone fractures treatment with roentgenograms. This leads to improving quality of bone tissue regeneration conditions without such complication as bad fusion of bone fragments. Operation of control object is based on automatic control of rods of electrical drive which finally shifts bone fragments. This shift is carried out by previously set program of bone fragments movement, which changes in real time based on the last coordinates of bone fragments and wires.

Ключевые слова: система автоматического управления, электромагнитное позиционирование, электрический привод, компьютерная навигация.

Key words: automatic control system, electromagnetic tracking system, electrical drive, computer navigation.

УДК 62-523

Значимый недостаток существующих методов лечения переломов с использованием аппаратов для остеосинтеза – отсутствие системы автоматического управления, отслеживающей процесс лечения переломов и управляющей электрическим приводом в режиме реального времени.

В настоящее время существует несколько путей автоматизации процесса лечения переломов:

- пассивная компьютерная навигация, используемая в таких аппаратах, как Opto-CUV, Taylor Spatial Frame (см. рис. 1), Ilizarov Hexapod Apparatus (IHA), Smart Correction Computer Assisted Circular Hexapod Fixator, TL-HEX [3; 5; 8; 9; 10]. Данные аппараты называются гексаподами (греч. hex – шесть) из-за шести стоек, соединяющих две платформы;

- электрический привод, использование которого было предложено Г. А. Илизаровым ещё в середине 1980-х годов, однако не получило распространения, поскольку в этом аппарате для остеосинтеза нет обратной связи. Поэтому лечение переломов в настоящее время осуществляется тем же путём, что и в ручных аппаратах для остеосинтеза [6].

Программное обеспечение для пассивной компьютерной навигации (см. рис. 2) позволяет рассчитывать необходимое перемещение узлов аппарата, однако при этом данные узлов аппаратов для остеосинтеза и костных отломков (длины и углы) измеряются вручную и вводятся в программу вместе с рентгеновскими снимками повреждённой конечности, при этом не отслеживается перемещение костных отломков и спиц в режиме реального времени.



Рис. 1. Аппарат Taylor Spatial Frame (TSF)

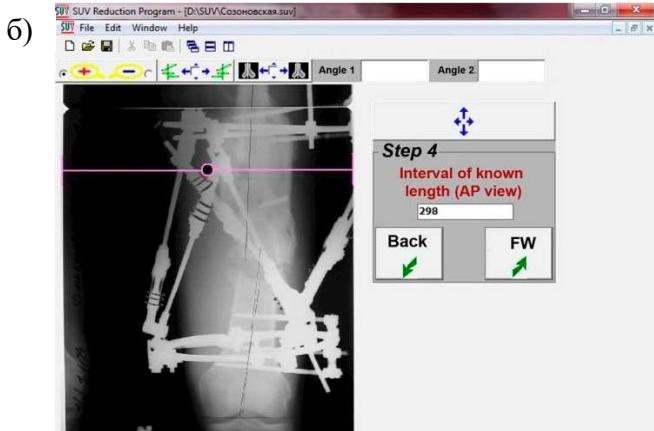
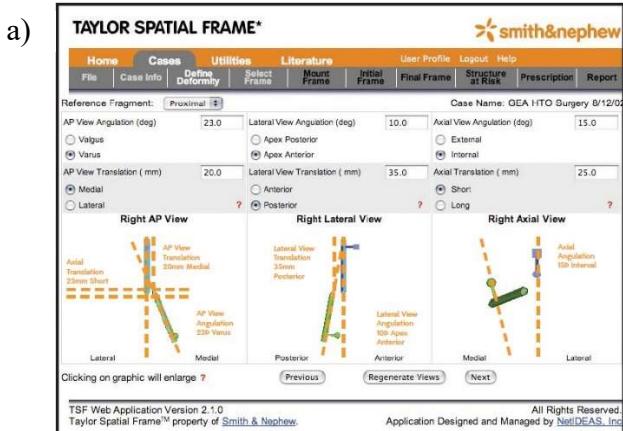


Рис. 2. Интерфейс программ TSF (а) и Opto-CUV (б)

Такой подход в построении аппаратов может привести к человеческой ошибке при проведении замеров и вводе данных, некачественному сращиванию костных отломков, повреждению сосудов и нервов, перелому костного регенерата, вторичному смещению отломков [2]. Также растёт лучевая нагрузка на пациента вследствие повторных рентгенологических обследований. При этом хирург должен обладать большим опытом в лечении переломов для работы с данными программами.

Предлагаемая система автоматического управления позволит автоматизировать работу электрического привода для восстановления целостности кости без осложнений. Поэтому путь улучшения качества лечения переломов с помощью предлагаемой САУ является актуальным в настоящее время.

Функциональная схема системы автоматического управления аппаратом для остеосинтеза. На рис. 3 представлена функциональная схема системы автоматического управления (САУ) аппаратом для остеосинтеза с принципом управления по отклонению управляемой величины от требуемого значения. Принцип управления по отклонению управляемой величины от требуемого значения состоит в сравнении измеренной управляемой величины с задающим воздействием, при этом отклонение преобразуется в управляющее воздействие, которое стремится устранить отклонение. В данной системе объектом управления (ОУ) является аппарат для остеосинтеза, в котором находятся индукционные датчики для определения положения костных отломков и индукционные датчики для определения положения спиц (ИД), следящие за перемещением костных отломков и спиц в процессе лечения, а управляемой величиной $\beta(t)$ – единица перемещения штока аппарата для остеосинтеза.

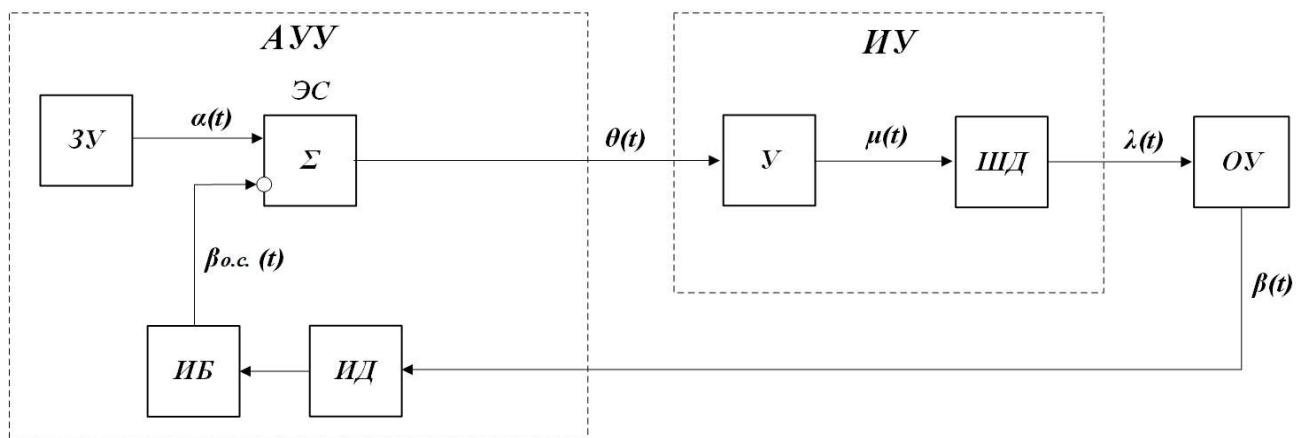


Рис. 3. Функциональная схема САУ с принципом управления по отклонению

В состав данной САУ входят следующие элементы:

1. Задающее устройство (ЗУ), которое подаёт задающее воздействие $\alpha(t)$ на элемент сравнения (ЭС).

2. Индукционные датчики для определения положения костных отломков и индукционные датчики для определения положения спиц (ИД), измерительный блок (ИБ), предназначенный для оцифровывания электрических сигналов с каждого датчика, которые подключаются к выходу объекта управления (ОУ); индукционные датчики измеряют управляемую величину $\beta(t)$. Измеренное значение данной величины $\beta_{o.c.}(t)$ подаётся на элемент сравнения (ЭС).

3. В элементе сравнения происходит сравнение $\beta_{o.c.}(t)$ с задающим воздействием $\alpha(t)$ и определяется отклонение управляемой величины $\theta(t)$ от требуемого значения.

4. Сигнал отклонения $\theta(t)$ усиливается усилителем (У) и в качестве управляющего воздействия $\mu(t)$ в виде импульсов напряжения подаётся на вход шагового двигателя (ШД).

5. Далее по каналу управления угловое перемещение ротора шагового двигателя $\lambda(t)$ преобразуется в перемещение штоков аппарата для остеосинтеза, что в свою очередь вызывает перемещение спиц и скреплённых ими костных отломков.

Задающее устройство (ЗУ), индукционные датчики для определения положения костных отломков и индукционные датчики для определения положения спиц (ИД), измерительный блок (ИБ) и элемент сравнения (ЭС) образуют автоматическое управляющее устройство (АУУ). Усилитель

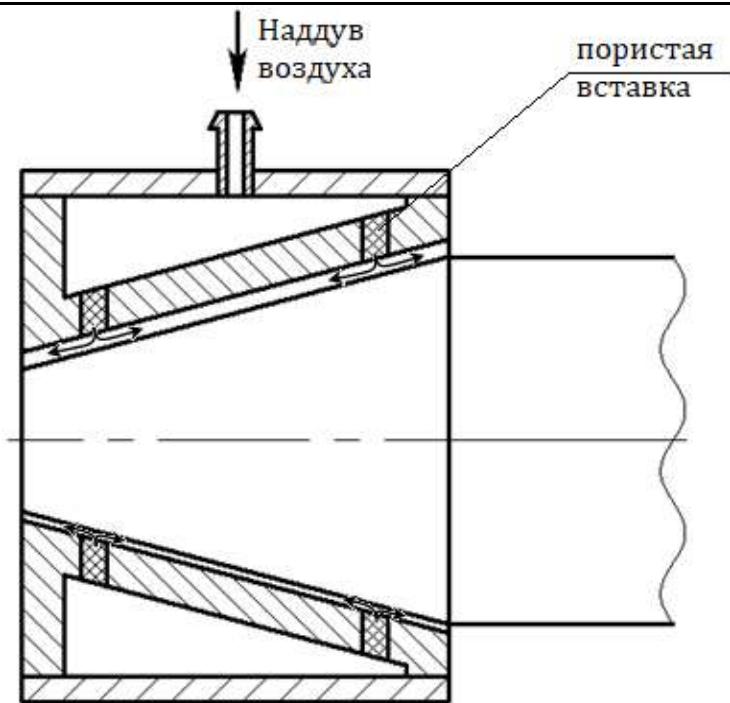


Рис. 2. Схема течения газовой смазки в малом коаксиальном зазоре
переменной толщины

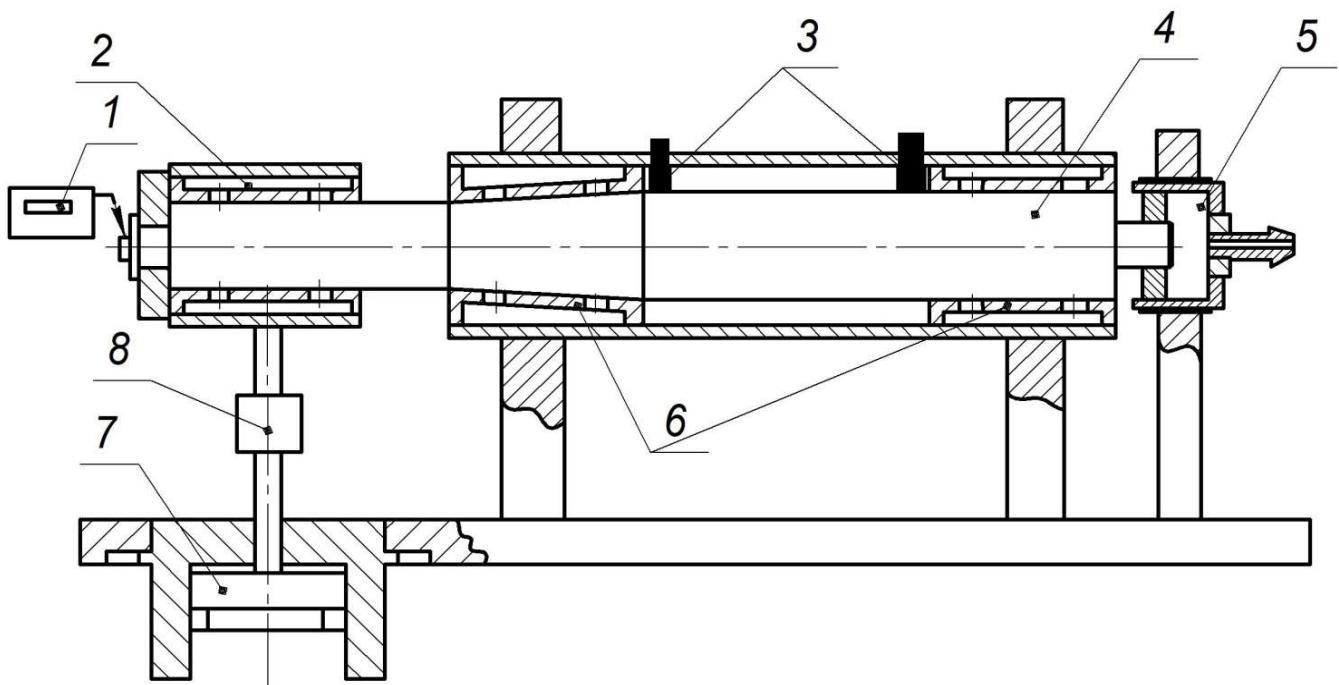


Рис. 3. Экспериментальный стенд для определения характеристик конусного газового подшипника: 1 – измеритель частоты вращения; 2 – нагруженный подшипник;
3 – индуктивные датчики; 4 – ротор; 5 – приводная турбина; 6 – опорные подшипники;
7 – нагружающее устройство; 8 – датчик силы



ления (аппарате для остеосинтеза), с помощью которого происходит перемещение костных отломков $\beta(t)$ на величину, заданную ПК. По мере лечения перелома происходит сращивание костных отломков, при котором положение костных отломков и спиц изменяется, что в свою очередь приводит к изменению значений координат индукционных датчиков для определения положения спиц и индукционных датчиков для определения положения костных отломков. По мере лечения процесс регулирования длин штоков шаговых двигателей повторяется.

Преимуществами использования электромагнитного позиционирования являются: отказ от датчиков положения электрического привода, достаточная точность измерения координат датчиков, имеющих до 6 степеней свободы, работа системы определения координат без прямой видимости между её элементами, минимальное воздействие окружающих предметов на магнитное поле.

Выводы

1. Предложенная система автоматического управления с использованием электромагнитного позиционирования позволит в автоматическом режиме регулировать процесс сращивания костных отломков при помощи электрического привода и индукционных датчиков для определения положения костных отломков и спиц.

2. Целесообразной областью применения предлагаемой системы автоматического управления являются травматология и ортопедия в части регенерации костной ткани при переломах конечностей или удлинения (укорочения) конечностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2706036 Российская Федерация, МПК A61B 17/66 A61B 17/68. Аппарат для остеосинтеза: № 2018147690: заявл. 28.12.2018; опубл. 01.11.2019 / Власьевский С. В., Левицкий Е. Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС). – 2 с.
2. Остеосинтез: руководство для врачей / под ред. С. С. Ткаченко. – Л.: Медицина, 1987. – 272 с.
3. Патент № 105821 Российская Федерация, МПК A61B 17/00. Аппаратно-программный комплекс Орто-СУВ: № 2010118967/14: заявл. 11.05.2010; опубл. 27.06.2011 / Павлов М. О.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Орто-СУВ». – 2 с.
4. Bladen J. S., Anderson A. P. Surgical navigation. Patent № 6522907. 2003.
5. Computer programmable circular external fixator system. Patent № WO 2014/163591. 2014.
6. Ilizarov G. A., Predein A. P., Bykov V. M. Automatic compression-distraction apparatus. Patent № 4,615,338. 1986.
7. Raab F., Blood E., Steiner T., Jones H. Magnetic position and orientation tracking system // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1979, vol. 15 (5), pp. 709-718.
8. Seide K., Wolter D., Kortmann H. R. Fracture reduction and deformity correction with the hexapod Ilizarov fixator // Clin Orthop, 1999, 363(6), pp. 186-195.
9. Taylor H., Taylor C. Spatial frame / Patent № WO 96/26678. 1996.
10. General Principles of TL-HEX Frame Assembly // <http://web.orthofix.com/sites/Country/Intl/Documents/TL-1405-OPT-E0.pdf>.

Ким К. К., Просолович А. А., Иванов С. Н.

АЛГОРИТМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В СОВМЕЩЁННОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ

Ким К. К., Просолович А. А., Иванов С. Н.

K. K. Kim, A. A. Prosolovich, S. N. Ivanov

АЛГОРИТМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СОВМЕЩЁННОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ

ALGORITHM FOR CFD-MODELING OF THE HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS IN A COMBINED ELECTRICAL DEVICE

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехники и теплоэнергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., дом 9, тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Department «Electrical Engineering and Heat Power Engineering» Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; тел. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

Mr. Alexey A. Prosolovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Computer-Aided Design Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(914)185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье изложен алгоритм комплексного подхода к решению совмещённых мультифизических задач на примере совмещённого электротехнического устройства. Объект исследования представлен электромеханическим преобразователем переменного тока на основе асинхронной машины. Особенностью объекта является преобразование электрической мощности в совмещённые тепловую и механическую. CFD-моделирование процесса тепломассопереноса включает три последовательных этапа. Приведены основные теоретические положения связанных электромагнитного, теплового и гидравлического расчётов. В основу электромагнитного расчёта положены уравнения Максвелла, реализованные в программе Elcut. При решении задач гидродинамики использована трёхслойная модель турбулентного потока Шлихтинга. Расчёт средней теплоотдачи выполнен с использованием обобщённой зависимости в виде модифицированного М. А. Михеевым критерия Нуссельта. Результаты CFD-моделирования в программном комплексе SolidWorks приведены в виде поля скоростей жидкости в зонах теплообмена и массопереноса.

Summary. The article describes an algorithm for a complex approach to solving combined multiphysical problems on the example of a combined electrical device. The object of research is represented by an Electromechanical AC Converter based on an asynchronous machine. A feature of the facility is the conversion of electrical power into combined thermal and mechanical power. CFD-modeling of the heat and mass transfer process includes 3 successive stages. The main theoretical provisions of the associated electromagnetic, thermal and hydraulic calculations are given. The electromagnetic calculation is based on Maxwell's equations implemented in the Elcut program. When solving hydrodynamic problems, a 3-layer model of turbulent Schlichting flow is used. The calculation of the average heat transfer was performed using a generalized dependence in the form of the Nusselt criterion modified by M. A. Mikheev. The results of CFD-modeling in the SolidWorks software package are presented in the form of a fluid velocity field in the heat exchange and mass transfer zones.



Ключевые слова: объект моделирования, электромагнитный расчёт, теплоотдача, гидродинамика.

Key words: modeling object, electromagnetic calculation, heat transfer, hydrodynamics.

УДК [62-112+624.01]:004.9

Введение. Применение CFD-технологии (Computational Fluid Dynamics) позволяет моделировать и исследовать различные потоковые процессы, связанные с мультифизическим энергетическим обменом. Такой тип задач возникает при проектировании новых типов специальных электротехнических устройств (СЭУ), использующих преобразование электромагнитной мощности в тепловую и механическую. Общий алгоритм CFD-технологии требует формирования и дискретизации геометрии модели, задания начальных и граничных условий дифференциальных уравнений, их численного расчёта, анализа и отображения результатов.

В качестве объекта исследования рассмотрены совмещённые электротехнические устройства, конструкция и принцип действия которых приведены в [1–3]. Основным источником электромагнитной мощности в них является намагничивающая сила, создаваемая током обмотки статора базового электромеханического преобразователя.

Теоретические основы исследования. Применительно к объекту исследования CFD-моделирование процесса тепломассопереноса включает три последовательных этапа: электромагнитный расчёт, тепловой и гидравлический.

Первый этап моделирования процессов преобразования мощности в СЭУ базируется на классических уравнениях Максвелла. В них входят основные электромагнитные характеристики:

- напряжённость и индукция магнитного поля;
- напряжённость и смещение электрического поля;
- плотность электрического тока.

На этом этапе электромагнитный расчёт выполняется с учётом конструктивных особенностей и физико-химических особенностей материалов СЭУ по типовым методикам на основе фундаментальной теории электромагнитного поля [4; 5]. Классические уравнения представляются в виде

$$\begin{aligned} \text{rot}H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}, & \text{rot}E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, & \text{div } B &= 0, & \text{div } D &= \rho, & B &= \mu H, \\ D &= \epsilon E, & J &= \gamma E, \end{aligned}$$

где J – вектор плотности электрического тока, А/м²; H , E – соответственно вектора напряжённости магнитного, А/м, и электрического, В/м, полей; D – смещение электрического поля, Кл/м²; B – магнитная индукция, Тл; γ – удельная электропроводность среды, Ом⁻¹·м⁻¹; ρ – плотность стационарного электрического заряда, Кл/м³; ϵ – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; μ – магнитная проницаемость, Гн/м.

Для низкочастотных (10...500 Гц) устройств первое уравнение в системе упрощается:

$$\text{rot}H = J.$$

При решении системы уравнений Максвелла используются дополнительные функции скалярного ϕ и векторного A магнитных потенциалов.

Векторный магнитный потенциал A определяется выражением

$$\text{rot}A = B.$$

В плоскопараллельной постановке вектор A находится в плоскости, направленной перпендикулярно вектору B . Для замкнутых токов в стационарных полях вектор A непрерывен:

$$\text{div}A = 0.$$

Плотность токов проводимости включает плотность вихревых токов J_B и плотность сторонних токов J_{TC} :

$$J = J_B + J_{TC}.$$

Если использовать понятие векторного магнитного потенциала для среды с нелинейными магнитными характеристиками и учитывать вихревые токи, то уравнение, описывающее в векторной форме неоднородное магнитное поле для распределённых переменных токов, произвольно изменяющихся во времени, можно представить в виде

$$\text{rot} (\mu^{-1} \text{rot} A) = -\gamma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) + J_{CT}.$$

Если принятая постоянная магнитная проницаемость среды, уравнение поля упрощается:

$$\text{div grad} A = \mu \gamma \frac{\partial A}{\partial t} - \mu J_{TC}$$

или может быть представлено в виде уравнения диффузии:

$$\nabla^2 A = \mu \gamma \frac{\partial A}{\partial t} - \mu J_{TC}.$$

Для синусоидально изменяющихся токов последнее уравнение можно представить в комплексной форме (уравнение Гельмгольца):

$$\nabla^2 A - j\omega \mu \gamma A = -\mu.$$

При моделировании электромагнитных полей при наличии объёмных электрических зарядов используется уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 A = -\mu J.$$

В области существования поля, где токи, создающие объёмные заряды, отсутствуют, последнее выражение принимает вид уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 A = 0.$$

Решением уравнений является распределение векторного магнитного потенциала в области исследования. Эти уравнения необходимы для расчёта поля, но к ним необходимо добавить математические описания объекта исследования с выделением границ всех расчётных областей с отличающимися физическими характеристиками и граничные условия на внешних границах векторов магнитного поля. Приведённые уравнения совместно с начальными и граничными условиями составляют основу электромагнитного расчёта, реализуемого в современных программах, предназначенных для моделирования электрических и магнитных полей в электротехнических устройствах. Применительно к рассматриваемому варианту СЭУ электромагнитный расчёт выполнен в полевой постановке с использованием программного пакета Elcut. На рис. 1 и 2 приведены распределения векторного магнитного потенциала A и результирующей индукции B , а также нормальной B_n и тангенциальной B_t составляющих индукции для одного момента времени.

Средние значения индукции в зависимости от длины и толщины неподвижного нагревательного элемента (ННЭ), полученные с использованием программы оцифровки [6], показаны на рис. 3. Анализ гиперповерхности позволяет определить размерные отношения ННЭ, соответствующие заданному значению магнитной индукции ($B = 0,5$ Тл). Для приведённого варианта СЭУ получены значения $\Delta_{\text{ННЭ}} = 3,1$ мм, $L_{\text{ННЭ}} = 43$ мм.

В результате первого этапа определяются источники тепла для последовательно связанной задачи теплопередачи. По значениям магнитной индукции для различной частоты питающего напряжения находится температура (см. рис. 4).

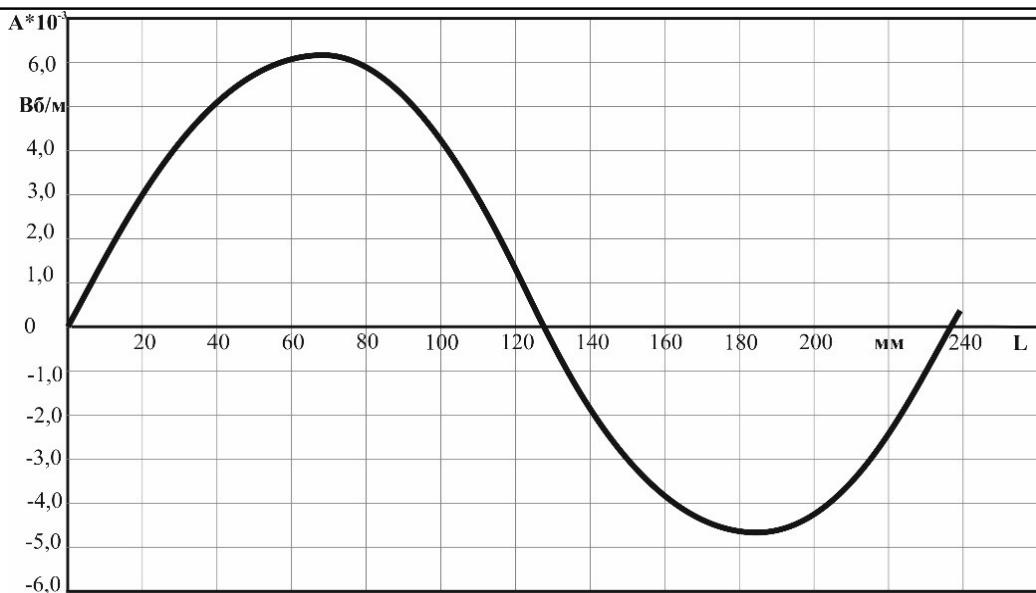


Рис. 1. Распределение векторного магнитного потенциала

Полученные результаты передаются в гидравлический расчёт для учёта изменений условий теплообмена при перемещении рабочей среды. При этом решается связанная задача определения составляющих скорости рабочей среды:

U_{x3} – осевой составляющей в зоне теплообмена, определяющей выходную температуру рабочей среды;

U_{xk} – осевой составляющей в зоне массопереноса, определяющей давление и производительность.

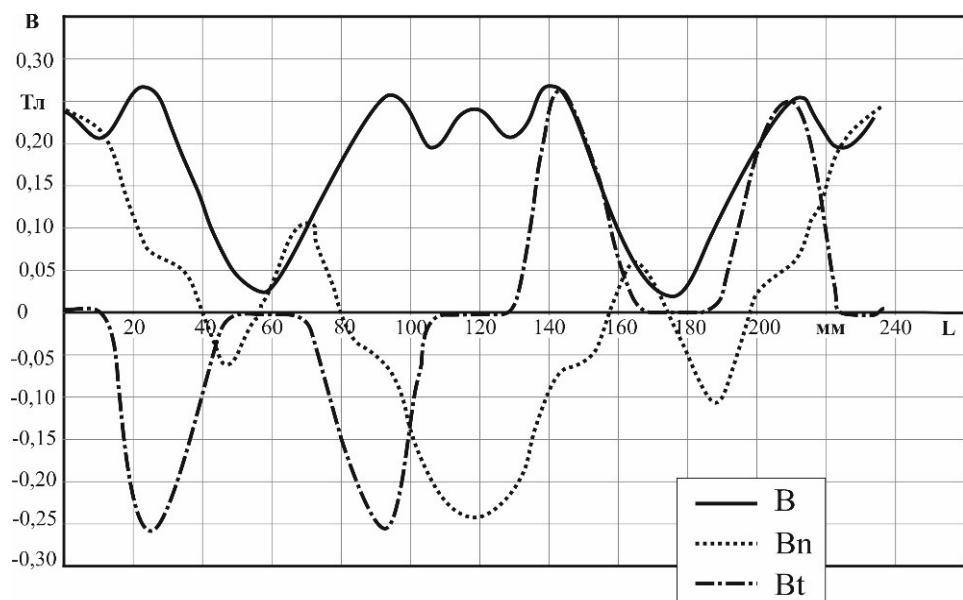


Рис. 2. Распределение индукции магнитного поля вдоль поверхности

B – результирующее значение; B_n – нормальная составляющая;

B_t – тангенциальная составляющая

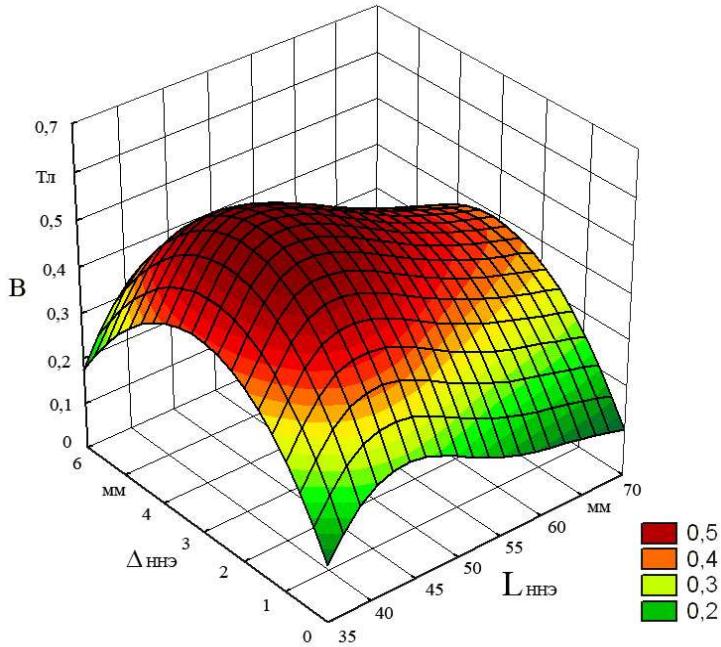


Рис. 3. Изменение магнитной индукции

Задача гидравлического расчёта с учётом теплообмена связана с фундаментальными уравнениями [7; 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial t} + v_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} &= \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right); \quad k_{TO} = -\frac{\lambda}{\Theta_s - \Theta_*} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial n} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}. \end{aligned}$$

Общие уравнения уточняются геометрическими, физическими, временными (начальными) и граничными условиями, которые задаются выражениями

$$\Theta_s = f(x, y, z, t); \quad q_s = f(x, y, z, t);$$

$$k_{TO}(\Theta_s - \Theta_*) = -\lambda \left(\frac{\partial \Theta}{\partial n} \right)_s;$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial \Theta_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial \Theta_2}{\partial n} \right) + q_s(x, y, z, t);$$

$$\Theta_1(x, y, z, t) = \Theta_2(x, y, z, t),$$

где Θ_s – поверхностная температура; x, y, z – координаты теплообменной поверхности; q_s – плотность теплового потока на поверхности тела; $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial n} \right)_s$ – производная по нормали к поверхности S ;

$q_s(x, y, z, t)$ – источники теплоты; $\Theta_1, \Theta_2, \lambda_1, \lambda_2$ – соответственно значения температуры и коэффициенты теплопроводности.

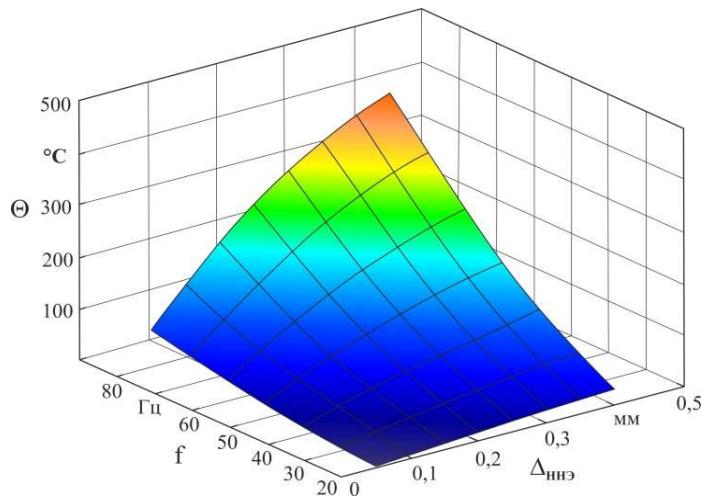


Рис. 4. Результаты теплового расчёта

Массообмен в СЭУ, обусловленный действием внешних сил, априорно определяет турбулентный характер течения жидкости (число Рейнольдса $Re > 2 \times 10^4$) [9]. Предложенная Г. Шлихтингом трёхслойная модель турбулентного потока рабочей среды включает гидродинамический пограничный слой, в котором турбулентный перенос отсутствует, переходную область и турбулентное ядро потока, в котором происходит непрерывное перемешивание всех слоёв жидкости. В качестве зоны теплообмена задаётся пограничный слой (скорость в нём отличается от скорости удалённого потока на определённую заранее заданную малую величину $\epsilon \ll 1$). Зона массопереноса характеризуется коэффициентом перемежаемости, соответствующим доле некоторого промежутка времени в определённой области жидкости с турбулентным течением. Значение этого коэффициента зависит от числа Рейнольдса и показывает, что идеального турбулентного движения не существует, оно всегда связано с разнотолщинным ламинарным пристеночным движением. На практике толщина слоя с ламинарным режимом существенно меньше слоя с турбулентным. В этом случае для расчёта средней теплоотдачи можно предварительно использовать обобщённую зависимость в виде критерия Нуссельта, представленную уравнением М. А. Михеева [10]:

$$\bar{Nu}_k = 0,021 \cdot Re_k^{0,8} Pr_k^{0,43} \left(\frac{Pr_k}{Pr_s} \right)^{0,25} \cdot \bar{\varepsilon}_l.$$

Индекс «ж» указывает, что в качестве определяющей температуры используется температура рабочей среды.

Это уравнение применимо в пределах

$$Re_{kd} = 1 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^6, \quad Pr_k = 0,6 \dots 2500.$$

Поправка $\left(\frac{Pr_k}{Pr_s} \right)^{0,25}$ учитывает зависимость известных свойств (в основном кинематической и динамической вязкостей) теплоносителя в пристеночном слое. В количественном плане соотношение коэффициентов Прандтля для разнотемпературных компонентов может отличаться от единицы в обе стороны в зависимости от направления теплового потока и температуры (индексы «ж» и «s» указывают на температуру жидкости и температуру поверхности). В качестве определяющего размера выбирается или непосредственно внутренний диаметр статора, или его эквивалент, рассчитываемый по формуле

$$d_{\text{экв}} = \frac{4S}{P},$$

где S – площадь поперечного сечения рабочего канала; P – полный периметр; для круглых каналов $d_{\text{экв}} = d$.

За определяющую температуру всех частей смоченного периметра, связанных с теплообменом, принимается средняя температура среды. Изменение по длине канала среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\epsilon}_l$ учитывается в соответствии с рекомендациями [11].

В основу CFD-моделирования гидродинамических процессов в СЭУ заложены основные уравнения потоковых процессов: сплошности (неразрывности); движения; энергии; теплоотдачи; состояния (для газов). Постановка решаемой задачи обеспечивает учёт турбулентности массообмена, многофазность среды, электромагнитные и тепловые взаимодействия. Все перечисленные факторы математически описываются системами дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами. При этом следует отметить, что они могут иметь аналитическое решение лишь при небольшом числе Рейнольдса или для течения Пуазейля.

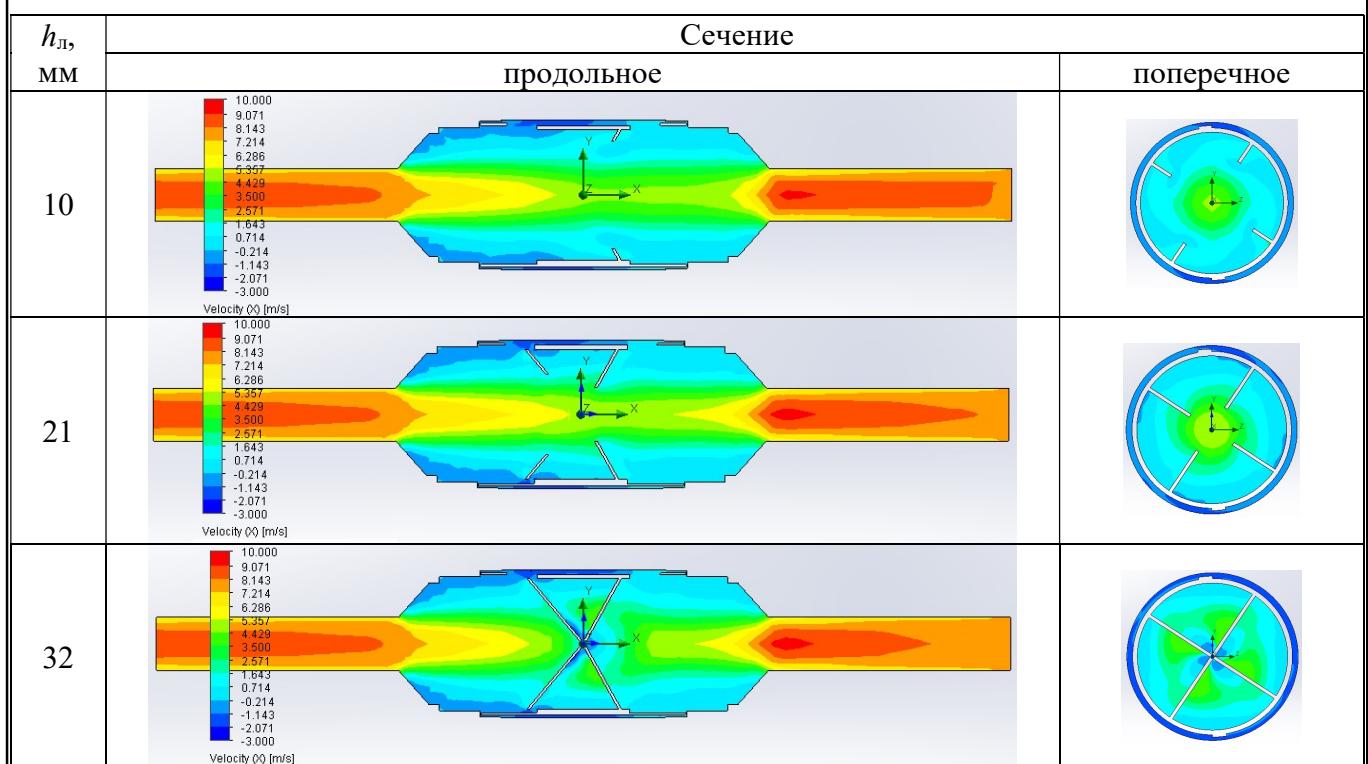
В качестве граничных условий заданы входной объёмный расход и давление на выходе.

Результатом CFD-моделирования являются поля скоростей жидкости в зонах теплообмена и массопереноса.

В табл. 1 приведена визуализация средних значений осевой составляющей скорости жидкости канала при изменении высоты лопасти напорного элемента h_l .

В качестве программного обеспечения использован базовый комплект SolidWorks, обеспечивающий реализацию CFD-технологий применительно к совмещённому трёхмерному электротехническому устройству при вариации проектных параметров объекта исследования [12].

Таблица 1
Распределение средних значений осевой составляющей скорости массопереноса



Выходы. Технология CFD-моделирования позволяет рассчитать характеристики совмещённого электротехнического устройства при вариации проектных параметров. Процесс моделирова-



ния на начальном этапе проводится в двух отдельных целевых зонах – теплообмена и массопереноса. Целевой функцией качества процесса энергообмена при заданной геометрии и физических свойствах среды являются осевые составляющие абсолютной скорости перемещения жидкости в переходном слое и в рабочем канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы: моногр. [Электронный ресурс] / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 418 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85851.html> (дата обращения: 12.02.2020).
2. Иванов, С. Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. [Электронный ресурс] / С. Н. Иванов, К. К. Ким. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html> (дата обращения: 10.02.2020).
3. Ким, К. К. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / К. К. Ким, С. Н. Иванов, М. И. Хисматулин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, вып. 4. – С. 573-583.
4. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля: учеб. пособие / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – М.: «Академия», 2004. – 304 с.
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учеб. для вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612594 Российской Федерации. Программа для оцифровки экспериментальных кривых / О. В. Приходченко, А. А. Просолович; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУВПО «КнаГту»). – № 2013610423; заявл. 11.01.2013; опубл. 06.03.2013.
7. Деменок, С. Л. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах и каналах: моногр. / С. Л. Деменок. – СПб.: Н-Пром Бюро, 2012. – 304 с.
8. Исаченко, В. П. Теплопередача: учеб. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
9. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг; пер. с нем. Г. А. Вольперт; под ред. Л. Г. Лойцянского. – М.: Наука, Главная редакция физико-мат. лит-ры, 1974. – 712 с.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
11. Киселев, И. Г. Теплотехника на подвижном составе железных дорог: учеб. пособие для вузов / И. Г. Киселев. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 278 с.
12. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

Стельмащук С. В., Аминов К. С.
S. V. Stelmashchuk, K. S. Aminov

ЭЛЕКТРОПРИВОД С КОМПЕНСАЦИЕЙ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

ELECTRIC DRIVE WITH LOAD TORQUE COMPENSATION

Стельмащук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Mr. Sergei V. Stelmashchuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

Аминов Кодирджон Собиржонович – бакалавр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Kodirdzhon S. Aminov – Bachelor's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрено применение метода идентификации статического момента для создания системы комбинированного управления электроприводом с частичной инвариантностью к возмущающему воздействию. Контур скорости электропривода настроен на модульный оптимум, что придаёт системе автоматического регулирования скорости хорошее качество переходных процессов. Благодаря компенсатору статического момента электропривод имеет абсолютно жёсткие механические характеристики. В итоге электропривод имеет динамические характеристики, свойственные настройке на модульный оптимум, а статические характеристики – на симметричный оптимум. Электроприводы с рассматриваемой системой управления применяются для механизмов, где основными требованиями являются высокая точность и устойчивость движения рабочего органа.

Summary. The paper considers the application of the load torque identification method for creating a system of combined electric drive control with partial invariance to the disturbing effect. The speed loop of the electric drive is set to a modular optimum, which gives the automatic speed control system a good quality of transients. Thanks to the load torque compensator, the electric drive has absolutely rigid mechanical characteristics. As a result, the electric drive has dynamic features characteristic of setting to a modular optimum, and static characteristics-to a symmetrical optimum. Electric drives with the considered control system are used for mechanisms where the main requirements are high accuracy and stability of the movement of the working body.

Ключевые слова: идентификация, электропривод, комбинированное управление, компенсация статического момента.

Key words: identification, electric drive, combined control, load torque compensation.

УДК 62-503.51

Введение. При настройке электропривода на модульный и симметричный оптимум для каждого вида настроек имеются достоинства и недостатки. При настройке на модульный оптимум электропривод имеет большую устойчивость, а следовательно, и лучшее качество динамических характеристик, но механическая характеристика мягкая по сравнению с настройкой на симметричный оптимум. Соответственно, при настройке на симметричный оптимум электропривод имеет абсолютную жёсткость механических характеристик, но меньшую устойчивость. Для достижения высокого качества одновременно по динамическим и статическим характеристикам могут использоваться системы управления с неклассическими регуляторами [7; 8; 9], но широким применением пользуются стандартные настройки.



В статье рассматривается применение комбинированного управления для компенсации влияния статического момента электропривода, настроенного на модульный оптимум. В результате электропривод становится инвариантным к возмущающему воздействию и, следовательно, имеет абсолютно жёсткую механическую характеристику, но устойчивость и качество переходных процессов та же, что у системы с настройкой на модульный оптимум.

Для реализации компенсационного канала по возмущающему воздействию необходимо оценить статический момент электропривода. Для этого используется идентификатор на основе метода наименьших квадратов (МНК-идентификатор). МНК-идентификация относится к пассивным методам идентификации, что позволяет применять идентификатор в условия нормального режима эксплуатации электропривода [2; 3; 4]. Метод позволяет изменять объём наблюдаемых данных исследуемых сигналов, что повышает точность идентификации для электроприводов с нелинейным математическим описанием.

Идентификация статического момента. Для идентификации статического момента привода используется основное уравнение движения электропривода:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - M_C, \quad (1)$$

где J – суммарный момент инерции электропривода, приведённый к валу двигателя; $\omega(t)$ – частота вращения вала двигателя; $M(t)$ – электромагнитный момент двигателя; M_C – статический момент на валу двигателя. Сигналы $\omega(t)$ и $M(t)$ являются наблюдаемыми сигналами, поэтому предполагается, что они измеримы прямым или косвенным способом. Также предполагается, что момент инерции J является известным и неизменяемым параметром. Идентифицируемым параметром является только статический момент M_C .

В уравнении (1) присутствует производная частоты вращения по времени, которая ухудшает точность идентификации, т.к. дифференцирование исследуемого сигнала приводит к возрастанию помех, что искажает оценку статического момента. Для устранения этого недостатка проинтегрируем левую и правую части уравнения (1):

$$\begin{aligned} J \int_0^t \frac{d\omega(\tau)}{dt} d\tau &= \int_0^t M(\tau) d\tau - \int_0^t M_C d\tau; \\ J\omega(t) &= M_u(t) - M_C t, \end{aligned} \quad (2)$$

где $M_u(t) = \int_0^t M(\tau) d\tau$ – интеграл электромагнитного момента электропривода.

В результате используем уравнение (2) в качестве идентификационной модели. Выполним процедуру дискретизации модели (2) и получим уравнение линейной регрессии [3]:

$$y_k = M_C t_k, \quad (3)$$

где $y_k = M_{u_k} - J\omega_k$ – выходной сигнал идентификатора.

Сигналы ω_k и M_{u_k} являются наблюдаемыми данными в моменты времени $t_k = k\Delta t$, где Δt – интервал дискретизации на интервале наблюдения $[t_0, t_N]$ из $(N + 1)$ моментов времени, тогда $k = 0 \dots N$.

В соответствии с МНК-идентификацией [3] по уравнению (3) составляется система уравнений в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 \\ t_1 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} M_C \quad \text{или} \quad Y = \Psi\beta, \quad (4)$$

где $Y [N + 1]$ – вектор значений выходного сигнала; $\Psi [(N + 1) \times 1]$ – массив данных наблюдений за входным сигналом; $\beta = \hat{M}_C$ – оценка идентифицируемого параметра.

Решением уравнений (4) является выражение

$$\beta = [\Psi^T \Psi]^{-1} \Psi^T Y, \quad (5)$$

которое вычисляется в каждый момент времени t_k с интервалом дискретизации Δt .

Вычисление осуществляется после каждого построчного обновления массивов Ψ и Y через каждый шаг дискретизации Δt по принципу очереди «первый вошёл – последний вышел». При этом возникает проблема постоянного увеличения значений M_{ik} и t_k , что приводит к арифметическому переполнению. Для устранения данной ситуации необходимо обновлять массивы Ψ и Y с заданной периодичностью $T_{об}$ (период обновления) с обнулением времени. При обновлении данных выражение (3) составим при $k = 0$:

$$M_{i0} - J\omega_0 = M_C t_0. \quad (6)$$

В момент обновления $t_0 = 0$ значение ω_0 снимается как текущее значение с датчика скорости. Тогда начальное значение M_{i0} в начальный момент интервала обновления t_0 получим из выражения (6):

$$M_{i0} = J\omega_0.$$

При идентификации предполагается, что статический момент M_C изменяется незначительно, поэтому интервал дискретизации Δt и объём данных наблюдения N выбираются так, чтобы интервал наблюдения был достаточно мал, чтобы статический момент считать постоянным.

Структурная схема МНК-идентификатора с интегрированной идентификационной моделью (3) представлена на рис. 1. Блок интегрирования (БИ) вычисляет интеграл электромагнитного момента за период обновления. В начале периода обновления выполняется сброс БИ, вычисляется начальное значение интеграла момента M_{i0} и осуществляется расчёт текущего интеграла момента двигателя:

$$M_i(t) = M_{i0} + \int_0^t M(\tau) d\tau.$$

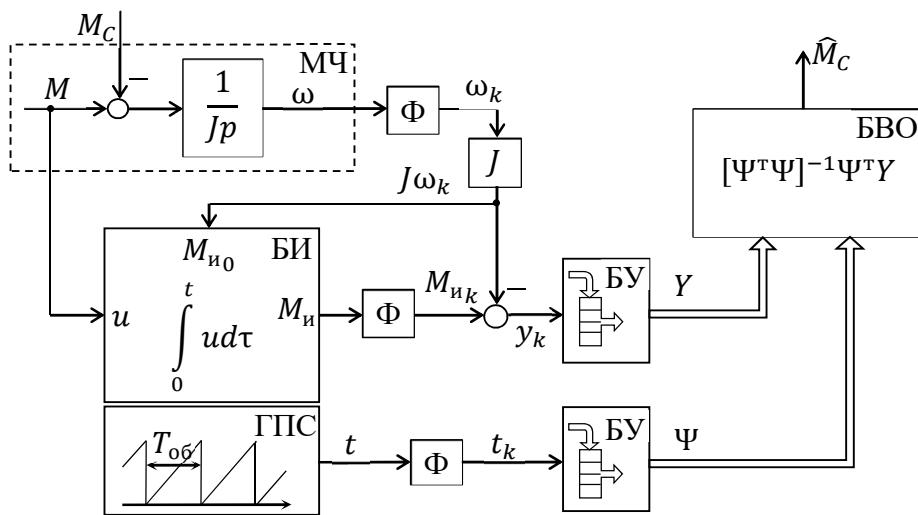


Рис. 1. Структурная схема МНК-идентификатора:
МЧ – механическая часть привода; БИ – блок интегрирования;
ГПС – генератор пилообразного сигнала; Ф – фиксатор;
БУ – буферное устройство; БВО – блок вычисления оценки

Величина времени t в уравнении модели (2) – это пилообразный сигнал с периодом обновления $T_{об}$. Для реализации такого сигнала используется генератор пилообразного сигнала (ГПС),

который синхронизирован с работой БИ. Для дискретизации сигналов МНК-идентификатора t , $\omega(t)$ и $M_i(t)$ используются импульсные элементы с единичной скважностью (фиксатор) Φ [1].

Буферное устройство БУ поэлементно заполняет массив данных (Y или Ψ) дискретным значением сигнала (u_k или t_k). В момент пуска элементы массива нулевые. Затем, на каждом шаге, значение дискретного сигнала записывается в начало массива, остальные значения перезаписываются в следующий элемент массива. При этом значение в конце массива удаляется. Таким образом, реализуется принцип очереди «первым вошёл – первым вышел». На каждом шаге дискретизации, т.е. после каждого добавления дискретного значения, на выходе БУ выводится массив, который отличается от массива на предыдущем шаге добавленным новым значением в начальный элемент и смешёнными значениями остальных элементов. В результате на каждом шаге массивы Y и Ψ на выходах БУ подаются в блок вычисления оценки статического момента (БВО), который реализует выражение (5).

Комбинированное управление, инвариантное к возмущению. Структурная схема электропривода, настроенного на модульный оптимум с комбинированным управлением по возмущению, представлена на рис. 2.

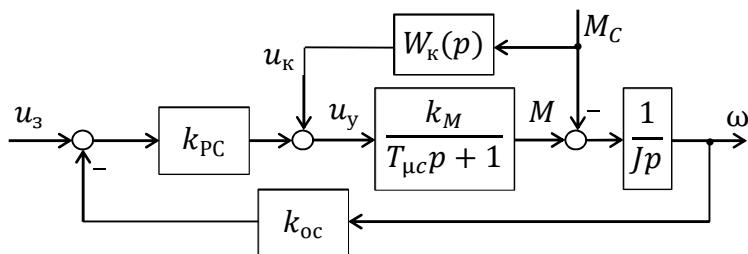


Рис. 2. Структурная схема электропривода:

$W_k(p)$ – передаточная функция компенсатора возмущения; k_{pc} – коэффициент усиления регулятора скорости; k_M – коэффициент усиления двигателя по моменту; $T_{\mu c}$ – малая постоянная времени контура скорости; k_{oc} – коэффициент обратной связи по скорости; u_k – сигнал компенсации; u_y – сигнал управления; u_3 – сигнал задания

Структурная схема приемлема как для приводов постоянного тока с независимым возбуждением, так и для частотного асинхронного электропривода. Для привода постоянного тока с контуром тока

$$k_M = C\Phi/k_{ot},$$

где $C\Phi$ – конструктивный параметр и магнитный поток двигателя; k_{ot} – коэффициент обратной связи по току.

Для частотного привода со скалярным управлением

$$k_M = k_{\Pi\chi}\beta_d,$$

где $k_{\Pi\chi}$ – коэффициент усиления преобразователя частоты; β_d – жёсткость механической характеристики двигателя.

Для частотного привода с векторным управлением

$$k_M = \frac{3}{2}k_2p_n/k_{ot},$$

где k_2 – коэффициент электромагнитной связи ротора; p_n – число пар полюсов.

Коэффициент усиления регулятора скорости при настройке контура на модульный оптимум при $k_{\Pi\chi}k_{oc} = 1$ определяется [6]

$$k_{PC} = \frac{J}{2T_{\mu c}\beta_d}. \quad (7)$$

В соответствии с [5] передаточная функция компенсатора возмущения

$$W_k(p) = \frac{1}{k_M} \frac{T_k p + 1}{T'_k p + 1},$$

где $T_k = T'_k + T_{\mu c}$ и T'_k – постоянные времени компенсатора возмущения, которые выбираются из условия, что начальное значение выходного сигнала компенсатора при ступенчатом воздействии момента нагрузки, равного максимально допустимому значению M_{max} , будет равен максимальному значению управляющего напряжения u_{ymax} , т.е.

$$u_{ymax} = \frac{1}{k_M} \frac{T_k}{T'_k} M_{max},$$

тогда получим выражения для постоянных времени компенсатора:

$$T'_k = \frac{T_{\mu c} M_{max}}{u_{ymax} k_M - M_{max}}; \quad T_k = \frac{T_{\mu c} u_{ymax} k_M}{u_{ymax} k_M - M_{max}}. \quad (8)$$

Моделирование электропривода с комбинированным управлением с оценкой возмущающего воздействия. В среде Simulink разработана имитационная модель частотного электропривода со скалярным управлением с двигателем АИР100S2: $P_h = 4$ кВт, $\eta = 0,842$, $U_h = 380$ В, $\omega_h = 301,6$ с⁻¹, $\omega_{0h} = 314,2$ с⁻¹, $\lambda_M = M_{max}/M_h = 2,3$, $J_d = 0,007$ кгм², $u_{ymax} = 10$ В. В этом случае параметры автоматизированного электропривода будут следующими:

$$k_{\Pi\chi} = \frac{\omega_{0h}}{u_{ymax}} = 31,4;$$

$$M_h = \frac{P_h}{\eta \omega_h} = 15,8 \text{ Нм}; \quad \beta_d = \frac{M_h}{\omega_{0h} - \omega_h} = 1,25;$$

$$k_M = k_{\Pi\chi} \beta_d = 39,4.$$

Малую постоянную времени зададим $T_{\mu c} = T_e + T_{\Pi\chi} + T_{ot} \approx 0,02$ с, момент инерции привода примем $J = 5J_d = 0,035$ кгм², по формуле (7) вычислим регулятор скорости $k_{PC} = 0,69$. Максимальный момент двигателя $M_{max} = \lambda_M M_h = 36,2$ Нм.

По формуле (8) вычислим параметры компенсатора: $T'_k = 0,002$ с, $T_k = 0,022$ с.

Имитационная модель электропривода представлена на рис. 3.

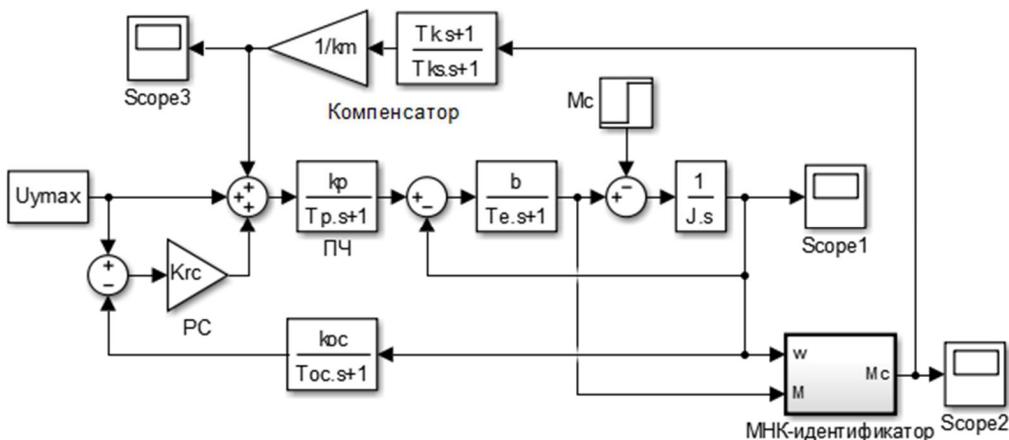


Рис. 3. Имитационная модель электропривода

Структура подсистемы «МНК-идентификатор» представлена на рис. 4.

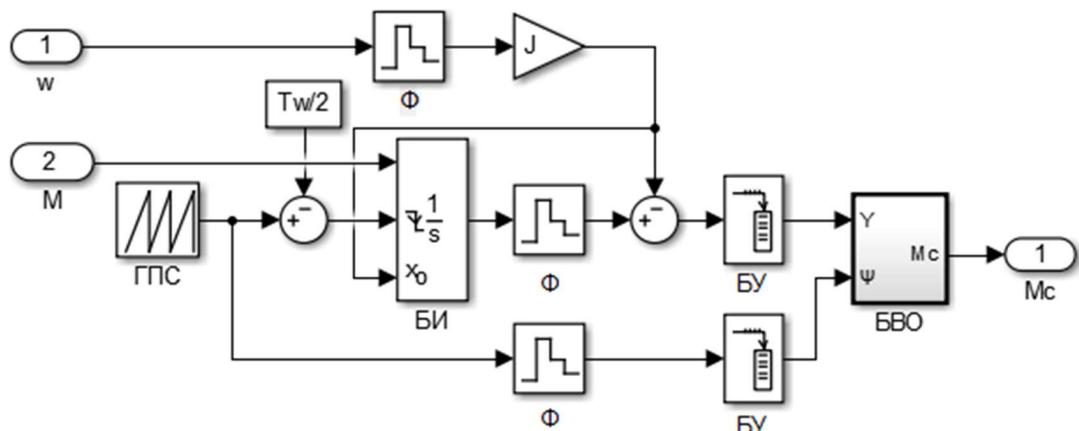


Рис. 4. Структура подсистемы «МНК-идентификатор»

Маркировка блоков соответствует обозначениям на рис. 1: ГПС реализуется блоком генерации повторяющихся сигналов Repeating Sequence; БИ – блоком Integrator; Ф – Zero-Order Hold; БУ – Buffer. Структура подсистемы «БВО» представлена на рис. 5.

Для реализации выражения (5) использовались блоки библиотеки DSP System Toolbox. Так как вычисление выражения (5) при пуске из-за отсутствия данных в массивах Y и Ψ невозможно, то на первом интервале дискретизации подсистема «БВО» возвращает нулевое значение. Для этого используется переключатель Switch, через который с помощью блока Step оценка статического момента выводится подсистемой «БВО» после момента Δt .

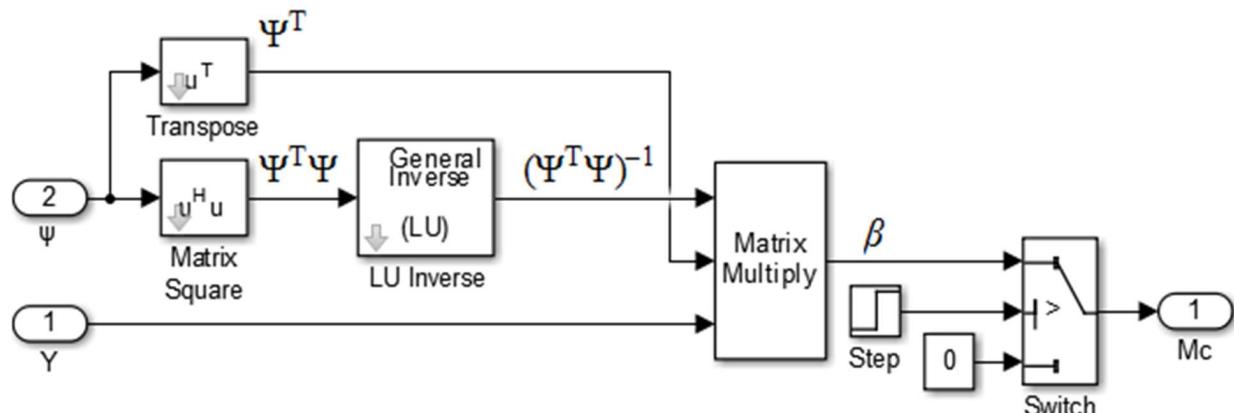


Рис. 5. Структура подсистемы «БВО»

Переходный процесс скорости привода, представленный на рис. 6 (блок Scope1), начинается без нагрузки. В момент времени 0,5 с осуществляется скачок статического момента до M_{\max} . Видно, что после возмущающего воздействия скорость осталась неизменной, что свойственно для электроприводов с абсолютно жёсткой механической характеристикой.

Параметры идентификатора задавались следующие: $\Delta t = 0,0001$ с, $T_{\text{об}} = 0,01$ с, $N = 10$. На рис. 7, а (блок Scope2) видно, что полноценная идентификация статического момента произошла после интервала наблюдения $N \Delta t = 0,001$ с от момента скачка статического момента. Через тот же промежуток времени компенсатор возмущения (см. рис. 7, б) отреагировал на максимальный статический момент 36,2 Нм с максимальным значением сигнала 10 В.

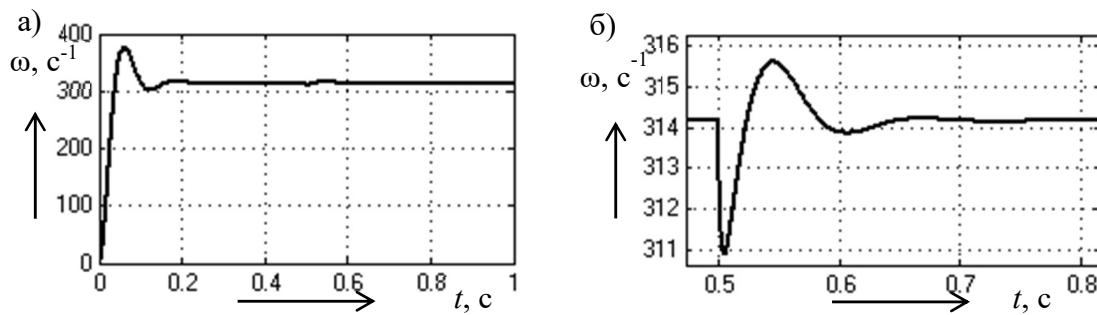


Рис. 6. Переходный процесс скорости электропривода по управляемому (а)
и возмущающему воздействию (б)

Исследования показали, что чем меньше параметры идентификатора N и Δt , т.е. чем меньше интервал наблюдения, тем выше быстродействие компенсатора возмущения. Однако для переходных процессов с пульсациями, которые характерны для электроприводов с преобразователями, уменьшение этих параметров идентификатора приводит к ухудшению точности идентификации. Поэтому целесообразно интервал наблюдения идентификатора $N\Delta t$ выбирать из условия соизмеримости со значением на порядок меньше малой постоянной времени привода $T_{\mu c}$, т.е. примерно

$$0,05T_{\mu c} \leq N\Delta t \leq 0,1T_{\mu c}.$$

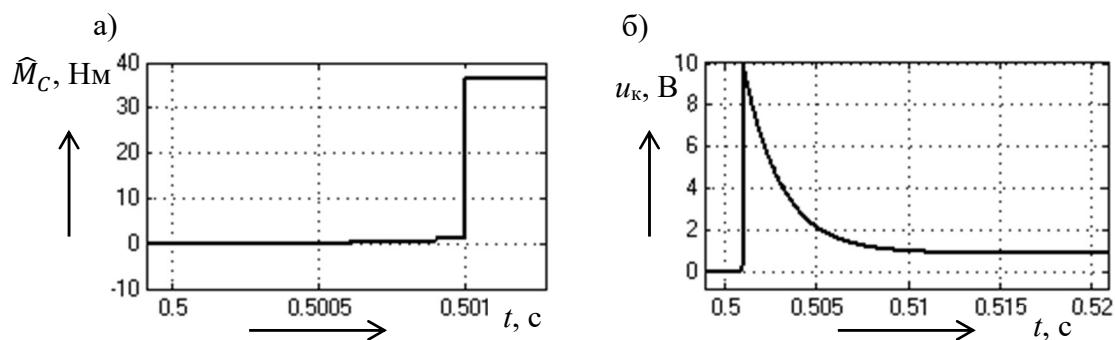


Рис. 7. Переходный процесс оценки статического момента (а)
и реакции компенсатора на возмущение (б)

Выводы. Применение идентификатора статического момента привода позволило улучшить статические показатели качества автоматизированного электропривода без увеличения астатизма системы автоматического регулирования скорости. В качестве примера использован частотный электропривод со скалярным управлением. Но МНК-идентификатор для компенсации статического момента можно также использовать и для частотных приводов с векторным управлением, а также для приводов постоянного тока и синхронных приводов различного исполнения.

Рассматриваемый подход управления целесообразно использовать в областях, где требуется применение прецизионных электроприводов. В частности, в выпускной работе бакалавра-соавтора рассматривается ленточный вакуум-фильтр, где процесс просушивания угольного шлама должен проходить при строгом выполнении технологии обезвоживания, что достигается постоянством скорости движения линии конвейера [10]. В дальнейшем данный подход будет использоваться в системах автоматического регулирования угла поворота вала двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
- Гроп, Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М.: Изд-во «Мир», 1979. – 305 с.



3. Диленская, А. Н. Идентификация объектов управления: учеб. пособие / А. Н. Диленская. – Самара: Изд-во Самарского гос. техн. ун-та, 2009. – 165 с.
4. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления: учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.
5. Топчев, Ю. И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: учеб. пособие для втузов / Ю. И. Топчев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
6. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока: учеб. пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.
7. Buzikayeva Alina V. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws [Электронный ресурс] / Buzikayeva A. V., Susdorf V. I., Cherniy S. P. // Proceedings 2019 International Ural Conference On Electrical Power Engineering (UralCon). – Chelyabinsk: IEEE, 01-03 октября 2019 г. – С. 8877652. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41578179> (дата обращения: 10.02.2020).
8. Cherniy S. P. Fuzzy multi-cascade ac drive control system [Электронный ресурс] / Cherniy S. P., Gudim A. S., Buzikayeva A. V. // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 03-04 октября 2018 г. – С. 8602930. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38639173> (дата обращения: 12.02.2020).
9. Cherniy S. P. General Principles of Building the Fuzzy Multi-Cascade Tracking Control Systems [Электронный ресурс] / Cherniy S. P., Solovyev V. A. // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Fareastcon 2018. – Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 03-04 октября 2018 г. – С. 8602646. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38639700> (дата обращения: 28.01.2020).
10. Фильтры вакуумные ленточные ЛОН, ЛОП [Электронный ресурс] // ЗАО Научно-производственное объединение «Комплектмаш». – Режим доступа: <http://www.komplektmash.ru/15pro.php> (дата обращения: 01.02.2020).

Челухин В. А., Кружаев М. А., Пьей Зон Аунг, Абрамсон Е. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ РАЗНОСТИ
МЕЖДУ МИНИМАЛЬНЫМ И МАКСИМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Челухин В. А., Кружаев М. А., Пьей Зон Аунг, Абрамсон Е. В.
V. A. Chelukhin, M. A. Kruzhaev, Pyae Zone Aung, E. V. Abramson

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ РАЗНОСТИ МЕЖДУ МИНИМАЛЬНЫМ И МАКСИМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

THEORETICAL ESTIMATION OF DIFFERENCE DEVIATION BETWEEN THE MINIMUM AND MAXIMUM VALUES OF AMBIENT TEMPERATURE

Челухин Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Mr. VladimirA. Chelukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Кружаев Максим Александрович – аспирант кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(962)286-86-92. E-mail: karibnet@mail.ru.

Mr. Maksim A. Kruzhaev – a Post-Graduate Student, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)286-86-92. E-mail: karibnet@mail.ru.

Пьей Зон Аунг – аспирант кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)829-87-70. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

Mr. PayZone Aung – a Post-Graduate Student, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)829-87-70. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

Абрамсон Елизавета Владимировна – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(914)165-00-00. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

Mrs. Elizaveta V. Abramson – a Post-Graduate Student, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)165-00-00. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

Аннотация. Эффективность преобразователя энергии разности температур напрямую зависит от величины разности между минимальным и максимальным значениями температуры окружающей среды. Если известны точные значения температуры в заданных точках экстремума, то можно дать точную оценку эффективности работы преобразователя и настроить его работу на ещё большую энергоэффективность. В статье дана оценка адекватности различных методов аппроксимации применительно к прогнозированию суточных температурных значений разности температур.

Summary. The efficiency of the temperature difference energy converter depends directly on the value of the difference between the minimum and maximum values of the ambient temperature. If you know the exact values of the temperature at the specified points of the extremum, you can give an accurate assessment of the efficiency of the converter and adjust its operation for even greater energy efficiency. The article assesses the adequacy of various approximation methods in relation to the prediction of daily temperature values of the temperature difference.

Ключевые слова: перепад температур, преобразователи тепловой энергии, метод аппроксимации, разность температур, точки экстремума, преобразователь энергии, окружающая среда.

Key words: temperature drop, converters of thermal energy, method of approximation, temperature difference, points of extremum, energy converter, environment.

УДК 621.362

Эффективность работы преобразователя энергии перепада температур, конструкция и принцип работы которого описаны в [1–6], зависит от величины разности между минимальным и максимальным значениями температуры окружающей среды. При этом, если заранее известны точные значения температуры в указанных точках экстремума, можно не только дать точную оценку эффективности работы преобразователя, но и скорректировать его работу для ещё большей энергоотдачи.

Было решено оценить возможность предсказания суточных минимумов и максимумов температуры окружающей среды на основе многолетних наблюдений.

Целями исследования определены следующие:

- оценить адекватность различных методов аппроксимации применительно к предсказыванию ежедневных температурных значений;
- оценить зависимость точности экстраполяции от объёма исходных данных.

В качестве исходных были взяты данные, полученные с интернет-ресурса по адресу [7] <https://www.wunderground.com/history>. Указанный ресурс хранит данные многолетних наблюдений за суточными температурами в разных точках мира. Для анализа была выбрана окрестность города Комсомольска-на-Амуре и были получены данные обо всех замерах температур за 2008–2017 годы. Полученные данные содержат замеры температур за каждый день обозначенного периода. Замеры производились от 4 до 8 раз в сутки за исключением некоторых дней, когда в базе имеется 3 или 2 значения суточных замеров. Объём полученной информации очень велик и не может быть в настоящей статье приведён полностью. В табл. 1 приведена часть полученных данных, чтобы иметь представление об их структуре.

Анализ полученных данных показывает, что максимальная суточная температура достигается, как правило, в 16:00 – 17:00, а минимальная – в 4:00 – 5:00. Для моделирования работы преобразователя энергии перепада температур достаточно выяснить непосредственно величины минимальной и максимальной суточных температур.

Выполним выборку, оставив из всех исходных данных только локальные минимум и максимум. Принимаются следующие допущения. Будем считать, что в каждом году 365 дней (т.е. исключаем данные за 29 февраля, если они имеются). Для более полного анализа построим корреляционное поле двумя способами. Во всех случаях значениями по оси абсцисс являются номера дней. Было решено рассмотреть отдельно способ построения корреляционного поля, при котором номера дней изменяются циклически (от 1 до 365 каждый год), и отдельно – способ, при котором номера дней составляют непрерывную последовательность (1 января 2008 года – под номером 1, 31 декабря 2017 года – под номером 3650). Построим корреляционные поля минимальных и максимальных температур за каждый день начиная с 1 января 2008 года и заканчивая 31 декабря 2017 года первым способом (см. рис. 1, 2) и вторым способом (см. рис. 3, 4).

Анализируя корреляционные поля, можно сделать вывод: изменения значений температур имеют ярко выраженную периодическую форму с двумя локальными экстремумами каждый год. Эти значения можно аппроксимировать многочленом 3-й степени либо периодической функцией с периодом, равным 365.

Был произведён эксперимент, суть которого заключалась в экстраполировании максимальных и минимальных значений температур в течение года на основе предшествующих замеров и сравнении полученных значений с фактически наблюдаемыми.

Для экстраполяции были выбраны следующие методы:

1. расчёт среднего значения температуры за каждый день;
2. аппроксимация периодической функцией при циклическом расчёте дней;
3. аппроксимация периодической функцией при последовательном расчёте дней;
4. аппроксимация многочленом 2-й степени при циклическом расчёте дней;
5. аппроксимация многочленом 3-й степени при циклическом расчёте дней;
6. аппроксимация многочленом 4-й степени при циклическом расчёте дней.

Таблица 1

Выборка из исходных данных

| 2010 год | Время суток | | | | | | | |
|------------|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 4:00 | 5:00 | 10:00 | 11:00 | 16:00 | 17:00 | 22:00 | 23:00 |
| 01.01.2010 | -14 | | -14 | | -14 | | -15 | |
| 02.01.2010 | -14 | | -12 | | -12 | | -13 | |
| 03.01.2010 | -13 | | -14 | | -13 | | -12 | |
| 04.01.2010 | -12 | | -10 | | -8 | | -6 | |
| 05.01.2010 | -5 | | -4 | | 1 | | 0 | |
| 06.01.2010 | -2 | | -4 | | -4 | | -7 | |
| 07.01.2010 | -8 | | -9 | | -8 | | -14 | |
| 08.01.2010 | -16 | | -18 | | -15 | | -19 | |
| 2013 год | Время суток | | | | | | | |
| | 2:00 | 5:00 | 6:00 | 11:00 | 14:00 | 17:00 | 19:00 | 23:00 |
| 01.01.2013 | | -14 | | -15 | | -21 | | -23 |
| 02.01.2013 | | -24 | | -25 | | -24 | | -27 |
| 03.01.2013 | | -31 | | -33 | | -27 | | -34 |
| 04.01.2013 | | -38 | | -40 | | -28 | | -33 |
| 05.01.2013 | | -33 | | -32 | | -27 | | -29 |
| 06.01.2013 | | -30 | | -31 | | -23 | | -34 |
| 07.01.2013 | | | | -40 | | -30 | | -36 |
| 08.01.2013 | | -38 | | | | | | |
| 09.01.2013 | | -41 | | -42 | | -32 | | -38 |
| 2017 год | Время суток | | | | | | | |
| | 1:00 | 4:00 | 7:00 | 10:00 | 13:00 | 16:00 | 19:00 | 22:00 |
| 01.01.2017 | -18 | -20 | -21 | -19 | -14 | -13 | -19 | -22 |
| 02.01.2017 | -24 | -27 | -27 | -28 | -18 | -17 | -22 | -26 |
| 03.01.2017 | -27 | -28 | -30 | -27 | -18 | -17 | -21 | -25 |
| 04.01.2017 | -28 | -30 | -25 | -24 | -19 | -18 | -23 | -24 |
| 05.01.2017 | -27 | -29 | -30 | -29 | -19 | -18 | -21 | -23 |
| 06.01.2017 | -24 | -25 | -25 | -24 | -16 | -16 | -18 | -16 |
| 07.01.2017 | -16 | -16 | -16 | -17 | -12 | -12 | -18 | -22 |
| 08.01.2017 | -22 | -20 | -18 | -17 | -14 | -15 | -14 | -16 |
| 09.01.2017 | -17 | -16 | -17 | -17 | -15 | -15 | -14 | -15 |

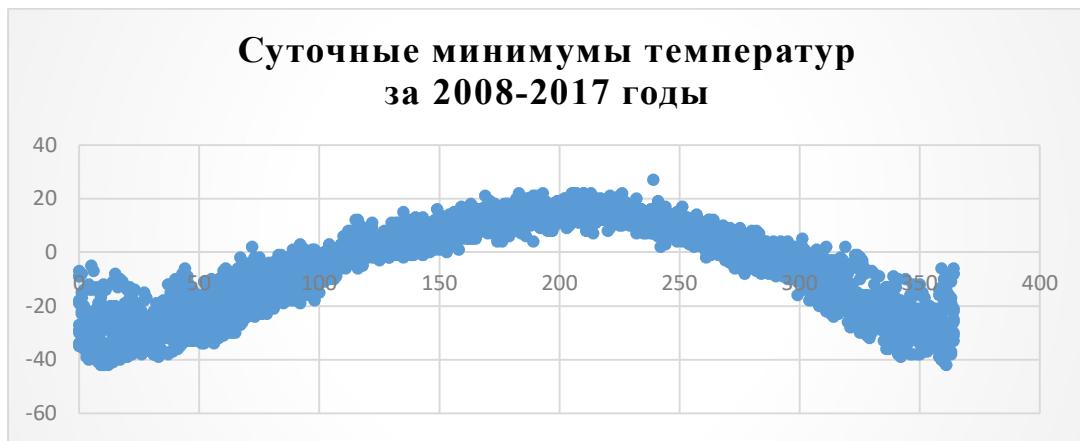


Рис. 1. Корреляционное поле суточных минимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с циклическим учётом дней

**Суточные максимумы температур
за 2008-2017 годы**

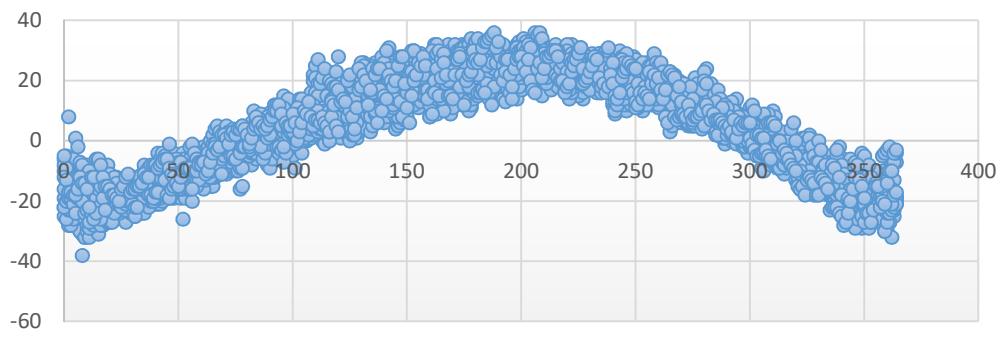


Рис. 2. Корреляционное поле суточных максимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с циклическим учётом дней

**Суточные минимумы температур
за 2008-2017 годы**

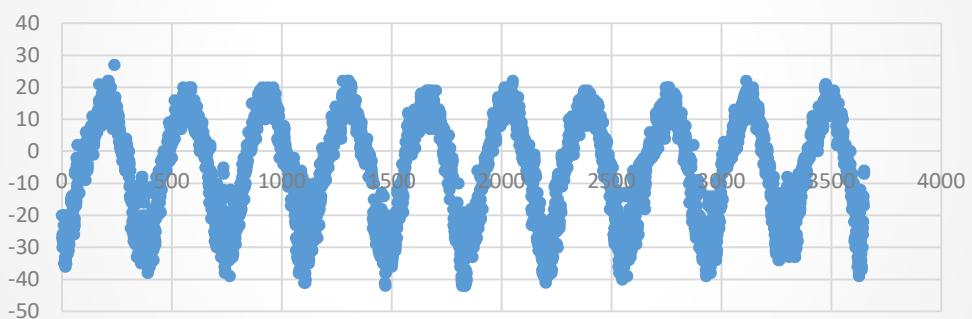


Рис. 3. Корреляционное поле суточных минимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с последовательным учётом дней

**Суточные максимумы температур
за 2008-2017 годы**

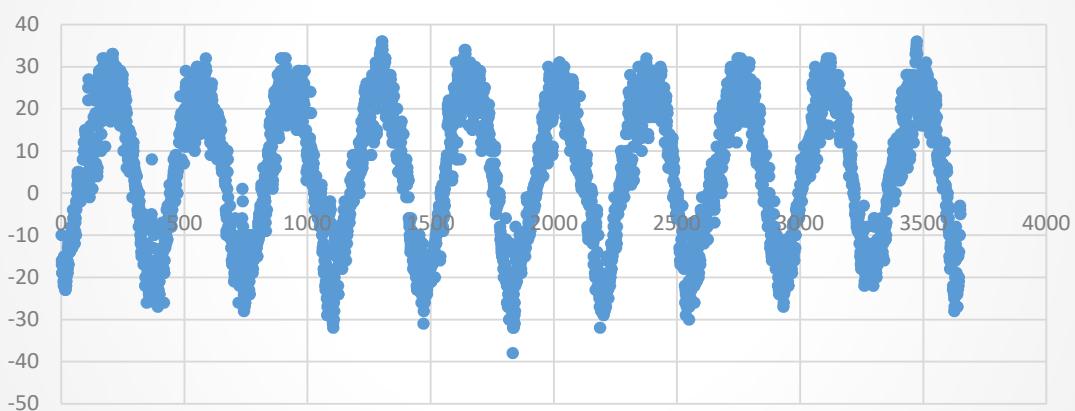


Рис. 4. Корреляционное поле суточных максимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с последовательным учётом дней

Первый метод использован в расчётах, поскольку он часто применяется в быту, а выполняемый эксперимент даёт возможность объективно оценить его в сравнении с другими методами. Апроксимация периодической функцией использована исходя из вида корреляционного поля (см. рис. 3 и 4). Исходя из вида поля (см. рис. 1 и 2) в список методов добавлена аппроксимация многочленом 2-й и 4-й степени. Многочлен 3-й степени добавлен для чистоты эксперимента.

Каждый из методов аппроксимации применяется отдельно для экстраполяции минимальных и максимальных температур на следующий год на основе данных за 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 предыдущих лет. Таким образом, каждый из 6 методов применяется 18 раз – в итоге получаем 108 разных экспериментов, результаты которых следует интерпретировать.

Для упрощения интерпретации заранее определим, какие параметры будут использованы при оценке адекватности результатов каждого из экспериментов. Поскольку рассчитанные температуры будут сравниваться с известными замерами, можно рассчитать следующие параметры:

1. максимальную абсолютную ошибку аппроксимации;
2. среднюю абсолютную ошибку аппроксимации;
3. среднее квадратичное отклонение;
4. вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры от замеренной не превышает 2 °C;
5. вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры от замеренной не превышает 5 °C.

Опишем математически перечисленные выше методы аппроксимации. Пусть заданы следующие исходные данные:

- N – количество измерений (исходных данных);
- M – количество лет, наблюдения в течение которых включены в исходные данные;
- $\langle x, y \rangle$ – множество упорядоченных пар «абсцисса-ордината», задающее исходные измерения. В качестве абсциссы используется номер дня, в качестве ordinаты – минимальная или максимальная температура в этот день;
- xr – множество абсцисс точек, на которые нужно экстраполировать функцию температуры.

Требуется составить экстраполяционную функцию $yr(x)$, определённую на множестве xr , значения которой интерпретируются как величины минимальных (максимальных) температур в заданный день.

Экстраполяция по первому методу выполняется по формуле

$$yr(xr_i) = \frac{\sum_{j \in \{i, i+365, \dots, i+M \cdot 365\}} y_j}{M}, \quad i \in \overline{1, N}. \quad (1)$$

Как видно из формулы (1), это простейший расчёт среднего арифметического. Например, для расчёта температуры за 1 января исследуемого года складываются значения температур за 1 января каждого из годов в исходных данных, а полученная сумма делится на количество лет.

Далее рассмотрим аппроксимацию периодической функцией, которая будет использована для второго и третьего методов. В общем виде задача ставится в виде необходимости аппроксимировать исходные данные функцией вида

$$y = a \cdot x + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x + d\right), \quad (2)$$

где $a \cdot x + b$ задаёт общий тренд; c – амплитуда (исходя из вида исходных данных она приблизительно равна во всех периодах); T – величина периода (она известна и равна 365); d – фаза.

Очевидно, что при использовании метода наименьших квадратов функция (2) породит систему нелинейных уравнений. Для того чтобы избежать нелинейности, преобразуем её в функцию вида

$$y = a \cdot x + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x\right). \quad (3)$$



Таким образом, нелинейность, порождённая фазой d , нивелирована в функции вида (3). Покажем, как аппроксимировать имеющиеся исходные данные функцией вида (3) с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Пусть задана функция

$$F(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^N \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right)^2.$$

Требуется подобрать такие величины параметров a , b , c , d , чтобы значение функции $F(a, b, c, d)$ стало минимальным. Это достигается при условии, что все частные производные функции $F(a, b, c, d)$ равны нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial c} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial d} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Взяв частные производные, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N 2 \cdot x_i \cdot \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N 2 \cdot \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \cdot \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \cdot \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right) = 0. \end{cases}$$

Внесём множители в скобки и сократим каждое из уравнений, исключив множитель 2, получим систему

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \left(a \cdot x_i^2 + b \cdot x_i + c \cdot x_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot x_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \cdot x_i \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N \left(a \cdot x_i + b + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N \left(a \cdot x_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + b \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + c \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + \right. \\ \left. + d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^N \left(a \cdot x_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + b \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + c \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) + \right. \\ \left. + d \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) - y_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right) \right) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Введём обозначения:

$$\gamma_i = \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right); \quad \delta_i = \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x_i\right). \quad (6)$$

Подставив обозначения (6) в систему (5), получим систему уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i^2 + b \cdot x_i + c \cdot x_i \cdot \gamma_i + d \cdot x_i \cdot \delta_i - y_i \cdot x_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i + b + c \cdot \gamma_i + d \cdot \delta_i - y_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i \cdot \gamma_i + b \cdot \gamma_i + c \cdot \gamma_i^2 + d \cdot \delta_i \cdot \gamma_i - y_i \cdot \gamma_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^N (a \cdot x_i \cdot \delta_i + b \cdot \delta_i + c \cdot \gamma_i \cdot \delta_i + d \cdot \delta_i^2 - y_i \cdot \delta_i) = 0. \end{cases}$$

Раскрыв в ней скобки, получаем окончательную систему уравнений для решения задачи (4):

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i + c \cdot \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \gamma_i) + d \cdot \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \delta_i) = \sum_{i=1}^N (x_i \cdot y_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b \cdot N + c \cdot \sum_{i=1}^N \gamma_i + d \cdot \sum_{i=1}^N \delta_i = \sum_{i=1}^N y_i, \\ a \cdot \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \gamma_i) + b \cdot \sum_{i=1}^N \gamma_i + c \cdot \sum_{i=1}^N \gamma_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^N (\delta_i \cdot \gamma_i) = \sum_{i=1}^N (\gamma_i \cdot y_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N (x_i \cdot \delta_i) + b \cdot \sum_{i=1}^N \delta_i + c \cdot \sum_{i=1}^N (\delta_i \cdot \gamma_i) + d \cdot \sum_{i=1}^N \delta_i^2 = \sum_{i=1}^N (\delta_i \cdot y_i). \end{cases}$$

При расчётах по четвёртому, пятому и шестому методам аппроксимация выполняется соответственно функциями вида

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c,$$

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d,$$

$$y = a \cdot x^4 + b \cdot x^3 + c \cdot x^2 + d \cdot x + f.$$

Для решения задач аппроксимации используются системы линейных уравнений

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^2), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i + c \cdot N = \sum_{i=1}^N y_i; \end{cases}$$



$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^6 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^3), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^2), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i + d \cdot N = \sum_{i=1}^N y_i; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^8 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^7 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^6 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + f \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^4), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^7 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^6 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + f \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^3), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^6 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + f \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i^2), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^5 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + f \cdot \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N (y_i \cdot x_i), \\ a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^N x_i + f \cdot N = \sum_{i=1}^N y_i. \end{cases}$$

Приведём формулы для расчёта параметров оценки аппроксимации. Пусть N – количество дней в расчётном периоде, Ts_i – наблюдаемая температура в i -й день, Tr_i – рассчитанная температура в i -й день, $O_{Ts}^{Tr}(K)$ – количество дней, для которых выполнено условие

$$|Tr_i - Ts_i| \leq K.$$

Тогда максимальная абсолютная ошибка аппроксимации (Me) вычисляется по формуле

$$Me = \max_{i=1, N} |Ts_i - Tr_i|,$$

средняя абсолютная ошибка аппроксимации (Se) – по формуле

$$Se = \frac{\sum_{i=1}^N |Ts_i - Tr_i|}{N},$$

среднее квадратичное отклонение (Sc) – по формуле

$$Sc = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Tr_i - Ts_i)^2}{N}},$$

вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры от замеренной не превышает 2 °C (S_2) – по формуле

$$S_2 = \frac{O_{Ts}^{Tr}(2)}{N},$$

вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры от замеренной не превышает 5 °C (S_5) – по формуле

$$S_5 = \frac{O_{T_s}^{Tr}(5)}{N}.$$

Результат анализа расчётов минимальных температур каждым способом показан в табл. 2-7.

Таблица 2

Результат анализа расчётов минимальных температур 1-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 23.000000 | 4.608219 | 6.104568 | 0.339726 | 0.698630 |
| 2 | 26.500000 | 5.197260 | 6.881681 | 0.293151 | 0.627397 |
| 3 | 24.666667 | 4.321461 | 5.834657 | 0.317808 | 0.709589 |
| 4 | 22.750000 | 4.408219 | 5.878449 | 0.358904 | 0.673973 |
| 5 | 19.800000 | 4.144110 | 5.580818 | 0.350685 | 0.731507 |
| 6 | 16.500000 | 4.251598 | 5.604188 | 0.375342 | 0.660274 |
| 7 | 20.857143 | 4.061057 | 5.399003 | 0.358904 | 0.715068 |
| 8 | 15.000000 | 3.950000 | 5.068529 | 0.336986 | 0.706849 |
| 9 | 24.333333 | 4.210959 | 5.802922 | 0.389041 | 0.698630 |

Таблица 3

Результат анализа расчётов минимальных температур 2-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 48.823013 | 16.644296 | 19.795322 | 0.057534 | 0.158904 |
| 2 | 53.340295 | 16.853485 | 20.190029 | 0.054795 | 0.147945 |
| 3 | 48.611226 | 17.716527 | 20.937879 | 0.043836 | 0.134247 |
| 4 | 57.792105 | 17.695417 | 21.580405 | 0.049315 | 0.153425 |
| 5 | 54.275680 | 17.856682 | 21.230964 | 0.054795 | 0.158904 |
| 6 | 56.483940 | 18.949075 | 22.400239 | 0.041096 | 0.123288 |
| 7 | 51.062490 | 17.740275 | 21.026875 | 0.065753 | 0.153425 |
| 8 | 49.053752 | 18.956181 | 22.405808 | 0.049315 | 0.134247 |
| 9 | 53.890565 | 18.593461 | 22.034804 | 0.068493 | 0.145205 |

Таблица 4

Результат анализа расчётов минимальных температур 3-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 54.592598 | 18.747252 | 23.244999 | 0.063014 | 0.172603 |
| 2 | 51.578500 | 17.103945 | 20.345362 | 0.073973 | 0.147945 |
| 3 | 56.949592 | 19.049160 | 23.100800 | 0.057534 | 0.153425 |
| 4 | 57.377885 | 17.760533 | 21.612210 | 0.052055 | 0.150685 |
| 5 | 57.957732 | 20.126148 | 24.401277 | 0.032877 | 0.142466 |
| 6 | 55.199346 | 19.107508 | 22.417512 | 0.030137 | 0.131507 |
| 7 | 54.997379 | 18.952397 | 22.919717 | 0.052055 | 0.150685 |
| 8 | 47.627092 | 19.160362 | 22.473449 | 0.041096 | 0.150685 |
| 9 | 48.897080 | 18.346592 | 22.011013 | 0.041096 | 0.150685 |



Таблица 5

Результат анализа расчётов минимальных температур 4-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 31.898973 | 4.722450 | 6.406929 | 0.304110 | 0.616438 |
| 2 | 33.853963 | 5.700690 | 7.673291 | 0.221918 | 0.534247 |
| 3 | 24.510463 | 5.065925 | 6.469048 | 0.249315 | 0.567123 |
| 4 | 25.459122 | 5.292077 | 6.619231 | 0.213699 | 0.569863 |
| 5 | 19.990723 | 4.452528 | 5.577007 | 0.268493 | 0.627397 |
| 6 | 17.078567 | 4.610475 | 5.904842 | 0.268493 | 0.641096 |
| 7 | 27.810443 | 4.689597 | 6.189363 | 0.246575 | 0.641096 |
| 8 | 19.417411 | 5.028096 | 6.493479 | 0.271233 | 0.602740 |
| 9 | 28.251434 | 5.442744 | 7.424328 | 0.263014 | 0.594521 |

Таблица 6

Результат анализа расчётов минимальных температур 5-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 27.008869 | 4.321506 | 5.934902 | 0.347945 | 0.706849 |
| 2 | 28.903238 | 5.084493 | 7.048122 | 0.282192 | 0.616438 |
| 3 | 19.971760 | 4.472720 | 5.835002 | 0.306849 | 0.632877 |
| 4 | 19.580390 | 4.505214 | 5.839750 | 0.336986 | 0.641096 |
| 5 | 15.316974 | 3.987597 | 5.041442 | 0.326027 | 0.671233 |
| 6 | 15.668365 | 4.409216 | 5.689383 | 0.347945 | 0.649315 |
| 7 | 22.472599 | 4.066213 | 5.401778 | 0.339726 | 0.695890 |
| 8 | 16.377958 | 4.840224 | 6.190756 | 0.282192 | 0.605479 |
| 9 | 32.184084 | 5.091001 | 7.039357 | 0.290411 | 0.635616 |

Таблица 7

Результат анализа расчётов минимальных температур 6-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 20.570967 | 6.244665 | 7.521592 | 0.164384 | 0.443836 |
| 2 | 19.386995 | 5.738560 | 7.204438 | 0.202740 | 0.515068 |
| 3 | 25.009861 | 6.563545 | 8.324987 | 0.210959 | 0.476712 |
| 4 | 28.249342 | 6.548468 | 8.434867 | 0.186301 | 0.457534 |
| 5 | 27.365059 | 6.534311 | 8.533460 | 0.205479 | 0.476712 |
| 6 | 27.206052 | 7.219102 | 8.964836 | 0.142466 | 0.391781 |
| 7 | 25.663559 | 7.251767 | 9.029605 | 0.150685 | 0.405479 |
| 8 | 20.367547 | 6.422565 | 8.029436 | 0.186301 | 0.457534 |
| 9 | 21.543580 | 6.771430 | 8.307379 | 0.169863 | 0.427397 |

Результат анализа расчётов максимальных температур каждым способом показан в табл. 8-13.

Таблица 8

Результат анализа расчётов максимальных температур 1-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 21.000000 | 5.906849 | 7.410840 | 0.268493 | 0.534247 |
| 2 | 22.000000 | 5.126027 | 6.446088 | 0.290411 | 0.569863 |
| 3 | 16.333333 | 4.556164 | 5.681420 | 0.293151 | 0.630137 |
| 4 | 17.750000 | 4.484247 | 5.735419 | 0.306849 | 0.663014 |
| 5 | 18.600000 | 4.664658 | 5.951098 | 0.290411 | 0.627397 |
| 6 | 18.000000 | 4.462557 | 5.565680 | 0.290411 | 0.630137 |
| 7 | 14.428571 | 4.501370 | 5.473432 | 0.254795 | 0.616438 |
| 8 | 13.250000 | 3.642808 | 4.494284 | 0.328767 | 0.747945 |
| 9 | 17.333333 | 4.510502 | 5.580750 | 0.282192 | 0.632877 |

Таблица 9

Результат анализа расчётов максимальных температур 2-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 51.614048 | 16.796137 | 20.627061 | 0.049315 | 0.156164 |
| 2 | 54.061434 | 16.959408 | 20.634318 | 0.071233 | 0.189041 |
| 3 | 47.951671 | 18.119270 | 21.702229 | 0.068493 | 0.147945 |
| 4 | 55.378216 | 18.572606 | 22.746429 | 0.082192 | 0.197260 |
| 5 | 58.083299 | 17.376011 | 20.932992 | 0.065753 | 0.161644 |
| 6 | 56.186016 | 19.754763 | 23.405319 | 0.041096 | 0.112329 |
| 7 | 50.648784 | 18.382735 | 21.597387 | 0.052055 | 0.120548 |
| 8 | 47.226891 | 18.508303 | 22.224149 | 0.084932 | 0.186301 |
| 9 | 52.869988 | 18.903335 | 22.570453 | 0.060274 | 0.126027 |

Таблица 10

Результат анализа расчётов максимальных температур 3-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 53.378013 | 19.265642 | 23.705275 | 0.065753 | 0.178082 |
| 2 | 50.772332 | 17.890774 | 21.160906 | 0.057534 | 0.153425 |
| 3 | 57.121574 | 19.579711 | 23.356488 | 0.057534 | 0.164384 |
| 4 | 55.091871 | 18.731548 | 22.901695 | 0.071233 | 0.202740 |
| 5 | 64.490802 | 20.664026 | 24.833535 | 0.038356 | 0.112329 |
| 6 | 55.144762 | 20.009454 | 23.560107 | 0.041096 | 0.115068 |
| 7 | 52.794698 | 19.035224 | 22.848087 | 0.076712 | 0.156164 |
| 8 | 47.141500 | 18.610648 | 22.302239 | 0.087671 | 0.183562 |
| 9 | 48.656832 | 18.647732 | 22.109715 | 0.054795 | 0.136986 |



Таблица 11

Результат анализа расчётов максимальных температур 4-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 24.735213 | 5.288523 | 6.488868 | 0.221918 | 0.517808 |
| 2 | 30.155095 | 5.802235 | 7.423860 | 0.227397 | 0.517808 |
| 3 | 22.900261 | 5.163107 | 6.242488 | 0.219178 | 0.528767 |
| 4 | 18.301810 | 5.334979 | 6.405984 | 0.191781 | 0.484932 |
| 5 | 19.276430 | 4.916699 | 5.887444 | 0.227397 | 0.542466 |
| 6 | 14.644691 | 4.669360 | 5.651187 | 0.249315 | 0.580822 |
| 7 | 23.832511 | 4.788950 | 6.071914 | 0.249315 | 0.589041 |
| 8 | 14.186066 | 4.439987 | 5.403758 | 0.284932 | 0.602740 |
| 9 | 20.896962 | 5.153759 | 6.723954 | 0.279452 | 0.591781 |

Таблица 12

Результат анализа расчётов максимальных температур 5-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 20.274950 | 4.964499 | 6.114447 | 0.246575 | 0.531507 |
| 2 | 25.564769 | 5.383105 | 6.926006 | 0.213699 | 0.542466 |
| 3 | 16.977585 | 4.739812 | 5.744774 | 0.213699 | 0.594521 |
| 4 | 17.260825 | 4.868044 | 5.881821 | 0.232877 | 0.545205 |
| 5 | 15.199521 | 4.556426 | 5.494524 | 0.249315 | 0.583562 |
| 6 | 16.512431 | 4.448006 | 5.377089 | 0.249315 | 0.608219 |
| 7 | 19.090971 | 4.504802 | 5.461350 | 0.238356 | 0.594521 |
| 8 | 14.244652 | 4.294666 | 5.211181 | 0.268493 | 0.630137 |
| 9 | 26.503986 | 4.977971 | 6.359406 | 0.235616 | 0.569863 |

Таблица 13

Результат анализа расчётов максимальных температур 6-м способом

| Число предшествующих лет | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 19.600910 | 5.042573 | 6.403400 | 0.260274 | 0.564384 |
| 2 | 19.017273 | 4.881160 | 6.196264 | 0.293151 | 0.561644 |
| 3 | 20.452099 | 5.019521 | 6.401566 | 0.252055 | 0.586301 |
| 4 | 18.888809 | 5.136652 | 6.490064 | 0.235616 | 0.556164 |
| 5 | 26.465274 | 5.137938 | 6.823550 | 0.249315 | 0.589041 |
| 6 | 20.081689 | 6.045223 | 7.457599 | 0.194521 | 0.479452 |
| 7 | 18.672788 | 5.682707 | 7.206667 | 0.282192 | 0.531507 |
| 8 | 16.291364 | 4.745382 | 5.865493 | 0.265753 | 0.583562 |
| 9 | 18.242270 | 5.735277 | 6.958081 | 0.210959 | 0.473973 |

Анализируя результаты расчётов, видим, что максимальная абсолютная ошибка, средняя абсолютная ошибка и среднее квадратичное отклонение должны быть как можно меньше, а вероятности – как можно больше.

Первый вывод, который можно сделать по всем результатам: не существует закономерности в зависимости между точностью экстраполяции и количеством периодов, на основе которых производились расчёты. По этой причине включение в анализ данных параметра «количество предшествующих лет» нецелесообразно. Для каждого из методов расчёта возьмём средние арифметические всех выходных параметров и сведём их в табл. 14 (для минимумов) и 15 (для максимумов).

Таблица 14

Усреднённые значения результатов анализа для минимумов

| Номер метода | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 21.4897 | 4.3503 | 5.795 | 0.3467 | 0.6913 |
| 2 | 52.5926 | 17.8895 | 21.2891 | 0.0539 | 0.1455 |
| 3 | 53.9086 | 18.706 | 22.5029 | 0.0493 | 0.1501 |
| 4 | 25.3635 | 5.0005 | 6.5286 | 0.2563 | 0.5994 |
| 5 | 21.9427 | 4.5309 | 6.0023 | 0.3178 | 0.6505 |
| 6 | 23.9292 | 6.5883 | 8.2612 | 0.1799 | 0.4502 |

Таблица 15

Усреднённые значения результатов анализа для максимумов

| Номер метода | Максимальная абсолютная ошибка | Средняя абсолютная ошибка | Среднее квадратичное отклонение | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 2 °C | Вероятность того, что отклонение рассчитанной температуры не превышает 5 °C |
|--------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 17.6328 | 4.6506 | 5.8154 | 0.2895 | 0.628 |
| 2 | 52.6689 | 18.1525 | 21.8267 | 0.0639 | 0.1553 |
| 3 | 53.8436 | 19.1594 | 22.9753 | 0.0612 | 0.1559 |
| 4 | 20.9921 | 5.062 | 6.2555 | 0.239 | 0.5507 |
| 5 | 19.07 | 4.7486 | 5.8412 | 0.2387 | 0.5778 |
| 6 | 19.7458 | 5.2696 | 6.6447 | 0.2493 | 0.5473 |

По результатам расчётов чётко видно, что метод вычисления средних значений температур является наиболее адекватным по всем рассчитываемым показателям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Челухин, В. А. Электротепловой преобразователь низкопотенциальной энергии перепада температур / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электротехника. Вестник ТОГУ. – 2014. – № 4(35). – С. 93-98.
2. Челухин, В. А. Перспективы применения «умных» материалов в возобновляемой энергетике / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон, М. С. Кружаков // Актуальные вопросы современной науки: сборник науч. трудов. Вып. 51 / под общ. ред. С. С. Чернова. – Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2017. – С. 114-124.
3. Челухин, В. А. Оценка эффективности использования перепада температур день-ночь для целей энергетики / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон, М. С. Кружаков // Промышленная энергетика. – 2018. – № 6. – С. 45-49.
4. Патент № 2564994 Российской Федерации МПК H02N 11/00(2006.01), H02M 3/04(2006.01). Низкопотенциальный преобразователь энергии перепада температур с элегазом: № 2014112477: заявлено 31.03.2014: опубликовано 10.10.2014 / Челухин В. А., Абрамсон Е. В.; заявитель ФГБОУВПО «КнАГТУ». – 5 с.
5. Челухин, В. А. Применение «умных» материалов для решения вопроса эффективности преобразователя перепада температур / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон, М. С. Кружаков / Инновации в науке. – 2017. – № 13(74). – С. 34-38.
6. Челухин, В. А. К вопросу электроснабжения поселений на Марсе / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электричество. – 2016. – № 5. – С. 45-52.
7. Historical Weather [Электронный ресурс] / Weather underground. – Режим доступа: <https://www.wunderground.com/history> (дата обращения: 09.10.2019).

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

Космынин А. В., Хвостиков А. С., Щетинин В. С., Смирнов А. В.
A. V. Kosmynin, A. S. Khvostikov, V. S. Shchetinin, A. V. Smirnov

О ТЕОРИИ ГАЗОВОЙ СМАЗКИ И ОДНОЙ ЕЁ ЗАДАЧЕ

ON THE THEORY OF GAS LUBRICATION AND ONE OF ITS CHALLENGE

Космынин Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: avkosc@knastu.ru.

Mr. Alexander V. Kosmynin – Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: avkosc@knastu.ru.

Хвостиков Александр Станиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: knastu@list.ru.

Mr. Alexander S. Khvostikov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Thermal Power Plants, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: knastu@list.ru.

Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: schetynin@mail.ru.

Mr. Vladimir S. Shchetinin – Doctor of Engineering, Professor, Department of Machine Building, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: schetynin@mail.ru.

Смирнов Алексей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: seu@knastu.ru.

Mr. Aleksey V. Smirnov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Plants, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: seu@knastu.ru.

Аннотация. Кратко изложена история развития теории газовой смазки. Показаны преимущества применения частично пористых газостатических подшипников. Описан экспериментальный стенд для исследования течения воздушной плёнки в коаксиальном зазоре, образованном конусными поверхностями.

Summary. The history of the development of the gas lubrication theory is briefly described. The advantages of using partially porous gas-static bearings are shown. An experimental stand for studying the flow of an air film in a coaxial gap formed by conical surfaces is described.

Ключевые слова: высокоскоростная роторная система, газостатическая опора, малый газовый коаксиальный зазор, течение смазки, характеристики смазочного слоя.

Key words: high-speed rotor system, gas-static bearing, small co-axial gas gap, lubrication flow, lubricant layer characteristics.

УДК 621.822.574

За более чем столетний период развития теоретических положений проектирования подшипников на газовой смазке они прошли путь от некоего интересного, но в технике малопригодного объекта до технического устройства, способного эффективно решить целый ряд сложных инженерных задач. В настоящее время известно успешное применение газовых подшипников в таких обла-

стях промышленности, как атомная энергетика, станкостроение, навигационное оборудование специального назначения, прецизионно-измерительная техника, компрессорное оборудование газоперекачивающих станций, турбостроение и т.д. Это стало возможным, поскольку использование газовой смазки в узлах трения позволяет существенно снизить энергетические потери на трение, заметно повысить параметрическую надёжность, скоростные параметры и нагруженно-жёсткостные характеристики высокоскоростных роторных систем.

Начало планомерным исследованиям в области теории газовой смазки было положено в 30-х годах прошлого века в связи с необходимостью решения проблем приборо- и станкостроения. В СССР с конца 40-х годов расчётами течения газовой смазки занималась группа учёных экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков под руководством С. А. Шейнberга и Ленинградского политехнического института под руководством Л. Г. Лойцянского. Результатом выполненных исследований стала детально разработанная теория газовой смазки, учитывающая основные физические эффекты.

Центры изучения газовой смазки в СССР возникли в Ростове (А. И. Снопов), Челябинске (Г. А. Завьялов, С. Г. Дадаев), на Дальнем Востоке (В. С. Виноградов, А. И. Самсонов, А. В. Космынин), во Владимире (В. А. Легаев, В. В. Гавшин). В Красноярске разрабатываются газостатические и гидростатические опоры с активными и адаптивными ограничителями наддува (С. Н. Шатохин, Я. Ю. Пикалов, В. Г. Демин, В. А. Коднянко).

Из работ постсоветского периода выделим монографию Ю. В. Пешти [7], где приводится достаточно подробная классификация газовых опор разных типов и методы их расчёта. В работе И. Е. Сипенкова [8] приводятся конструкции и методы расчёта газовых подшипников скольжения, наибольшее внимание уделено газодинамическим опорам навигационного оборудования. В работах представлены всесторонние результаты исследований цилиндрических частично пористых аэростатических опор высокоскоростных шпиндельных узлов [2; 3]. Широкий обзор исследований жидкостных и газовых опор скольжения приводится в справочнике Э. Д. Брауна [1].

Зарубежные исследования, посвящённые вопросам теории газовой смазки, отражены в обзорных монографиях J. Bernard [10], Yokio Hori [17], G. W. Stachowiak [15].

В этих и других работах рассмотрены наиболее общие проблемы теории газовой смазки, которые состоят в нахождении распределения давления в зазоре, расхода газа, подаваемого на смазку, результирующих сил и моментов, потерю мощности за счёт трения в стационарных и нестационарных условиях работы газовых подшипников, а также в определении условий устойчивой работы опор.

Многочисленные исследования показали, что во избежание вибраций необходимо стремиться к весьма малым диаметрам питающих отверстий (меньше 0,1 мм). Стремление к малым диаметрам питателей диктуется также необходимостью получения приемлемого расхода газа через подшипник. Однако при постоянном давлении наддува и толщине смазочного слоя вместе с уменьшением расхода газа при весьма малых диаметрах питателей уменьшается и несущая способность подшипника. Поэтому приходится увеличивать число питающих отверстий. Это обстоятельство привело к идею применения в газостатических подшипниках вкладышей с пористой структурой.

Пористые радиальные подшипники с внешним наддувом газа были впервые описаны в работе Робинсона и Стерри [14], а первые результаты экспериментального исследования пористых упорных подшипников представлены в работе С. А. Шейнберга и В. Г. Шустер [9].

Исследования показали, что пористые газовые подшипники с внешним наддувом обладают при прочих равных условиях повышенной жёсткостью смазочного слоя, несущей и демпфирующей способностью, они менее склонны к потере устойчивости по сравнению с различными конструкциями газовых опор. Это достигается за счёт множества питающих отверстий в пористом вкладыше, при помощи которых давление наддува эффективно распределяется по всему пространству зазора.

Несмотря на указанные преимущества, пористые подшипники в настоящее время имеют ограниченное применение, что объясняется нестабильными размерами вкладыша и большим расходом воздуха, а отсюда и повышенным расходом энергии на обеспечение сжатым воздухом.

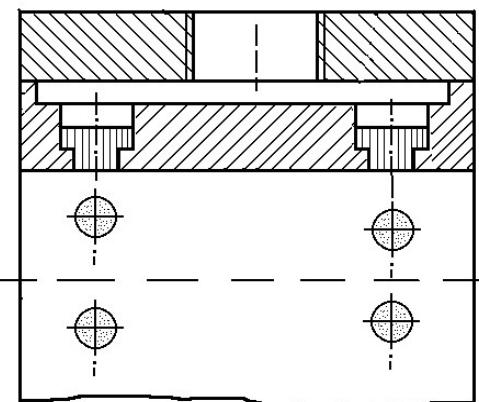


Рис. 1. Конструкция частично пористого газового подшипника

Начало использованию пористых вставок в подшипниках с внешним наддувом воздушной смазки положили теоретические и экспериментальные работы Дональдсона и Паттерсона [11; 12]. Позднее был представлен подробный анализ круговых упорных газовых подшипников с пористыми вставками [13], а затем проведено исследование статических характеристик частично пористого радиального подшипника с использованием приближения короткого подшипника [16].

В работе Маджумдара [6] дан анализ статических характеристик радиального подшипника, имеющего один ряд пористых вставок, которые размещены по окружности в центральной части опоры. К сожалению, список работ по исследованию частично пористых опор, выполненных в других организациях, на этом и ограничивается.

Многочисленные исследования, выполненные в Комсомольском-на-Амуре государственном университете (КнАГУ), показали, что при высокой скорости вращения ротора цилиндрические частично пористые двухрядные опоры имеют неоспоримое преимущество в нагруженных и жёсткостных характеристиках перед всеми известными конструкциями газовых подшипников [4; 5].

Приходится констатировать, что к настоящему времени как в отечественной, так и в зарубежной печати полностью отсутствуют публикации каких-либо результатов исследований по течению воздушной смазки, нагнетаемой через систему дискретно расположенных пористых матриц в малом коаксиальном зазоре, образованном конусными поверхностями.

Схема такого течения газовой смазки показана на рис. 2.

Вместе с тем представляется, что решение этой задачи будет способствовать существенному продвижению к решению проблемы обеспечения высокой точности вращения роторов и упрощению конструкции узлов трения высокоскоростных роторных систем без заметного изменения нагруженочно-жёсткостных характеристик газовых опор.

Именно такие исследования и проводятся сейчас в КнАГУ, в ходе которых задействован экспериментальный стенд, показанный на рис. 3.

Экспериментальный стенд состоит из механической части, средств измерения и нагружения. Пневматическая часть стенда обеспечивает питание сжатым воздухом газовых подшипников 6 и регулировку режимных параметров. Внешняя нагрузка на объект исследования создаётся поршневым устройством 7, которое позволяет плавно менять нагрузку путём изменения давления воздуха, подаваемого в штоковую часть пневмоцилиндра. Усилие нагрузки регистрируется с помощью пьезоэлектрического датчика силы АС20 8, расположенного между нагружающим устройством и нагруженным подшипником 2. Приводом ротора 4 служит малоразмерная осевая воздушная турбина 5. Перемещения вала в смазочном слое регистрируются индукционными датчиками АР200А-0,5,0,5,1 3. Расход воздуха, подаваемого на смазку, измеряется методом переменного перепада давления с помощью стандартных сужающих устройств (диафрагмы). Частота вращения вала измеряется с помощью тахометра 1.

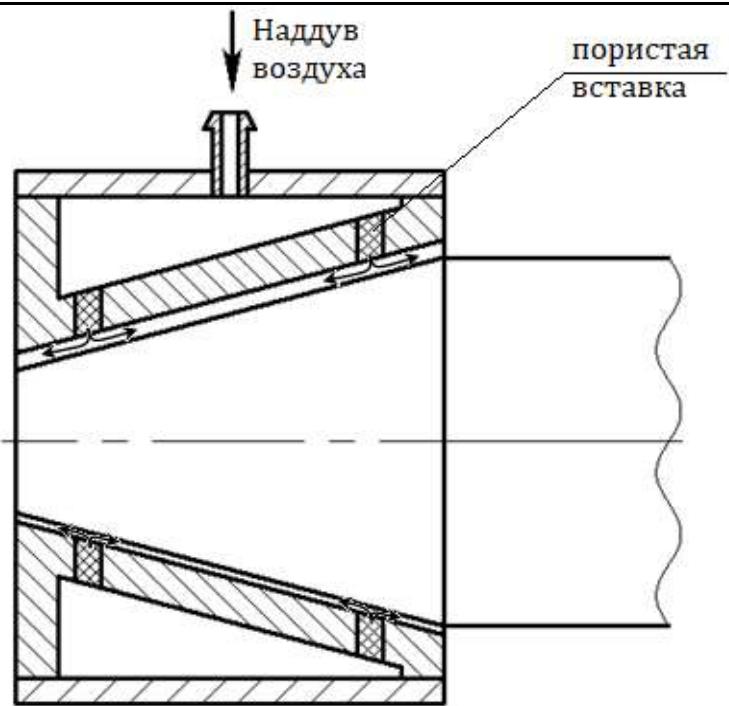


Рис. 2. Схема течения газовой смазки в малом коаксиальном зазоре
переменной толщины

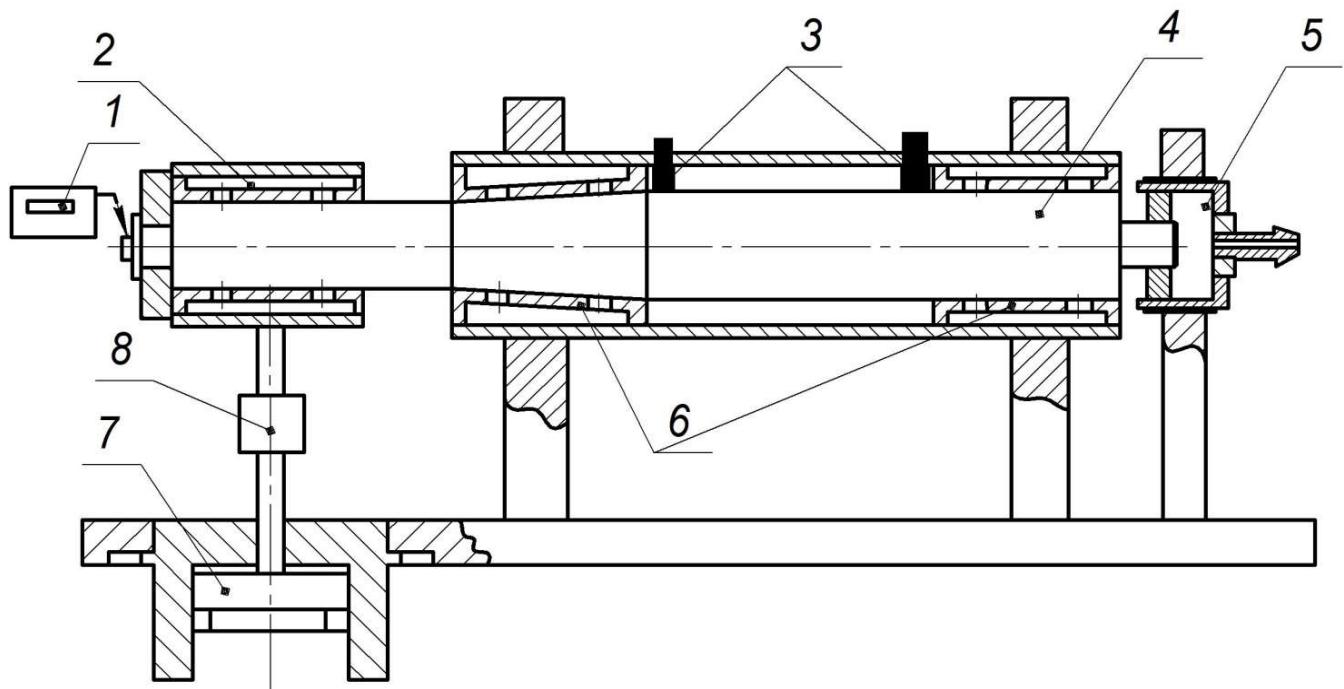


Рис. 3. Экспериментальный стенд для определения характеристик конусного газового подшипника: 1 – измеритель частоты вращения; 2 – нагружочный подшипник;
3 – индуктивные датчики; 4 – ротор; 5 – приводная турбина; 6 – опорные подшипники;
7 – нагружающее устройство; 8 – датчик силы



В целом результаты исследований могут быть востребованы, например, в ультрапрецизионных станках для обработки высокоточных деталей, в инновационных изделиях многих отраслей промышленности: авиакосмической, кораблестроительной, машиностроении, автомобилестроении, в турбинной и компрессорной технике, приборостроении, при изготовлении метрологического оборудования, лазерно-оптических систем и гелиоэнергетических установок, элементов микроэлектроники и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная трибология. Итоги и перспективы / Э. Д. Браун, И. А. Буяновский, Н. А. Воронин и др.; РАН, Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова; отв. ред. К. В. Фролов. – М.: URSS: ЛКИ, 2008. – 476 с.
2. Частично пористые газостатические опоры шпиндельных узлов. Теория и эксперимент: моногр. / А. В. Космынин, С. В. Виноградов, В. С. Виноградов, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов; под ред. А. В. Космынина. – М.: РАЕ, 2011. – 126 с.
3. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А. В. Космынин, С. В. Виноградов, В. С. Виноградов, В. С. Щетинин, А. В. Смирнов и др. – М.: РАЕ, 2005. – 218 с.
4. Космынин, А. В. Высокоскоростные шпиндельные узлы с опорами на газовой смазке / А. В. Космынин, С. П. Чернобай, В. И. Шаломов // Вестник машиностроения. – 2007. – № 1. – С. 51-53.
5. Космынин, А. В. Газостатические опоры с пористыми вставками высокоскоростных шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков / А. В. Космынин, С. П. Чернобай // Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2006. – № 5. – С. 17-19.
6. Маджумдар, В. С. Газовые радиальные подшипники с пористыми вставками и внешним наддувом / В. С. Маджумдар // Проблемы трения и смазки. – 1980. – Т. 102. – № 1. – С. 125-128.
7. Пешти, Ю. В. Газовая смазка / Ю. В. Пешти. – М.: МГТУ им. Баумана, 1993. – 381 с.
8. Прецизионные газовые подшипники / И. Е. Сипенков, А. Ю. Филиппов, Ю. Я. Болдырев, Б. С. Григорьев и др.; под ред. А. Ю. Филиппова и И. Е. Сипенкова. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.
9. Шейнберг, С. А. Виброустойчивый пористый аэростатический подпятник / С. А. Шейнберг, В. Г. Шустер // Станки и инструменты. – 1960. – № 11. – С. 23-27.
10. Bernard J. Hamrock, Steven R. Schmid, Bo O. Jacobson Fundamental of Fluid Film Lubrication / NEW YORK: BASEL, 2004.
11. Donaldson I. S., Patterson E. B. Some experiments on plain externally pressurized with porous inserts at supply pressures up to 3,1 MN/m² // In.: 5th Gas Bearing Symposium. Southampton. March 23-26, 1971. – Vol. 2. – P. 26.
12. Donaldson I. S., Patterson E. B. Porous Inserts in Plain Externally Pressurized Air Bearing at High Pressure – Analysis and Experiment // First World Conf. in Industrial Tribology. – New Delhi, 1972.
13. McCrea R. J., Donaldson I. S. The Significance of Fluid Inertia and Slip Velocity in the Steady-State Analysis of Externally Pressurized Gas-Lubricated Partially Porous Thrust Bearings // 7th Intl. Gas Bearing Symposium, BHRA, England. – Paper A1.
14. Robinson C. H., Sterry F. The Static Strength of Pressure Fed. Gas Journal Bearings AERE ED/R ,1672, Harwell, Berkshire, England, 1958.
15. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Engineering tribology // Elsevier, 2005. 872 p.
16. Szwarcman M., Gorez R. Externally pressurized gas bearings with partially porous wall // In.: 6th International Gas Bearing Symposium 27-29 March 1974. Univ. Southampton. – Paper C7. – P. C7-89-C7-102.
17. Yokio Hori Hydrodynamic Lubrication. Hicom. Japan. Springer. 2006. 231 p.

Максимов Е. А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДИСКА КОЛЕСА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

Максимов Е. А.

E. A. Maksimov

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДИСКА КОЛЕСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE RADIAL MOVINGS OF THE WHEEL DISC UNDER THE UP LOAD INFLUENCE

Максимов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика» Южноуральского государственного университета (Россия, Челябинск); тел 8(951)430-68-31. E-mail: maksimov50@mail.ru.

Mr. Evgenii A. Maksimov – PhD, Associate Professor, Technical Mechanic Department, South Ural State University (Russia, Chelyabinsk); tel. 8(951)430-68-31. E-mail: maksimov50@mail.ru.

Аннотация. В настоящее время производство дисковых колёс является преобладающим в силу простоты конструкции, точности крепления колёс на ступицах и отработанности технологии серийного производства. Большое разнообразие конструкций колёс объясняется в основном широким диапазоном режимов нагрузки и условиями эксплуатации автомобилей. Особенности конструкции колёс определяют различные подходы к расчёту колеса на прочность при различных условиях его нагружения. Для оценки прочности, усталости, напряжённо-деформированного состояния (НДС) колеса необходимо знать перемещения диска колеса под действием вертикальной нагрузки. Теоретические работы по оценке НДС для колёс автомобиля показали, что они важны для понимания работы конструкции, особенно при ударной нагрузке. Опыты по определению радиальных перемещений, возникающих в диске колеса автомобиля при приложении вертикальной нагрузки, проводились на опытной установке, состоящей из гидравлического пресса, диска, устройства для установки диска в вертикальном положении, кронштейна, часового индикатора, нижней плиты. Перемещения диска колеса автомобиля измерялись с помощью тензодатчиков.

Summary. Currently, the production of disc wheels is predominant due to the simplicity of the design, the accuracy of wheel mounting on the hubs and the sophistication of serial production technology. A wide variety of wheel designs is mainly due to a wide range of load modes and vehicle operating conditions. The design features of the wheels determine different approaches to calculating the strength of a wheel under different loading conditions. To assess the strength, fatigue, stress-strain state (VAT) of the wheel, it is necessary to know the movement of the wheel disk under the influence of vertical load. Theoretical work on the assessment of VAT for car wheels showed that they are important for understanding the work of the structure, especially under shock load. The experiments to determine the radial displacements occurring in the disc of a car's wheel when applying vertical load were carried out on a pilot installation consisting of a hydraulic press, a disk, a device for installing the disk in a vertical position, an arm, an hour indicator, and a bottom plate. Displacements of a disk of a wheel of a car were measured using strain gauges.

Ключевые слова: опытная установка, вертикальная нагрузка, измерение радиальных перемещений, автомобильное колесо.

Key words: pilot plant, up load, measurement of the radial moving, automobile wheel.

УДК 629.11

Введение. В настоящее время производство дисковых колёс является преобладающим в силу простоты конструкции, точности крепления колёс на ступицах и разработки технологии серийного производства. Большое разнообразие конструкций колёс объясняется в основном широким диапазоном режимов нагрузки и условиями эксплуатации автомобилей. Особенности конструкции колёс определяют различные подходы к расчёту колеса на прочность при различных условиях его нагружения. Для оценки прочности, усталости колеса необходимо знать его напряжённо-деформированное состояние (НДС). Теоретические работы по оценке НДС для колёс авто-

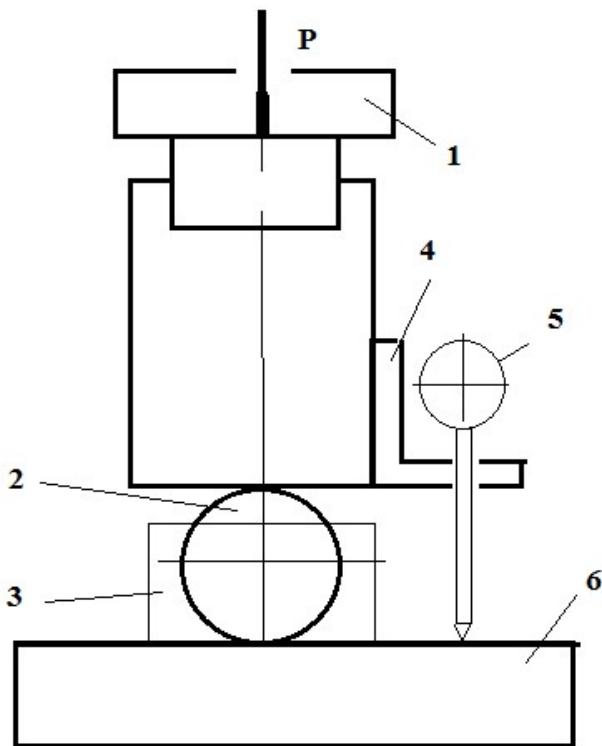
мобиля показали, что они важны для понимания работы конструкции, особенно при ударной нагрузке.

В настоящее время при испытании колёс автомобиля моделируются: испытания на усталостную прочность при динамической радиальной нагрузке, а также на определение сопротивления колеса удару под углом 30 и 13 градусов [1–8]. Данные испытания необходимо дополнить измерениями радиальных перемещений, возникающих в диске колеса при приложении вертикальной нагрузки.

Грузоподъёмность автотранспортного средства (АТС) определяется нагрузкой на колесо и в первую очередь зависит от прочности диска колеса [9–12]. Обычно при сборке автомобиля на заводе-производителе пользуются техническим паспортом, который определяет грузоподъёмность на колесо, диаметр, толщину диска колёс и др. Известно, что нагрузка на колесо определяется вертикальной силой, прикладываемой к оси [13–21].

Расчётная схема (метод исследования). Для определения радиальных перемещений, возникающих в диске колеса при приложении вертикальной нагрузки, была сконструирована опытная установка.

Схема установки для исследования радиальных перемещений диска под действием вертикальной нагрузки представлена на рис. 1.



1 – гидравлический пресс; 2 – диск; 3 – устройство для установки диска в вертикальном положении; 4 – кронштейн; 5 – индикатор; 6 – нижняя плита

Рис. 1. Схема установки для исследования радиальных перемещений диска под действием вертикальной нагрузки

Исследования проводились на опытной установке, в состав которой вошли гидравлический пресс, диск, устройство для установки диска в вертикальном положении, кронштейн, часовой индикатор, нижняя плита.

Перемещения диска колеса 635 мм измерялись с помощью тензодатчиков. В качестве датчиков использовались тензорезисторы типа ФКП-0, 5-100 сопротивлением 100 Ом (см. рис. 2).

Тензорезисторы приклеивались на диск с помощью специального клеящего состава.

Тензорезисторы подключались с помощью полумоста к усилительной аппаратуре. Для последующей обработки измеряемые сигналы поступали на компьютер с программным обеспечением. Тензорезисторы приклеивались в радиальном направлении под углом $\pi/2$, что позволяло получить картину деформации по вертикальной оси вдоль направления приложения нагрузки и по горизонтальной оси, где перемещения минимальны (см. рис. 3).

Нагружение дисков вертикальной нагрузкой проводилось с помощью гидравлического пресса ПГМ-500.



Рис. 2. Тензорезистор типа ФКП-0, 5-100

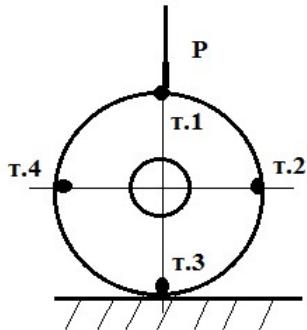


Рис. 3. Схема расположения точек измерения на диске

Величина силы, действующей на диск, определялась после тестирования по показаниям индикатора часового типа. Диск нагружался вертикальной нагрузкой $P_1 = 10$ кН, $P_2 = 20$ кН, $P_3 = 30$ кН.

Результаты исследований. Радиальные перемещения диска под действием вертикальной нагрузки представлены в табл. 1.

Таблица 1

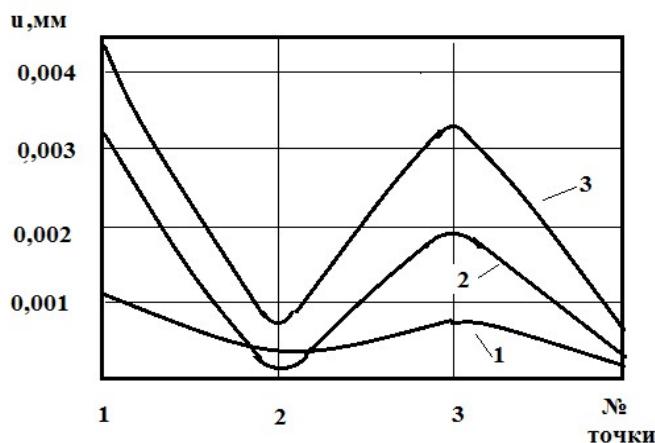
Радиальные перемещения диска (u) под действием вертикальной нагрузки, мм

| № точки | $P_1 = 10$ кН | $P_2 = 20$ кН | $P_3 = 30$ кН |
|---------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 0,0011 | 0,0025 | 0,0044 |
| 2 | 0,0003 | 0,0001 | 0,0008 |
| 3 | 0,00095 | 0,0021 | 0,0031 |
| 4 | 0,0002 | 0,0007 | 0,0009 |

Радиальные перемещения диска под действием вертикальной нагрузки представлены на рис. 4.

Анализ данных, представленных в табл. 1, и графиков на рис. 4 показал, что максимальные радиальные перемещения наблюдаются по вертикальной оси, в которой приложена вертикальная нагрузка (точки 1 и 3), минимальные – по горизонтальной оси в точках 2 и 4.

Значения радиальных перемещений при нагрузке в вертикальном направлении $P_3 = 30$ кН больше, чем при на нагрузке $P_2 = 20$ кН.



1 – $P_1 = 10 \text{ кН}$; 2 – $P_2 = 20 \text{ кН}$; 3 – $P_3 = 30 \text{ кН}$

Рис. 4. Радиальные перемещения диска под действием вертикальной нагрузки

Сравнение максимальных деформаций в точке 1 показало, что перемещение при нагрузке $P_3 = 30 \text{ кН}$ больше, чем при нагрузке $P_2 = 20 \text{ кН}$, на 43 %, перемещение при нагрузке $P_2 = 20 \text{ кН}$ больше, чем при нагрузке $P_1 = 10 \text{ кН}$, на 26 %.

Эпюра радиальных перемещения диска под действием вертикальной нагрузки представлена на рис. 5.

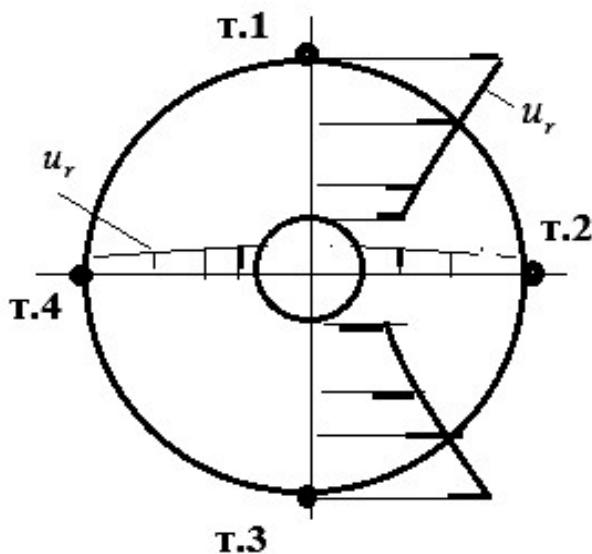


Рис. 5. Эпюра радиальных перемещения диска под действием вертикальной нагрузки

Анализ рис. 5 показал, что эпюры радиальных перемещений диска под действием вертикальной нагрузки имеют максимальное значение в месте приложения силы и месте контакта диска с нижним основанием. Значение эпюр постепенно снижается к центральному отверстию.

Выводы.

- Опыты по определению радиальных перемещений, возникающих в диске колеса при приложении вертикальной нагрузки, проводились на опытной установке.
- Измерения показали, что максимальные радиальные перемещения наблюдаются по вертикальной оси, в которой приложена вертикальная нагрузка, минимальные – по горизонтальной.

оси. Значения радиальных перемещений при нагрузке в вертикальном направлении $P_3 = 30$ кН больше, чем при на нагрузке $P_2 = 20$ кН.

3. Сравнение максимальных деформаций показало, что перемещение при нагрузке $P_3 = 30$ кН больше, чем при нагрузке $P_2 = 20$ кН, на 43 %, перемещение при нагрузке $P_2 = 20$ кН больше, чем при нагрузке при $P_1 = 10$ кН, на 26 %.

4. Показано, что эпюры радиальных перемещений диска под действием вертикальной нагрузки имеют максимальное значение в месте приложения силы и месте контакта диска с нижним основанием. Значение эпюр постепенно снижается к центральному отверстию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахламов, В. К. Автомобили, конструкции и элементы расчёта / В. К. Вахламов. – М.: Академия, 2006. – 408 с.
2. Стуканов, В. А. Устройство автомобилей / В. А. Стуканов. – М.: Форум, 2017. – 496 с.
3. Стуканов, В. А. Литые алюминиевые колёса для легковых автомобилей: проектирование, изготовление, контроль качества / В. А. Стуканов // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 9. – С. 29-31.
4. Балабин, И. В. Расчёт напряжённо-деформированного состояния диска автомобильного колеса / И. В. Балабин // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 6. – С. 18-19.
5. Кнороз, В. И. Шины и колеса / В. И. Кнороз. – М.: Машиностроение, 1975. – 183 с.
6. Демьянушко, И. В. Литые автомобильные колёса для легковых автомобилей / И. В. Демьянушко // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 9. – С. 29-31.
7. Демьянушко, И. В. Расчёт и экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния автомобильных колёс на статическую нагрузку / И. В. Демьянушко. – М.: МАДИ, 2014. – 48 с.
8. Балабин, И. В. Автомобильные и тракторные колёса и шины / И. В. Балабин. – М.: МАМИ, 2012. – 920 с.
9. Балабин, И. В. Напряжённо-деформированное состояние колеса с учётом влияния изгибающего момента и осевой силы / И. В. Балабин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2002. – № 37. – С. 18-20.
10. Балабин, И. В. Анализ влияния жёсткости обода на его силовое взаимодействие с пневматической шиной / И. В. Балабин // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 12. – С. 20-23.
11. Manikanda P. Analysis of static stress in an alloy wheels of the passenger car // International journal of research. 2015, vol 16. P. 17-25.
12. Kaanovs A. Investigation into the dynamics of wheel spray released from a rotating tyre of a simplified vehicle modern // Journal of wing engineering and industrial dynamics. 2019. vol. 184. P. 228-246.
13. Vasilions C. Sensorless control of permanent magnet synchronous machine // Mashines. 2020. 8 (1). P. 820-823.
14. Omer U. Analysis of two body abrasive wear on machine parts due to single wear particle // Article. 2018. № 5. P. 34-37.
15. Varade B. A review on friction and wear behaviors of brake's friction materials // Journal of material science. 2018. № 6. p. 103-107.
16. Prerag V. Particularity of the forming barcode image on the face of mashinparts with a laser // Applied mashinical and materials. 2020. Vol. 80. P. 83-87.
17. Fosberry R. A. Investigation of stresses in public service vehicle tire wheels // The institution of mechanical engineers, automobile division proceedings (London). Pt. 3 – 2002. – P. 91-100.
18. Ishihara K., Kawashima H. Research of fatigue strength of whills // Tranzasion Japan Society of mechanical engineer. 2009. № 513. P. 1254-1258.
19. Konishi H., Fujiwara A., Katsura T., Nakata M. Estimation of impact strength of aluminum wheels // Kobe Steel report. 2007. – № 2. – P. 25-28.
20. Morita Y., Ishihara K. Stress analysis in automobile wheels by mains MKCH // Sumimoto Metals. 2007. № 3. P. 245-263.
21. Demianusko I. The reliability of assembly steel wheels with using FEM analysis // Proceedings of the 14-th internation mashin word congress. 2015. Vol. 1. P. 543-549.



Отряскина Т. А., Хортик М. В.
T. A. Otryaskina, M. V. Hortik

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ

STUDY OF DEFORMATION PROCESSES DURING FRICTION

Отряскина Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Mrs. Tatiana A. Otryaskina – PhD in Engineering; Associate Professor, Machines and Apparatuses of Chemical Production Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Хортик Матвей Васильевич – магистр кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Matvey V. Hortik – Master's Degree Student, Machines and Apparatuses of Chemical Production Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Трение материалов представляет собой деформационный процесс разрушения. В работе процесс трения рассматривается с позиций физической мезомеханики. Показано, что ключевую роль в этом процессе играет развитие деформационных структур, которые являются результатом активационных и диссипативных многоуровневых динамических процессов. Одной из форм организации диссипативной структуры при трении является образование границ раздела между мезокластерами. В качестве косвенных количественных показателей оценки диссипативности мезоструктуры можно использовать фрактальную размерность и плотность границ раздела.

Summary. The friction of materials is a deformation process of destruction. The work uses physical mesomechanics. It is shown that a key role in this process is played by the developed deformation structure, which is the result of activation and dissipative multilevel dynamic processes. One of the forms of organization of the dissipative structure during friction is the formation of interfaces between mesoclusters. Indirect quantitative indicators for assessing the dissipativity of the mesostructure can use the fractal value and the size of the interface.

Ключевые слова: трение, пластическая деформация, микротвёрдость поверхности, фрактальная размерность.

Key words: friction, plastic deformation, metallographic research, fractal dimension.

УДК 621.7.015

Введение

Основной принцип работы любых механизмов заключается в относительном перемещении сопряжённых поверхностей, которое сопровождается трением и износом, вследствие чего происходит выход деталей из строя. Проблема трения является одной из наиболее общих и важных, определяющих в значительной мере развитие и прогресс в области машиностроения и эксплуатации техники. Трение является одним из основных видов вредного сопротивления, в то же время на действиях сил трения основан ряд важнейших технологических процессов и работ механизмов: процессы прокатки, резания, торможения, трение в механизме сцепления.

Трение деталей оказывает решающее влияние на долговечность и эксплуатационную надёжность узлов. Увеличение зазора в сопряжениях вследствие износа часто сопровождается снижением коэффициента полезного действия, возникновением ударных нагрузок, увеличением потерь на трение и интенсивности износа сопряжённых деталей [7].

Большой интерес представляет новая энергетическая теория А. Д. Дубина: он отмечает, что нельзя правильно оценить и раскрыть природу трения и износа на основе одних только общих за-

конов классической механики, и считает, что трение есть процесс пластической деформации поверхностного слоя в результате передачи энергии от одного тела к другому.

Процесс пластической деформации традиционно связывается с динамикой развития двойников, дислокаций, дисклиниаций и межзёренным скольжением, которые в модельном представлении в конечном итоге сводятся к дислокационным структурам [1; 2]. Теоретические положения мезомеханики открывают новые перспективы исследования деформационных процессов и наиболее полно отражают принципы синергетики [3].

Развитие деформационных структур начинается с повышения плотности дислокаций в самом зерне. Основными стадиями этого процесса являются: предельно возможное повышение плотности дислокаций, образование субграниц, выход дислокаций на границы зёрен и формирование развитых межзёренных границ. В результате высокой развитости границ между соседними зёrnами начинают проявляться сильные фрикционные тормозные взаимодействия и отдельные группы зёрен объединяются в устойчивые кластеры – это и есть основной носитель мезомасштабного уровня, который занимает промежуточное положение между микро- и макроуровнем.

Пластическая деформация на мезоуровне связывается с ротационной динамикой мезокластеров, а диссиpация энергии происходит в результате работы трения на границах раздела таких кластеров. Следовательно, внутренним границам раздела отводится особая роль в диссиpативных процессах, активность которых возрастает с повышением степени гетерогенности материала. Если активность этого диссиpативного канала недостаточна, то по границам мезокластера формируются более мелкие ротационно-трансляционные вихри, и структуру таких вихрей можно рассматривать как форму организации диссиpативного процесса. Прочность материала определяется активностью диссиpативных каналов на разных масштабных уровнях [4]. Динамика развития ротационно-трансляционных вихрей определяется законом самосогласования и имеет вид [4]

$$\sum_{i=1}^N \text{rot}(J_i) = 0, \quad (1)$$

где J_i – поток дефектов на i -м масштабном уровне.

Из формулы (1) следует, что именно поворотные моды деформации обуславливают самоорганизацию пластического течения, которые охватывают все возможные масштабные уровни. На микромасштабном уровне носителями ротационных мод являются дисклиниации, а на мезоуровне – ротационно-поворотные вихри.

Методика исследования

Два образца кольцевой формы, наружный и внутренний диаметры которых составляли соответственно 40 и 30 мм, подвергались трению между собой торцевыми поверхностями. Неподвижный образец из стали 20Х крепился на столе вертикально-сверлильного станка, а подвижный из закалённой стали У10 – в сверлильном патроне. Трение осуществлялось всухую при номинальном контактном давлении 100 МПа. При длительном испытании нагрев образцов за счёт работы трения приводил к размягчению контактных слоёв, адгезионному схватыванию и сварке трением. Из образцов из стали 20, прошедших различные стадии процесса, вырезались участки контактной поверхности, из которых приготавливались металлографические шлифы.

Металлографические исследования проводились с помощью микроскопа Микро-200, оснащённого видеокамерой. Обработка оцифрованных изображений осуществлялась программой Image.Pro.Plus.5.1 и предусматривала следующие процедуры: пространственную калибровку, корректировку изображения, выделение и утонение границ раздела до одного пикселя, измерение периметра, площади и фрактальной размерности границ раздела.

Мезомеханика формирования контактных структур при трении

Основные закономерности мезопроцессов пластической деформации при стандартных испытаниях образцов на растяжение, сжатие или кручение принципиально сохраняются и при формировании контактных структур при трении. Особенность протекания этих процессов связана со специ-

фикой напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв, в схеме нагружения которых преобладают сдвиговые тангенциальные напряжения.

Обратимся к некоторым конкретным примерам образования и развития мезокластеров, зафиксированных в поверхностных слоях образца из стали 20Х при сухом трении с закалённой инструментальной сталью У10. Выбор исследуемых сталей обеспечивал локализацию пластической деформации в контактных слоях более мягкого материала (сталь 20Х).

Процесс пластической деформации носит статистический характер как по распределению вдоль контактной поверхности, так и во времени. Это означает, что на одной и той же поверхности существуют локальные области, находящиеся на различных стадиях развития деформационного и трибологического процесса.

На рис. 1 приведена начальная стадия формирования кластера под участком контактной поверхности, находящегося под влиянием сильной адгезионной связи. Видно, что пластический сдвиг сместил «пласт», вокруг которого чётко просматривается будущая граница мезофрагмента 1 и область 2 развития ротационно-трансляционных вихрей. Зона 1 имеет ориентацию относительно направления скольжения, близкую к 45° , указывая на высокую интенсивность напряжения в этой локальной области. Область 2 формируется в результате сдвига кластера в направлении, параллельном плоскости скольжения. На основании представленного можно заключить, что пластическая деформация на мезоструктурном уровне носит неоднородный характер и речь не может идти ни о каких плавных градиентах скоростей и степеней деформации в приконтактных слоях. Локализация деформации происходит на внутренних границах раздела мезообразований в области, охваченной ротационно-трансляционными вихрями.

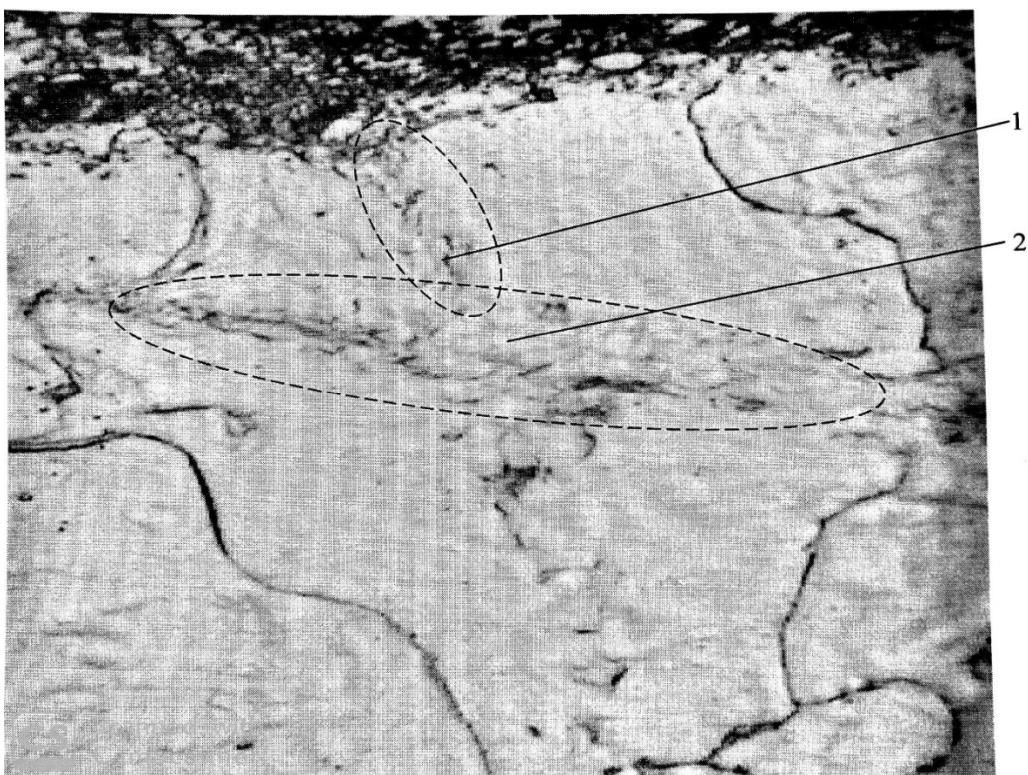


Рис. 1. Начальная стадия формирования мезокластеров ($\times 1000$)

На рис. 2 представлена более развитая структура ротационно-трансляционных вихрей (область 1), имеющая явно выраженную фрактальность. Фрактальная организация проявляется в том, что между крупными ротационно-трансляционными вихрями располагаются более мелкие, не нарушающие сплошности материала. С уменьшением диаметрального размера ротационно-трансляционного

вихря их количество возрастает. В целом структура ротационно-трансляционных вихрей отличается однородностью и равновесностью относительно друг друга. Подтверждением этого является то, что стыки границ раздела представляют преимущественно комбинации из трёх зёрен с углами сопряжения близкими к 120° , а, согласно закону Херринга, это одно из главных проявлений равновесности [5; 7]. В то же время между самим мезокластером и ротационно-трансляционными вихрями имеет место высокая степень неравновесности. Смежный угол со стороны кластера близок к 180° , что указывает на высокую величину химического потенциала и подтверждает предположение о повышенной плотности дефектов кристаллического строения внутри этого образования.

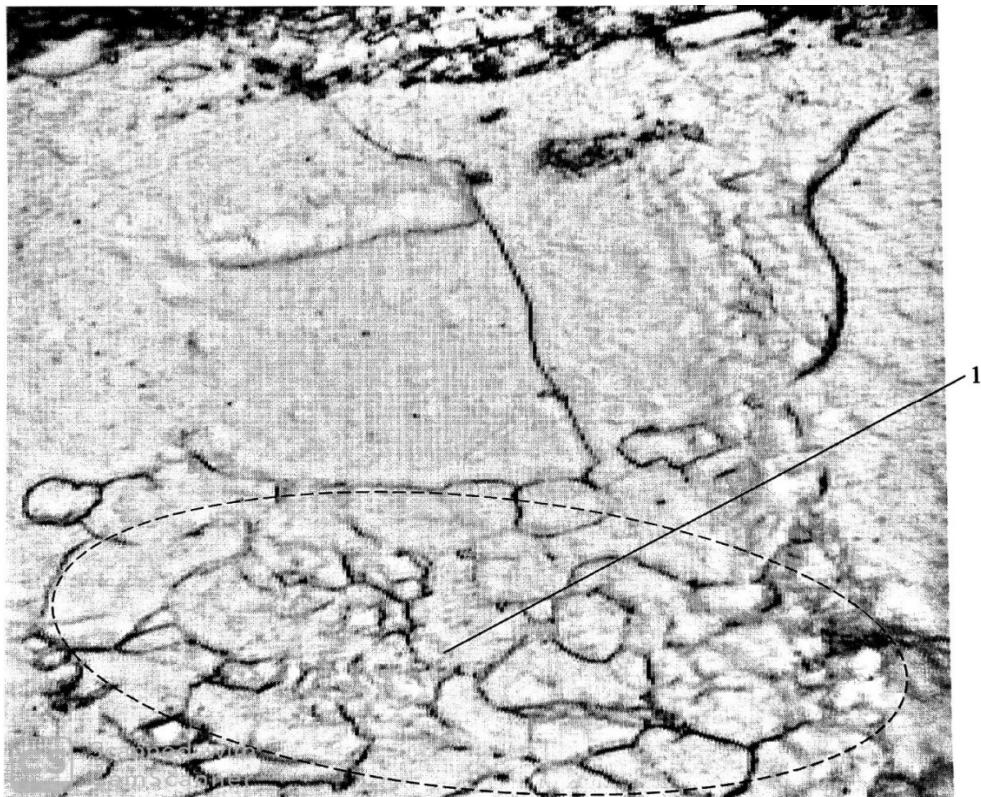


Рис. 2. Область развитых ротационно-трансляционных вихрей (x1000)

Это в свою очередь означает, что объединительным фактором формирования мезофрагмента является не только развитость внутренних границ раздела, но и повышенная плотность дефектов кристаллического строения и отсутствие потока этих дефектов внутри кластера.

При металлографическом травлении эффект выявления внутренних границ раздела обусловлен развитием гальванопар, возникающих между зерном и границей. Кластерная организация отличается повышенной величиной химического потенциала из-за высокой плотности дефектов кристаллического строения и плотной границей раздела, поэтому внутри него активность гальванопар минимальна и вытравливание осуществляется только по границам раздела кластеров.

На рис. 3 приведена стадия активного функционирования ротационно-трансляционных вихрей и разбивки мезокластеров на более мелкие фрагменты. Смежные углы тройных стыков имеют сильное отклонение от 120° , что указывает на высокую степень неравновесности. Для структуры такого типа характерно наличие интенсивных потоков дефектов кристаллического строения микромасштабного уровня и высокая плотность дисклиниаций, повышающая ротационную активность мезоструктуры.

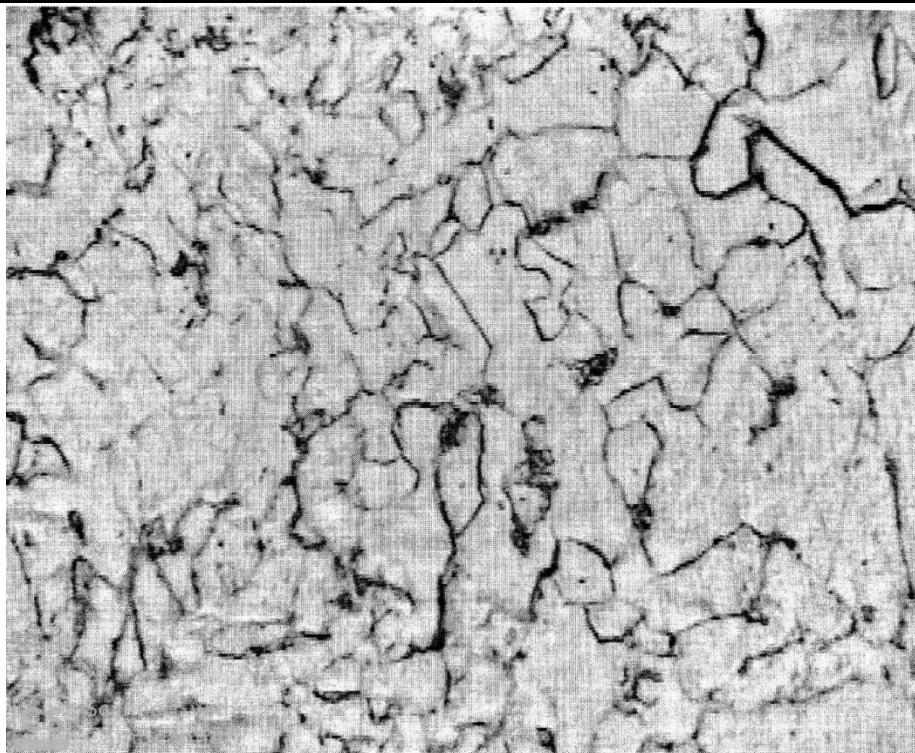


Рис. 3. Стадия мезокластеров и их переход в ротационно-трансляционные вихри (x1000)

Диссипативную активность всего мезоструктурного формирования можно оценить по формуле

$$q_d \propto \frac{\pi N \tau_T \omega \xi}{\Delta^{D-1}},$$

где N – общее количество мезоструктурных фрагментов; τ_T – предел текучести при сдвиге; ω – средняя скорость ротационного поворота; ξ – функция распределения диаметральных размеров мезокластеров; Δ – средний диаметральный размер мезокластера; D – фрактальная размерность границ раздела.

Плотность мощности диссипативного оттока определяется не только фрактальными параметрами мезоструктуры, но и активностью ротационных мод, динамика которых не влияет на геометрические макромасштабные характеристики материала, или, иными словами, на геометрическую устойчивость изделия.

С повышением фрактальной размерности и уменьшением диаметрального размера мезокластера плотность мощности диссипативного процесса возрастает. Оценочный расчёт показывает, что при среднем диаметральном размере ротационно-трансляционного вихря 10 мкм и скоростях пластической деформации, соответствующих стандартным методам растяжения, плотность мощности диссипативного потока составляет 10^{12} Вт/см², что на 5 порядков выше плотности энергетического потока, отводимого кооперативным движением дислокаций, и этот диссипативный канал не имеет принципиальных ограничений [6].

Фрактальную организацию внутренних границ раздела можно количественно оценить плотностью границ, определяемой по формуле

$$\rho_g = \frac{\sum P}{2 \sum S'}$$

где P – периметр ротационно-трансляционного вихря; S – площадь его поперечного сечения.

Полученная величина является аналогом обратной величины фрактального соотношения

$$\rho_r \propto \frac{0}{\Delta^D}.$$

При этом сама фрактальная размерность характеризует степень развитости границы раздела, а плотность границ больше отражает размерную организацию всей мезоструктуры.

В табл. 1 приведено значение плотности внутренних границ раздела микро- и мезоструктуры поверхностных слоёв и фрактальная размерность границ, прошедших различные стадии трибологического процесса.

На основании представленных результатов можно заключить:

- Развитие контактных микро- и мезоструктур при трении происходит в направлении повышения фрактальной размерности и плотности границ раздела.
- Контактная структура, находящаяся на более высокой стадии трибологического развития, характеризуется высокой степенью развитости границ раздела и малым размером трансляционно-ротационных вихрей.

Таблица 1

Плотности границ раздела и фрактальная размерность контактных слоёв образца из стали 20Х

| Время | Исходное состояние | 10 мин | 30 мин | 60 мин |
|---|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Плотность границ раздела ρ_r , 1/мкм | 0,055...0,065 | 0,045...0,055 | 0,065...0,110 | 0,125...0,145 |
| Фрактальная размерность D | 1,0535...1,0545 | 1,0540...1,0555 | 1,0555...1,0565 | 1,0560...1,0570 |

Заключение

Синергетические процессы формирования контактных структур при трении более полно отражаются на мезомасштабном уровне. Одной из форм организации диссипативной структуры при трении является образование границ раздела между мезокластерами. В качестве косвенных количественных показателей оценки диссипативности мезоструктуры можно использовать фрактальную размерность и плотность границ раздела.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн, М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
2. Гордиенко, Л. К. Субструктурное упрочнение металлов и сплавов / Л. К. Гордиенко. – М.: Наука, 1973. – 234 с.
3. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – 618 с.
4. Панин, В. Е. Синергетические принципы физической мезомеханики / В. Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3, № 6. – С. 5-36.
5. Кристиан, Д. Теория превращения в металлах и сплавах. Термодинамика и общая кинетическая теория / Д. Кристиан; пер. с англ. А. Я. Беленьского и Д. Е. Темкина. – М.: Мир, 1978. – 808 с.
6. Якубов, Ф. Я. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким. – Симферополь: Крымское отделение учпедгиз, 2005. – 300 с.
7. Гаркунов, Д. Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д. Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. – 616 с.



Сарилов М. Ю., Копылов А. И.
M. Yu. Sarilov, A. I. Kopylov

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

INFLUENCE OF EDM MACHINING PARAMETERS ON PROCESSED SURFACE ROUGHNESS

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Mechanical Engineering», Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Копылов Андрей Иванович – студент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Andrey I. Kopylov – Student, «Mechanical Engineering» Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлено исследование влияния параметров электроэрозионной обработки, в частности частоты следования импульсов f и скважности q , на шероховатость обработанной поверхности различных обрабатываемых материалов, а также на количество гребней в импульсе k . Для реализации поставленной цели использовалась методика центрального композиционного ротатабельного планирования. Для широты эксперимента применялись различные по своим физико-механическим свойствам обрабатываемые материалы: высокопрочная сталь 30ХГСА, дюралюминиевый сплав Д1, коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т и высокопрочный титановый сплав ВТ20. В результате определены сочетания скважности и количества гребней в импульсе при работе в оптимальном диапазоне частот следования импульсов, позволяющие получить наименьшую шероховатость обработанной поверхности.

Summary. The article presents a study of the influence of EDM machining parameters on the surface roughness of various processed materials, in particular, pulse repetition rate f and duty cycle q , as well as the number of ridges in pulse k . To achieve this goal, we used the methodology of central compositional rotatable planning. The materials processed that vary in their physical and mechanical properties: high-strength steel 30KhGSA, duralumin alloy D1, corrosion-resistant steel 12Kh18N10T and high-strength titanium alloy VT20 were used in the experiment. As a result, combinations of duty cycle and the number of ridges in the pulse were determined when operating in the optimal range of pulse repetition frequencies, which allows to obtain the smallest roughness of the processed surface.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, сплавы, межэлектродный промежуток, режимы обработки, частота следования импульсов, скважность, количество гребней в импульсе.

Key words: EDM machining, alloys, interelectrode gap, processing modes, pulse repetition rate, duty cycle, number of ridges in a pulse.

УДК 621.9.048

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) является сложным многофакторным процессом, на выходные параметры которого оказывают влияние электрические, гидравлические, температурные режимы обработки. Поэтому выбор оптимальных по качеству технологических режимов связан с большим объёмом экспериментальных работ. Для получения максимальной информативности при минимальном объёме экспериментальных работ при разработке стратегии исследования на первом этапе был использован метод математического планирования эксперимента. Рассмотрим методику исследования влияния параметров ЭЭО на шероховатость обработанной поверхности

сти. По данным ряда работ, существуют оптимальные значения частоты следования импульсов f и скважности q , а также количества гребней в импульсе k [1; 2; 10], обеспечивающие минимальное значение параметра шероховатости Ra . Это означает, что зависимость шероховатости от количества гребней в импульсе, скважности и частоты следования импульсов $Ra(k, q, f)$ имеет ярко выраженный экстремальный характер.

Следовательно, полный факторный эксперимент, позволяющий получить только линейную модель исследуемого процесса, не подходит в качестве метода исследования.

В работе [9] описана методика центрального композиционного ротатабельного планирования, позволяющая получить математическую модель исследуемого процесса в виде

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (1)$$

где \hat{y} – параметр оптимизации; b_{ij} – коэффициенты регрессии; x_i – факторы.

Очевидно, что зависимость (1) позволяет с высокой точностью описать зависимость параметра оптимизации от факторов в случае экстремального характера исследуемого процесса.

Для определения конкретного вида зависимости $Ra(k, q, f)$ в виде (1) был проведён следующий эксперимент: на серийном копировально-прошивочном станке модели 4Л721Ф1 с генератором ШГИ 63/200 при различных режимах производилась электроэррозионная обработка заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА, дюралюминиевого сплава Д1, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т и высокопрочного титанового сплава ВТ20 специально спроектированным медным электродом диаметром 8,5 мм из прутковой меди марки М1. В качестве рабочей жидкости использовали РЖ-3 ТУ 38.1001964-83. Обработка на станке проводилась по схеме торец в торец без дополнительной прокачки жидкости [8]. Время фиксировалось ручным секундомером. В процессе обработки снимался вибрационный сигнал с очень высокой частотой дискретизации (порядка 630 кГц), с обработанных поверхностей были сняты профилограммы (профилометр марки 530, подсоединённый к цифровому осциллографу на базе ЭВМ) и получен параметр Ra шероховатости. Также были установлены оптимальные диапазоны частоты следования импульсов для различных типов исследуемых материалов (с учётом возможностей станка).

Таблица кодирования, разработанная в соответствии с этим методом, выглядит следующим образом (см. табл. 1).

Для получения конкретных зависимостей $Ra(k, q, f)$ в виде (1) был проведён ряд опытов в соответствии с матрицей планирования (см. табл. 2). Для обеспечения высокой адекватности математической модели измерение в каждой точке повторялось три раза. В процессе обработки также снимался вибрационный сигнал с помощью датчика KD-35.

В соответствии с работой [3] коэффициенты регрессии определяются по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,166338 \cdot (0y) - 0,056791 \cdot \sum_{j=1}^k (iiy), \\ b_i &= 0,073224 \cdot (iy), \\ b_{ii} &= 0,062500 \cdot (iiy) + 0,06889 \cdot \sum_{j=1}^k (iiy) - 0,056791 \cdot (0y), \\ b_{ij} &= 0,012500 \cdot (ijy), \end{aligned} \quad (2)$$

где $(0y) = \sum_u y_u$; $(iy) = \sum_u x_{iu}y_u$; $(iiy) = \sum_u x_{iu}^2 y_u$; $(ijy) = \sum_u x_{iu}x_{ju}y_u$.

Для дальнейшей работы с полученными данными необходимо определить воспроизводимость эксперимента по критерию Кохрена G и сравнить полученный результат с табличным значением. Адекватность линейной модели определяется при помощи критерия Фишера F , статистическая значимость коэффициентов – при помощи критерия Стьюдента. Затем производилась оценка значимости полученных коэффициентов регрессии. Далее разработанная модель переводится в натуральный вид, т.е. кодированные значения факторов меняются на физические величины [4].



Таблица 1

Таблица кодирования

| Уровни факторов | Обозначение | <i>k</i> | <i>q</i> | <i>f</i> | |
|------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | | <i>x</i> ₁ | <i>x</i> ₂ | <i>x</i> ₃ | Материал |
| Нулевой | 0 | 6 | 2,2 | 179,071 | Д1 |
| | | | | 71,000 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 40,841 | ВТ20 |
| | | | | 113,097 | 30ХГСА |
| Верхний | +1 | 8 | 3 | 201,062 | Д1 |
| | | | | 79,168 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 50,265 | ВТ20 |
| | | | | 125,663 | 30ХГСА |
| Нижний | -1 | 4 | 1,5 | 157,080 | Д1 |
| | | | | 62,832 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 31,416 | ВТ20 |
| | | | | 100,531 | 30ХГСА |
| Дополнительный верхний | +1,682 | 10 | 3,5 | 216,060 | Д1 |
| | | | | 84,739 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 56,693 | ВТ20 |
| | | | | 134,233 | 30ХГСА |
| Дополнительный нижний | -1,682 | 2 | 1,3 | 142,082 | Д1 |
| | | | | 57,261 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 24,988 | ВТ20 |
| | | | | 91,961 | 30ХГСА |
| Интервал варьирования | δ_i | 2 | 0,5 | 21,991 | Д1 |
| | | | | 8,168 | 12Х18Н10Т |
| | | | | 9,425 | ВТ20 |
| | | | | 12,566 | 30ХГСА |

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

| № экспери-мента | <i>x</i> ₁ | <i>x</i> ₂ | <i>x</i> ₃ | <i>x</i> ₁ ² | <i>x</i> ₂ ² | <i>x</i> ₃ ² | <i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂ | <i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃ | <i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃ | \bar{y} |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|-----------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | |
| 2 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | |
| 3 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | |
| 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | |
| 5 | -1 | -1 | 1 | +1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | |
| 6 | +1 | -1 | 1 | +1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | |
| 7 | -1 | +1 | 1 | +1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | |
| 8 | +1 | +1 | 1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | |
| 9 | -1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 10 | +1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 11 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 12 | 0 | +1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 13 | 0 | 0 | -1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | |
| 14 | 0 | 0 | +1,682 | 0 | 0 | +2,829 | 0 | 0 | 0 | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Продолжение табл. 2

| № экспери- мента | x_1 | x_2 | x_3 | x_1^2 | x_2^2 | x_3^2 | x_1x_2 | x_1x_3 | x_2x_3 | \bar{y} |
|---------------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

После алгебраических преобразований полученного уравнения оно приобретает окончательный вид и позволяет провести исследование разработанной модели аналитическими методами.

Анализ зависимости шероховатости обработанной поверхности от режима обработки электроэррозионной обработки. Результаты эксперимента по методике, описанной выше, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты эксперимента

| № экспери- мента | x_1 | x_2 | x_3 | \bar{y} | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|-----------|-------|-----------|-------|
| | | | | 30ХГСА | Д1 | 12Х18Н10Т | ВТ20 |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 4,711 | 2,382 | 5,92 | 2,162 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | 4,792 | 2,277 | 6,00 | 2,227 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 4,895 | 2,342 | 6,12 | 2,232 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 6,311 | 3,116 | 7,91 | 2,961 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 2,944 | 1,899 | 3,69 | 1,376 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 4,325 | 2,432 | 4,71 | 1,860 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | 4,326 | 2,017 | 4,74 | 1,976 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 4,932 | 2,435 | 6,19 | 2,343 |
| 9 | -1,682 | 0 | 0 | 5,649 | 2,738 | 7,04 | 2,571 |
| 10 | +1,682 | 0 | 0 | 5,672 | 2,729 | 7,10 | 2,600 |
| 11 | 0 | -1,682 | 0 | 5,727 | 2,868 | 7,15 | 2,673 |
| 12 | 0 | +1,682 | 0 | 5,783 | 2,948 | 7,43 | 2,707 |
| 13 | 0 | 0 | -1,682 | 6,337 | 3,13 | 7,96 | 2,970 |
| 14 | 0 | 0 | +1,682 | 1,817 | 1,540 | 2,32 | 0,844 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 2,011 | 1,654 | 2,67 | 0,915 |

Воспроизводимость эксперимента определяется по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_n S_u^2} \leq G_{(0,05; f_n, f_k)},$$

где $S_{u \max}^2$ – максимальная дисперсия; $S_u^2 = \frac{\sum_{n=1}^m (y_n - \bar{y})^2}{m-1}$ – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов опыта на u -м сочетании уровней факторов; $G_{(0,05; f_n, f_k)}$ – табличное значение критерия



Кохрена на 5-процентном уровне значимости; $G_{30ХГСА} = 0,26$; $G_{Д1} = 0,24$; $G_{12Х18Н10Т} = 0,29$; $G_{ВТ20} = 0,25$; $G_{табл} = 0,33$.

Следовательно, эксперимент воспроизведим.

По формулам (2) были получены коэффициенты в формуле (1) для каждого из обрабатываемых материалов (см. табл. 4).

Таблица 4

Значения коэффициентов в формуле (1)

| Коэффициент | 30ХГСА | Д1 | 12Х18Н10Т | ВТ20 |
|-------------|--------|--------|-----------|--------|
| b_0 | 2,032 | 1,665 | 2,704 | 0,926 |
| b_1 | 0,258 | 0,118 | 0,326 | 0,124 |
| b_2 | 0,277 | 0,077 | 0,373 | 0,142 |
| b_3 | -0,863 | -0,300 | -1,180 | -0,410 |
| b_{11} | 1,143 | 0,305 | 1,330 | 0,518 |
| b_{22} | 1,176 | 0,366 | 1,407 | 0,556 |
| b_{33} | 0,583 | 0,173 | 0,647 | 0,279 |
| b_{12} | 0,070 | 0,095 | 0,266 | 0,068 |
| b_{13} | 0,061 | 0,035 | 0,074 | 0,007 |
| b_{23} | 0,036 | -0,085 | 0,053 | 0,035 |

Из данных табл. 4 видно, что наиболее значимыми являются факторы x_3 и квадраты факторов x_1^2 , x_2^2 . Следовательно, наибольшим влиянием на шероховатость обладают частота следования импульсов (причём зависимость обратная, т.е. чем выше частота следования импульсов, тем ниже шероховатость), квадраты скважности и количество гребней в импульсе.

Подставив коэффициенты из табл. 4 в формулу (1) получим зависимости параметра оптимизации от факторов $\bar{y} = f(x_1, x_2, x_3)$:

$$\bar{y}_{30ХГСА} = 2,032 + 0,258x_1 + 0,277x_2 - 0,863x_3 + 1,143x_1^2 + 1,176x_2^2 + 0,587x_3^2 + 0,070x_1x_2 + 0,061x_1x_3 + 0,036x_2x_3;$$

$$\bar{y}_{Д1} = 1,665 + 0,118x_1 + 0,077x_2 - 0,300x_3 + 0,305x_1^2 + 0,366x_2^2 + 0,173x_3^2 + 0,095x_1x_2 + 0,035x_1x_3 - 0,085x_2x_3;$$

$$\bar{y}_{12Х18Н10Т} = 2,704 + 0,326x_1 + 0,373x_2 - 1,180x_3 + 1,330x_1^2 + 1,407x_2^2 + 0,647x_3^2 + 0,266x_1x_2 + 0,074x_1x_3 + 0,053x_2x_3;$$

$$\bar{y}_{ВТ20} = 0,926 + 0,124x_1 + 0,142x_2 - 0,410x_3 + 0,518x_1^2 + 0,556x_2^2 + 0,279x_3^2 + 0,068x_1x_2 + 0,007x_1x_3 + 0,035x_2x_3.$$

Адекватность модели определяется по критерию Фишера $F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05;f_y;f_n)}$,

$$\text{где } S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum (y_{up} - \bar{y})^2}{n - k - 1}; S_y^2 = \frac{\sum s_u^2}{n};$$

$$F_{30ХГСА} = 1,208; F_{Д1} = 1,23; F_{12Х18Н10Т} = 1,28; F_{ВТ20} = 1,27; F_{\text{табл}} = 2,24.$$

Критерий Фишера показывает, что полученные модели адекватны.

Значимость коэффициентов регрессии определяется по формуле $|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{n}}$:

$$\Delta b_{i30ХГСА} = 0,026; \Delta b_{iД1} = 0,024; \Delta b_{i12Х18Н10Т} = 0,011; \Delta b_{iВТ20} = 0,026.$$

Таким образом, все коэффициенты в моделях статистически значимы, однако следует отметить, что коэффициенты b_{13} , b_{23} близки к границе значимости, что говорит об очень слабом совместном влиянии количества гребней в импульсе и частоты следования импульсов, скважности и частоты следования импульсов на шероховатость обработанной поверхности.

Данные модели необходимо перевести из факторного отображения в натуральный вид, т.е. перейти от функций вида $\bar{y} = f(x_1, x_2, x_3)$ к функциям вида $Ra = f(k, q, f)$ по формулам связи [11]:

$$x_1 = \frac{\rho - 0,04}{0,018}; x_2 = \frac{s_z - 0,233}{0,069};$$

$$x_{3_30ХГСА} = \frac{V - 113,097}{12,566}; x_{3_Д1} = \frac{V - 179,071}{21,991}; x_{3_12Х18Н10Т} = \frac{V - 71}{8,168}; x_{3_ВТ20} = \frac{V - 40,841}{9,425}.$$

Фактор x_3 , отображающий частоту следования импульсов, переводится в натуральный вид по своей зависимости для каждого обрабатываемого материала, так как эксперимент проводился в оптимальном диапазоне частот, который для каждого материала свой [6].

Проведя ряд алгебраических преобразований, получим зависимости шероховатости от количества гребней в импульсе, скважности и частоты следования импульсов $Ra = f(k, q, f)$:

$$\begin{aligned} Ra_{30ХГСА} &= 3528,1k^2 + 247,09q^2 + 0,004f^2 - 311,8k - 118,1q - \\ &\quad - 0,92f + 56,41kq + 0,27kf + 0,041qf + 77,42; \\ Ra_{ВТ20} &= 940,54k^2 + 76,97q^2 + 0,0003f^2 - 102,57k - 27,83q - \\ &\quad - 0,13f + 76,87kq + 0,09kf - 0,06qf + 19,77; \\ Ra_{Д1} &= 1600,1k^2 + 116,69q^2 + 0,0003f^2 - 135,65k - 56,71q - \\ &\quad - 0,31f + 54,94kq + 0,04kf - 0,05qf + 17,16; \\ Ra_{12Х18Н10Т} &= 4103,1k^2 + 295,54q^2 + 0,009f^2 - 396,02k - 147,61q - \\ &\quad - 1,56f + 214,56kq + 0,51kf - 0,09qf + 87,47. \end{aligned} \tag{3}$$

Зависимости (3) имеют явный экстремальный характер, показывающий минимум значения Ra шероховатости от количества гребней в импульсе и скважности, а также монотонную зависимость от частоты следования импульсов, причём с увеличением частоты следования импульсов влияние скважности и количества гребней в импульсе на высоту микронеровностей уменьшается [10].

Проведя дифференцирование по разным переменным и приравняв полученные уравнения к нулю, получим систему уравнений, решение которой позволяет определить численные значения параметров, обеспечивающих минимальную шероховатость:

$$\begin{cases} \frac{\partial Ra}{\partial k} = 0; \\ \frac{\partial Ra}{\partial q} = 0; \\ \frac{\partial Ra}{\partial f} = 0. \end{cases}$$

Получаемая при этом система приведена ниже (на примере 30ХГСА):

$$\begin{cases} 0,04122k + 0,27163q + 0,0073854f - 0,92442 = 0; \\ 494,18k + 56,409q + 0,04122f - 118,05 = 0; \\ 56,409k + 7056,2q + 0,27163f - 311,78 = 0. \end{cases} \tag{4}$$

Очевидно, что система (4) имеет единственное решение. Результаты решения систем уравнений типа (4) для всех материалов сведены в табл. 5.



Таблица 5

Минимальная шероховатость и параметры, её обеспечивающие

| Параметр | Материал | | | |
|---------------------------------------|----------|-------|-------|-----------|
| | 30ХГСА | Д1 | ВТ20 | 12Х18Н10Т |
| Количество гребней в импульсе k | 4 | 6 | 6 | 4 |
| Скважность q | 2,2 | 3 | 2,2 | 2,2 |
| Частота следования импульсов f | 44 | 66 | 88 | 66 |
| Минимальная шероховатость $R_{a\min}$ | 1,373 | 1,216 | 0,855 | 1,713 |

Анализ данных табл. 5 показывает, что количество гребней в импульсе, обеспечивающее минимальную шероховатость для всех типов материалов, составляет 4...6, а скважность – 2,2...3. При этом нужно учесть, что оптимальная частота следования импульсов – это характеристика скорее обрабатываемого материала, нежели условий обработки [6].

Таким образом, именно определённое сочетание скважности и количества гребней в импульсе при работе в оптимальном диапазоне частот следования импульсов позволяет получить наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Сочетание количества гребней в импульсе и скважности определяет важные параметры процесса электроэррозионного пробоя, такие как длительность импульса, значения тока и напряжения импульса, влияет на тепловые процессы при разряде. Именно поэтому сочетание этих двух факторов и определяет состояние поверхности после обработки.

Полученные результаты и их анализ говорят о единстве закономерностей процессов, происходящих в межэлектродном промежутке для всех исследованных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- Базелян, Э. М. Искровой разряд: учеб. пособие для вузов / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер. – М.: Изд-во МФТИ, 1997. – 320 с.
- Саушкин, Б. П. Электроэррозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Б. П. Саушкин, Ю. С. Елисеев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 437 с.
- Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. – Томск: Изд-во ГТУ, 1975. – 258 с.
- Немилов, Е. Ф. Электроэррозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
- Золотых, Б. Н. Физические основы электроэррозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 43 с.
- Сканави, Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г. И. Сканави. – М.: Физматгиз, 1958. – 907 с.
- Сарилов, М. Ю. Исследование плазменного канала и механизма теплопередачи в процессе электроэррозионной обработки / М. Ю. Сарилов, А. М. Злыгостев // Вестник ТОГУ. – 2011. – № 2. – С. 43-50.
- Сарилов, М. Ю. Исследование процессов электроэррозионной обработки / М. Ю. Сарилов, В. В. Мельников // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 6. – С. 893-898.
- Сарилов, М. Ю. Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэррозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, У. Е. Решетник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1(39). – С. 101-108.
- Сарилов, М. Ю. Повышение эффективности электроэррозионной обработки и качества обработанной поверхности / М. Ю. Сарилов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГту», 2016. – 236 с.
- Сарилов, М. Ю. К вопросу исследования пробоя при электроэррозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сарилов, Д. А. Палкин, М. В. Минаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1(41). – С. 83-92.
- Фотеев, Н. К. Технология электроэррозионной обработки / Н. К. Фотеев. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.

Содержание

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Афанасьева Ю. И., Рыбаков А. В., Шурпо А. Н.

ОРГАНИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ4

Болдырев В. В., Горьковый М. А.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМОЙ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ9

Бузикаева А. В., Черный С. П., Суздорф В. И.

СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ19

Власьевский С. В., Лыткина Е. М., Федоренко А. И.

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРАМИ
МОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ИХ ВЫХОДНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ29

Егоров В. А., Егорова Ю. Г., Плотников Е. В.

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ
ИНВЕРТОРОМ С УПРОЩЁННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ
ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ37

Горелик В. А., Золотова Т. В.

ВСТРОЕННЫЙ МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ
В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ
К ПОСТРОЕНИЮ ТРЕНДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА43

Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В.

МЕТОД РАСЧЁТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ52

Левицкий Е. Е., Власьевский С. В.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ПРИВОДОМ В АППАРАТЕ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА60

Ким К. К., Просолович А. А., Иванов С. Н.

АЛГОРИТМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В СОВМЕЩЁННОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ УСТРОЙСТВЕ65

Стельмащук С. В., Аминов К. С.

ЭЛЕКТРОПРИВОД С КОМПЕНСАЦИЕЙ СТАТИЧЕСКОГО МОМЕНТА73

Челухин В. А., Кружаков М. А., Пьюй Зон Аунг, Абрамсон Е. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ
РАЗНОСТИ ЕЖДУ МИНИМАЛЬНЫМ И МАКСИМАЛЬНЫМ
ЗНАЧЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ81

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Космынин А. В., Хвостиков А. С., Щетинин В. С., Смирнов А. В.

О ТЕОРИИ ГАЗОВОЙ СМАЗКИ И ОДНОЙ ЕЁ ЗАДАЧЕ94

Максимов Е. А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЛЬНЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДИСКА КОЛЕСА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ99

Отряскина Т. А., Хортик М. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ104

Сарилов М. Ю., Копылов А. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ
НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ110

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ
2020 № III-1(43)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
Н. Ю. Костюрина

Подписано в печать 25.06.2020
Дата выхода в свет 29.06.2020

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 30071.

Отпечатано в типографии
КнАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27.

