

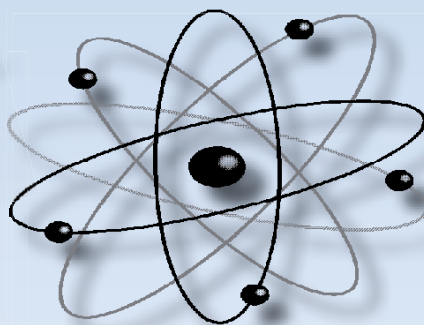
ISSN 2076-4359

Учёные записки

№ 1-1 (41)

2020

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 = Učenyje zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

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

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Ученые 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) 201082

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 «КНА-ГУ», при цитировании их ссылка на журнал обязательна.

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

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:

Алексей Иванович Евстигнеев, доктор технических наук, профессор
Заместитель главного редактора журнала, главный редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:

Илья Игоревич Докучаев, доктор философских наук, профессор
Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:
Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент
Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:

Владислав Викторович Куриный, кандидат технических наук, доцент

Литературный редактор:

Александр Альфредович Шунейко, доктор филологических наук, доцент

Корректор: **Татьяна Николаевна Карпова**

Технический редактор: **Татьяна Николаевна Карпова**

Администратор сайта: **Алексей Александрович Просолович**

Перевод на английский язык: **Галина Алексеевна Шушарина**

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор)
2. Энергетика (**Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, профессор)
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Николаевич Иванов**, доктор технических наук, доцент, **Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН)
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сариллов**, доктор технических наук, доцент, **Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Михайлович Шпилев**, доктор технических наук, профессор, **Сергей Иванович Феоктистов**, доктор технических наук, профессор, **Анатолий Александрович Буренин**, доктор технических наук, профессор)
6. Металлургия и металловедение (**Борис Николаевич Марьин**, доктор технических наук, профессор)
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, доктор технических наук, профессор)
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, доктор технических наук, профессор)
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСН)

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, доктор культурологии, профессор, **Виктория Юрьевна Прокофьева**, доктор филологических наук, профессор, **Вера Ивановна Юдина**, доктор культурологии, доцент, **Надежда Юрьевна Костюрина**, доктор культурологии, доцент, **Илья Игоревич Докучаев**, доктор философских наук, профессор)
2. Филология и искусствоведение (**Олег Александрович Бузуев**, доктор филологических наук, профессор)
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, доктор педагогических наук, профессор)
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, доктор политических наук, доцент)
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, доктор исторических наук, профессор)
6. Экономика (**Виктор Владимирович Литовченко**, доктор экономических наук, профессор)

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

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шеньянского аэрокосмического университета (КНР)

ЭНЕРГЕТИКА

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

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

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

УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

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

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мияки (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 автоматизации 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 ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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 Шеньянского 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 ИСКУССТВОВЕДЕНИЕ

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

ВАН ЦЗИНЬЛИН, 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

Жарикова Е. П., Трещев И. А., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л.
E. P. Zharikova, I. A. Treshchev, Ya. Yu. Grigoriev, A. L. Grigorieva

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
МОНИТОРИНГА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**INFORMATION SECURITY WHEN MONITORING THE UNDERLYING SURFACE USING
UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Жарикова Евгения Павловна – ассистент кафедры «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: evgenia131094@mail.ru.

Mrs. Evgenia P. Zharikova – Assistant, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: evgenia131094@mail.ru.

Трещев Иван Андреевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Информационная безопасность автоматизированных систем управления» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kalkt@yandex.ru.

Mr. Ivan A. Treshchev – PhD in Engineering, Head of the Information Security of Automated Control Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kalkt@yandex.ru.

Григорьев Ян Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: fct@knastu.ru.

Mr. Yan Yu. Grigoriev – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Dean of the Faculty of Computer Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: fct@knastu.ru.

Григорьева Анна Леонидовна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Высшая математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: naj198282@mail.ru.

Mrs. Anna L. Grigorieva – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: naj198282@mail.ru.

Аннотация. В статье предоставляются результаты исследований решения межотраслевой задачи оценки состояния лесфонда, а именно автоматизированная система, позволяющая на основе заданных признаков строить карту, содержащую n характеристик в каждой её точке, с выявлением критических областей, например незаконных вырубок.

Summary. The article presents the results of research, solutions to the cross-sectoral problem of assessing the state of the forest Fund, namely, an automated system that allows to build a map based on the specified features, containing n characteristics at each point, with the identification of critical areas, such as illegal logging.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, управление летательным аппаратом, оптический спектр, карта расстояний.

Key words: remote sensing, aircraft control, optical spectrum, map of distances.

УДК 004.021:004.93'11

Сегодня при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) решается крупный спектр задач:

- промышленных (мониторинг сложных технических систем, состояния трубопроводов и т.п.; предотвращение аварийных ситуаций на промышленных объектах и др.);

- социальных (проведение поисково-спасательных операций; решение задач туристического назначения и оценки состояния природных ресурсов и др.);
- стратегических (военное назначение – задачи обнаружения вражеских объектов; технологическое назначение – определение маршрута строительства новых дорог и др.);
- межотраслевых (все виды оценки состояния лесфонда и др.).

В работе рассматриваются результаты исследований, направленных на решение межотраслевой задачи оценки состояния лесфонда, приводятся основные принципы создания автоматизированной системы, позволяющей на основе заданных признаков строить карту, содержащую n характеристик в каждой её точке, с выявлением критических областей, которыми, например, могут быть незаконные вырубки. Для обеспечения безопасной передачи данных предлагается система защиты открытого канала связи.

Процесс анализа состояния леса состоит в построении 3D-карты местности с помощью лазерных дальнометров. На основе полученной карты производится оценка «шероховатости» поверхности путём поиска локальных экстремумов. Из полученной 3D-карты формируется карта глубин. Карта глубин представляет собой двумерную матрицу A размером $M \times N$, где каждый элемент a_{ij} представляет собой расстояние от точки наблюдения до объекта.

Каждая строка (столбец) матрицы может быть представлена графиком, изображённым на рис. 1, где по горизонтальной оси определяются номера элементов в строке (столбце) матрицы A , а вертикальная – расстояние до объекта.

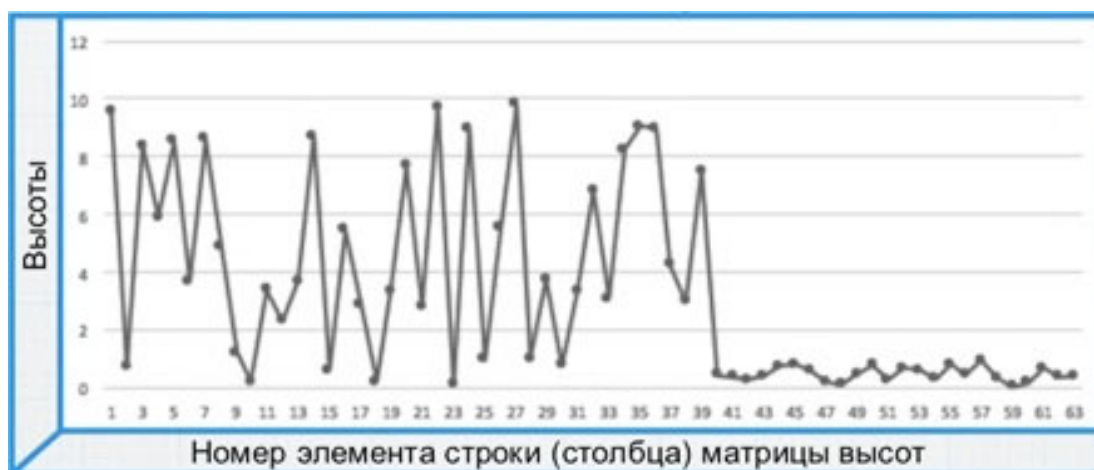


Рис. 1. Графическое представление строки (столбца) матрицы

Предполагается, что минимальная допустимая разница между соседними локальными экстремумами равна ε , а максимальный промежуток монотонности не превышает n шагов [1–3]. Когда находится очередной локальный экстремум в точке, соответствующей элементу $a_{l,p}$, он вычитается из предыдущего значения локального экстремума в точке, соответствующей элементу $a_{l-k,p}$, если $|a_{l-k,p} - a_{l,p}|$ меньше ε , то все элементы строки с $l-k$ по l будут равны нулю, иначе все элементы равны единице. Если промежуток монотонности превышает заданное n , то все элементы строки также будут равны нулю вплоть до следующего экстремума. Таким образом, построчно из матрицы A формируется новая матрица $B1$, элементы которой равны 0 или 1. Аналогичные вычисления производятся для столбцов матрицы A , формируя матрицу $B2$. Из матриц $B1$ и $B2$ формируется матрица $B3$ в соответствии с правилом

$$b3_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } b1_{ij} = b2_{ij} = 0, \\ 1, & \text{если } b1_{ij} = 1 \text{ или } b2_{ij} = 1. \end{cases}$$

Итоговая матрица $B3$ является картой местности, отражающей «шероховатость» поверхности. Однако малая шероховатость может свидетельствовать как о вырубке леса [4], так и о наличии других видов географической поверхности, например, степи или поля.

Более точный результат получается при систематическом мониторинге заданной области, что позволяет хранить данные предыдущего состояния участка и давать более точное описание состояния лесного покрова.

Уточнение данных также возможно с помощью вегетационных индексов, например $NDVI$ (изменяется от -1 до 1), которые позволяют определить состояние биомассы на основе соотношения

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR (Near Infra-Red) – процент отражённой радиации (показание канала снимка) в ближнем инфракрасном диапазоне, 0,78-0,89 мкм; RED – процент отражённой радиации (показание канала снимка) в красном диапазоне, 0,61-0,68 мкм [5–7].

Для расчёта $NDVI$ реализуется следующий алгоритм. На вход поступают данные в видимом (RGB) и ближнем ИК (NIR) диапазонах. Каждое изображение представляется матрицей из $N \times M$ пикселей (P). RGB-изображение разбивается на три цветовых канала: красный (Red), зелёный (Green) и синий (Blue) – данное разбиение представляется в виде массива, элементами которого являются числа в диапазоне от 0 до 255, таким образом, матрица RGB-изображения является трёхмерной и имеет размерность $N \times M \times C$, где $C = 3$, для матрицы NIR $C = 1$, т.к. изображение имеет всего один канал.

Можно положить, что каждому пикселю p_i^j соответствуют два значения из множеств NIR и RGB. Такой подход справедлив только для изображений, полученных со спутников, на большом удалении. Для небольших расстояний использовать соответствующую характеристику нельзя. В качестве характеристики вводится понятие окрестности пикселя. Обусловлено это тем, что ИК-камера и RGB-камера находятся на расстоянии len друг от друга. Поэтому чем дальше исследуемый объект, тем меньшее число пикселей входит в окрестность. Таким образом, $T = NDVI$ будет рассчитываться исходя из формулы

$$NDVI = \frac{IR(i, j) - RGB(i, j, 0)}{IR(i, j) + RGB(i, j, 0)},$$

где $IR(i, j)$ и $RGB(i, j)$ – значение пикселей, входящих в окрестность, соответствующее среднему этой окрестности:

$$P_{pic}(i, j) = \frac{\sum_{oki=i-k}^{oki=i+k} \sum_{okj=j-k}^{okj=j+k} P_{pic}(oki, okj)}{k^2},$$

здесь $P_{pic}(i, j)$ – среднее значение пикселя $IR(i, j)$ или $RGB(i, j)$ в некоторой окрестности с диаметром $2k$. Общая модель изменения радиуса окрестности была выведена путём анализа полученных ВИ и реального состояния биомассы при измерениях на разном расстоянии. Исследования показали, что окрестность пикселя меняется по законам степенной регрессии:

$$k = koef \cdot dist^{st_{koef}},$$

ограничения:

$$dist \geq \frac{len \cdot tg \frac{\pi - \alpha}{2}}{2},$$

где $koef$ и st_{koef} – коэффициенты, полученные путём аппроксимации (выводятся для каждого сенсора отдельно, данная процедура производится один раз и не влияет на скорость работы системы в

дальнейшем); $dist$ – расстояние до сцены; α – угол обзора сенсора; len – расстояние между сенсорами.

Комплексное использование полученных данных позволяет определить области, соответствующие, с заданной вероятностью, недавно вырубленным лесам.

Непрерывный поток информации, поступающий с БПЛА, передаётся открытым каналом, как следствие, к нему могут получить доступ третьи лица. Это может привести к искажению информации и невозможности её использования для обработки. Также может быть перехвачен канал, используемый для управления БПЛА, что может привести к выводу оборудования из строя или потере технического средства. Наиболее остро данная проблема стоит для задачи выявления несанкционированных вырубок.

В соответствии с требованиями законодательства по защите информации для обеспечения конфиденциальности при передаче данных по открытым каналам связи обязательно использовать шифрование по ГОСТ 34.12-2018 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры». Данное требование распространяется как при использовании БПЛА для анализа подстилающей поверхности, распознавания образов, так и для нужд обеспечения обороноспособности и безопасности в том случае, если анализируется информация конфиденциального характера [8]. Ясно, что использование пусть даже небольших автономных ЭВМ с источниками питания не представляется возможным, поскольку существенно скажется на взлётной массе аппарата.

Кодирование информации целесообразно выполнять «на лету», будь то видеопоток или же результаты анализа (в случае наличия соответствующих блоков), для постобработки «на земле». Шифрование блоками по 64 бит возможно реализовать с использованием современных микроконтроллеров, например ЗАО «ПКК МИЛАНДР», имеющих массу порядка 5 г. Если принять стандартный блок равным 8 байт, тактовую частоту работы микропроцессора 250 МГц, и пусть, реализовав древовидную структуру на нескольких микропроцессорах, нам удалось добиться преобразования за 32 такта, получим теоретически достижимую скорость шифрования 75 Мбайт/с, что вполне достаточно для шифрования потокового видео.

В целом, дооснащение БПЛА средствами для криптографической защиты информации (например, компании Анкад), передаваемой «на станцию», не должно увеличить его массу более чем на 200 г даже с учётом массы батареи для автономного функционирования устройства, причём отметим, что при использовании современных контроллеров и компонентной базы возможна реализация функционирования шифрующего элемента, способного работать на протяжении 5 ч непрерывно (при использовании более ёмких батарей срок работы может быть увеличен, но, с другой стороны, и масса устройства будет неуклонно возрастать).

В качестве генератора псевдослучайных последовательностей рекомендуется использовать нелинейный сдвиговой регистр с обратными связями. Обмен ключами возможно осуществлять «до старта», таким образом обеспечив надёжный канал передачи закрытых ключей и S блоков.

В настоящий момент авторами ведётся работа по уменьшению латентности при шифровании управляющей линии БПЛА с целью создания не только защищённого канала передачи информации от БПЛА, но и увеличения защищённости канала управления аппаратом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жарикова, Е. П. Модели расчёта и фильтрации вегетационных индексов / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Сборник материалов 48-ой науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов». – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 162-164.
2. Жарикова, Е. П. Сравнение вегетационных индексов в задачах оценки поверхностей / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев // Сборник материалов 48-ой науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов». – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 165-167.
3. Жарикова, Е. П. Модели компьютерного зрения в задачах дистанционного зондирования / Е. П. Жарикова, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Постулат. Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема (Биробиджан). – 2018. – № 4 (30).



4. Аппаратная реализация алгоритма шифрования по ГОСТ 28147-89 [Электронный ресурс] / М. Г. Котегов, И. Л. Трунов, Д. И. Серогодский, Т. М. Горягина, С. А. Лукьянов // Современные наукоёмкие технологии. – 2008. – № 3. – С. 51-52. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23320> (дата обращения: 03.12.2018).
5. Воробьёв, А. А. О подходе к построению таксономии уязвимостей технических систем / А. А. Воробьёв, И. А. Трещев // Мир науки. – 2014. – № 3. – С. 39.
6. Трещев, И. А. Модификация оконечных устройств видеотракта для защиты видового канала утечки информации / И. А. Трещев, А. С. Ватолина // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 183-184.
7. Курдюмова, Т. И. Математическая модель связи лазерного дальномера с типом лазерного излучателя / Т. И. Курдюмова, А. Л. Григорьева // Постулат. – 2018. – № 4-1(30). – С. 46.
8. Атюков, Н. В. Математическое моделирование образа объекта с помощью лазерного дальномера / Н. В. Атюков, А. Л. Григорьева // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 2 ч. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – С. 129-131.
9. Разработка модели определения глубины пространства для задач детектирования препятствий беспилотного летательного аппарата / Р. И. Шишов, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева, Е. П. Жарикова // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 11-2. – С. 306-313.
10. Детектирование состояния поверхности / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1(39). – С. 58-63.

Стельмашук С. В.
S. V. Stelmashchuk

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ С УЧЁТОМ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

ESTIMATION OF THE COORDINATING CONTROL SYSTEM ACCURACY WITH ACCOUNT FOR DISTURBANCES

Стельмашук Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

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

Аннотация. Рассмотрено математическое описание объекта системы согласованного управления с учётом возмущающих воздействий, являющихся внешними по отношению к многоканальному объекту, а не только возмущений, действующих между сепаратными каналами. Анализируются статические свойства объекта и системы согласованного управления в замкнутом состоянии, влияние внешних возмущающих воздействий на точность объекта и системы согласованного управления. Выявлены способы достижения статической инвариантности системы согласованного управления при заданном порядке сигнала управляющего и возмущающего воздействий. Кратко рассмотрен метод согласованного управления. Оценка точности системы согласованного управления осуществлена при наличии компенсации внутренних возмущений между каналами относительного и усреднённого движений. Проиллюстрированы результаты оценки точности системы согласованного управления как по управлению, так и по возмущению, приведены рекомендации для статической инвариантности системы согласованного управления.

Summary. The mathematical description of the object of the coordinating control system is considered, taking into account the disturbances that are external to the multi-channel object, and not only the perturbations acting between separate channels. The static properties of the object and the coordinated control system in the closed state, the influence of external disturbances on the accuracy of the object and the coordinating control system are analyzed. The ways of achieving static invariance of the coordinating control system at a given order of the control signal and perturbing influence are revealed. The method of coordinating control is briefly considered. The estimation of the accuracy of the coordinating control system is carried out in the presence of compensation of internal disturbances between the channels of relative and average motion. The results of the estimation of the accuracy of the coordinating control system, both in terms of control and disturbances are illustrated; recommendations for the static invariance of the coordinating control system are given.

Ключевые слова: согласованное управление, точность, взаимосвязанный электропривод.

Key words: coordinating control, accuracy, interconnected electric drive.

УДК 62-503.51

Введение. Рассмотрим в качестве объекта управления систему взаимосвязанных электроприводов, представляющую собой m сепаратных каналов. Каждый сепаратный канал представляет собой индивидуальный электропривод, является одномерным и имеет порядок n_1 (см. рис. 1). Порядок многоканального объекта управления $n = mn_1$.

Математическое описание многоканального объекта в матричном виде [5]

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = Cx,$$

где $A [n \times n] = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \dots & A_{mm} \end{bmatrix}$, $B [n \times m] = \begin{bmatrix} B_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & B_{mm} \end{bmatrix}$, $C [m \times n] = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_{mm} \end{bmatrix}$ – системная, входная и выходная матрицы; $x [n \times 1] = [x_1 \dots x_m]^T$, $u [m \times 1] = [u_1 \dots u_m]^T$, $y [m \times 1] = [y_1 \dots y_m]^T$ – векторы состояния, входной вектор (или вектор управления) и выходной вектор (или вектор регулируемых переменных).

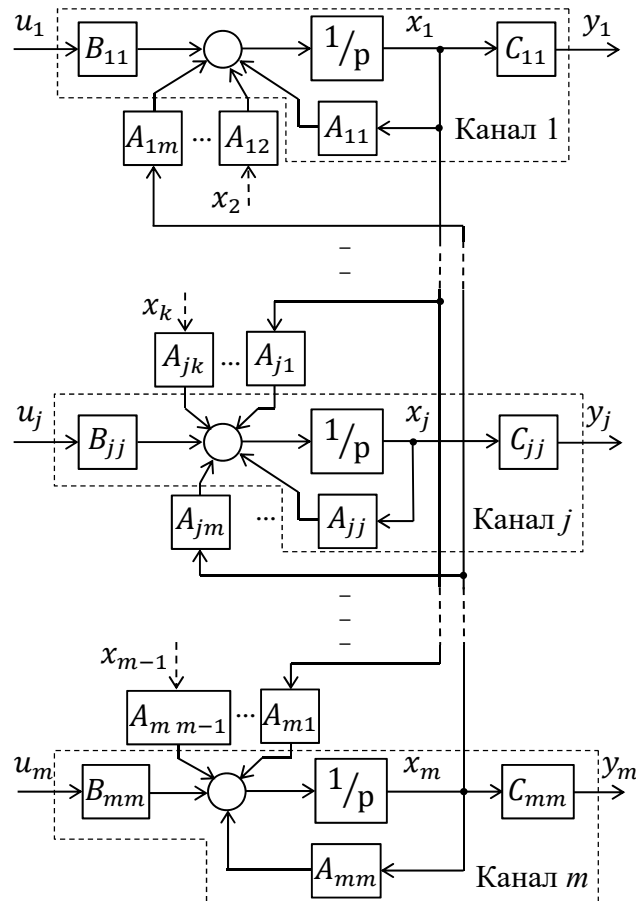


Рис. 1. Многоканальный объект управления

Взаимосвязанность электроприводов может обуславливаться наличием или отсутствием механического (жёсткого или нежёсткого) взаимодействия, но обязательно должна быть через управление электроприводами, т.к. предполагается, что движение электроприводов должно быть согласованным [5]. Согласованность управления выражается через $m - 1$ функциональных соотношений:

$$\varphi_{y_1}(y) = 0; \dots \varphi_{y_{m-1}}(y) = 0,$$

называемых уравнениями относительного движения, и уравнением усредненного движения:

$$\bar{y} = \psi_y(y). \quad (1)$$

Регулируемой переменной объекта согласованного управления (ОСУ), т.е. всей системы взаимосвязанных электроприводов, является усреднённая переменная \bar{y} . Задачей согласованного управления является сведение к минимуму вектора относительного движения ϵ , где

$$\epsilon_1 = \varphi_{y_1}(y); \dots \epsilon_{m-1} = \varphi_{y_{m-1}}(y), \quad (2)$$

который характеризует рассогласование в работе многоканального объекта.

Если уравнения (1) и (2) линейные, то их можно представить в матричном виде:

$$\epsilon = \Phi_y^T y + \Phi_{y0}, \quad \bar{y} = \Psi_y^T y + \Psi_{y0}.$$

Привязав y к вектору состояния ОСУ x , получим [7]

$$e = \Phi^T x + \Phi_0; \quad \bar{x} = \Psi^T x + \Psi_0,$$

где $e = [e_1^T \dots e_s^T]^T$ – расширенный вектор относительного движения, причём $e_i = [\epsilon_1^{(i-1)} \dots \epsilon_{m-1}^{(i-1)}]^T$ – это $(i-1)$ -ая производная вектора ϵ ; $\bar{x} = [\bar{y} \ \bar{y}^{(1)} \dots \bar{y}^{(s-1)}]^T$ – вектор усреднённого движения; $\Phi^T = [\Phi_1^T \dots \Phi_s^T]^T$ – расширенная матрица коэффициентов функциональных соотношений, причём $\Phi_i^T = \Phi_y^T C A^{i-1}$, $i = 1 \dots s$; $\Phi_0 = [\Phi_{y0}^T \ 0_{1 \times (m-1)(s-1)}]^T$ – расширенный вектор свободных членов функциональных соотношений; $\Psi^T = [\Psi_1^T \dots \Psi_{n1}^T]^T$ – расширенная матрица коэффициентов уравнения усреднённого движения, причём $\Psi_i^T = \Psi_y^T C A^{i-1}$, $i = 1 \dots s$, $\Psi_i^T = \Phi_y^T C A^{i-1}$, $i = (s+1) \dots n_1$; $\Psi_0 = [\Psi_{y0}^T \ 0_{1 \times (n-(m-1)s-1)}]^T$ – расширенный вектор свободных членов уравнения усреднённого движения.

Параметр s – это натуральное число, удовлетворяющее условию квазиоднотипности [5]

$$C A^{i-1} B = 0, \quad i = 1, \dots, s-1; \quad \det(C A^{s-1} B) \neq 0.$$

Для подобного электропривода разрабатывается система согласованного управления (ССУ), где m сепаратных каналов представляются двумя каналами: каналом относительного движения (КОД) $e = W_e(p)u_e$ и каналом усреднённого движения (КУД) $\bar{x} = W_{\bar{x}}(p)\bar{u}$. Для этого вектор управления u определяется вектором относительного управления $u_e = [u_{e1} \dots u_{em-1}]^T$ и усреднённым управлением \bar{u} [5]:

$$u = \begin{bmatrix} L & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ \bar{u} \end{bmatrix} = L u_e + l \bar{u}.$$

Синтез системы согласованного управления представляет собой отдельно синтез регулятора КОД и отдельно – КУД, но с учётом взаимосвязи друг на друга [7].

Проблема. Теме согласованного управления посвящено немало публикаций. Наибольшее применение согласованное управление нашло в робототехнике [4; 9; 10]. Обобщающим источником является [2, 5], где в достаточном объёме изложен метод синтеза ССУ. Здесь при описании объекта управления возмущающие воздействия представляются как взаимосвязи между сепаратными каналами, т.е. являются внутренними переменными многоканального объекта ССУ и отражаются в матрицах A_{jk} , где $j \neq k$.

В математических выводах [5] не учитываются внешние возмущающие воздействия. Это приводит к тому, что параметры, связанные с возмущениями (вязкость валков, упругость ленты и т.д.), являясь параметрами объекта согласованного управления, аналитически определяют параметры регуляторов ССУ. Поскольку эти параметры, связанные с внутренними возмущениями многоканального объекта, физически не являются внутренними параметрами сепаратных каналов, возникает проблема их измерения. Измерять их приходится не как сигналы внутри сепаратных каналов (как, например, ток якоря или скорость вала двигателя), а как сигналы, по сути, внешней окружающей среды (силы трения, упругость перематываемой ленты, вязкость полимера, пропускаемого через валки каландра и др.), что является затруднительным.

В результате применения метода согласованного управления параметры возмущающих воздействий учитываются в параметрах регуляторов. Следовательно, затруднительным является определение параметров регуляторов. Это приводит к необходимости использования адаптивных систем с применением идентифицирующих устройств, что приводит к усложнению ССУ и обычно применимо к нелинейным объектам [3]. Частично эта проблема решается прямыми или косвенными методами измерения параметров возмущения (например, использование вискозиметров).

Большинство параметров возмущения трудноизмеримы. В результате возникает необходимость в пересмотре математического описания ОСУ с учётом внешних возмущающих воздействий, исследовании статических свойств ССУ с учётом возмущающих воздействий и выявлении условия статической инвариантности ССУ.

Решение. ОСУ с учётом возмущающего воздействия представлен на рис. 2.

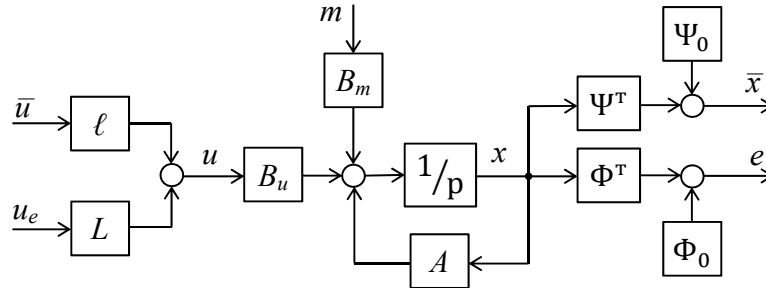


Рис. 2. Объект согласованного управления с учётом возмущающего воздействия m

Дифференциальные уравнения относительного и усреднённого движения

$$\dot{e} = \Phi^T A \Gamma_e e + \Phi^T A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + \Phi^T B_u L u_e + \Phi^T B_u l \bar{u} + \Phi^T B_m m + \Phi^T A \Gamma_0, \quad (3)$$

$$\dot{\bar{x}} = \Psi^T A \Gamma_e e + \Psi^T A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + \Psi^T B_u L u_e + \Psi^T B_u l \bar{u} + \Psi^T B_m m + \Psi^T A \Gamma_0. \quad (4)$$

Матрицы Γ_e , $\Gamma_{\bar{x}}$ и Γ_0 определяются из выражений

$$[\Gamma_e \ \Gamma_{\bar{x}}] = \begin{bmatrix} \Phi^T \\ \Psi^T \end{bmatrix}^{-1}; \quad \Gamma_0 = - \begin{bmatrix} \Phi^T \\ \Psi^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Psi_0 \end{bmatrix}.$$

На основании уравнения (3) составим векторно-матричное описание КОД:

$$\dot{e} = A_e e + B_e (H_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) + u_e) + \Phi^T B_m m, \quad (5)$$

где $A_e = \Phi^T A \Gamma_e$, $B_e = \Phi^T B_u L$ – системная матрица и матрица входа КОД соответственно; $H_e(\bar{x}, \bar{u}, \bar{y}_0) = (\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T (A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + B_u l \bar{u} + A \Gamma_0)$ – вектор-функция внутреннего возмущения КОД.

Для полной компенсации внутреннего возмущения и обеспечения требуемых показателей качества КОД используется комбинированный алгоритм относительного управления [5]:

$$u_e = U_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) - K_e e, \quad (6)$$

где $U_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) = -H_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) = -(\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T (A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + B_u l \bar{u} + A \Gamma_0)$; u_{y0} – задаваемое значение рассогласования, присутствующее в Φ_0 , или отклонение от усреднённого значения, которое присутствует в Ψ_0 ; K_e – матрица П-регулятора КОД.

Подставляя (6) в (5), получим векторно-матричное описание КОД с комбинированным П-регулятором:

$$\dot{e} = (A_e - B_e K_e) e + \Phi^T B_m m.$$

Если учесть, что заданное значение ошибки согласования каналов $e^* = 0$, точность КОД определяется установившимся значением расширенного вектора относительного движения [6]:

$$e_y = -(A_e - B_e K_e)^{-1} \Phi^T B_m m.$$

Видно, что КОД с комбинированным П-регулятором является статической системой по возмущению. Возмущающее воздействие m определяет статическую ошибку КОД по положению

$$e_0 = -(A_e - B_e K_e)^{-1} \Phi^T B_m m_0,$$

где m_0 – установившееся значение возмущения.

Для устранения статической ошибки КОД необходимо использовать регуляторы с интегральным звеном. Рассмотрим комбинированный И-регулятор:

$$u_e = U_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) - \frac{K_{el}}{p} e,$$

где K_{el} – матрица И-регулятора КОД, тогда

$$\begin{aligned} pe &= \left(A_e - B_e \frac{K_{el}}{p} \right) e + \Phi^T B_m m, \\ (p^2 - pA_e + B_e K_{el})e &= p\Phi^T B_m m, \\ e_y &= (p^2 - pA_e + B_e K_{el})^{-1} p\Phi^T B_m m \Big|_{p=0} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Исследование ПИ- и ПИД-регуляторов показало, что статическая ошибка по положению отсутствует даже при некомбинированных регуляторах с интегрирующей составляющей. Рассмотрим скоростную статическую ошибку по возмущению, тогда в (7) проинтегрируем возмущающее воздействие:

$$\begin{aligned} pe &= \left(A_e - B_e \frac{K_{el}}{p} \right) e + \Phi^T B_m \frac{m}{p}, \\ e_y &= (p^2 - pA_e + B_e K_{el})^{-1} \Phi^T B_m m \Big|_{p=0} = (B_e K_{el})^{-1} \Phi^T B_m m, \end{aligned}$$

тогда

$$e_1 = (B_e K_{el})^{-1} \Phi^T B_m m_1, \quad (8)$$

где m_1 – скорость возрастания возмущения; e_1 – скоростная статическая ошибка по возмущению.

Формула (8) применима при расчёте скоростной ошибки для комбинированного ПИ- и ПИД-регулятора.

Поведение ССУ определяется каналом усреднённого движения (КУД), передаточная функция которого определяется при $e = 0$ [5]. Выразив u_e из (3) и подставив в (4), получим векторно-матричное описание КУД:

$$\dot{\bar{x}} = A_{\bar{x}} \bar{x} + B_{\bar{x}u} (\bar{U}_0 + \bar{u}) + B_{\bar{x}m} m, \quad (9)$$

где $A_{\bar{x}} = \Psi^T E A \Gamma_{\bar{x}}$ – системная матрица КУД; $B_{\bar{x}u} = \Psi^T E B_u \ell$ – входная матрица КУД по управлению; $B_{\bar{x}m} = \Psi^T E B_m$ – входная матрица КУД по возмущению; $\bar{U}_0 = (\Psi^T E B_u \ell)^{-1} \Psi^T E A \Gamma_0$ – скаляр, который определяется свободными членами уравнений функциональных соотношений Φ_0 и усреднённого движения Ψ_0 системы согласованного управления (ССУ) [7]; $E = I - B_u L (\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T$.

Переменная \bar{U}_0 является возмущением со стороны КОД, которое можно компенсировать со стороны задающих сигналов, определяемых свободными членами векторов Φ_0 и Ψ_0 . При линейности выражений (1) и (2) возмущение \bar{U}_0 можно компенсировать сигналом, определяемым из выражения

$$-(\Psi^T E B_u \ell)^{-1} \Psi^T E A \Gamma_0 = k_{\bar{x}0} u_{y0}.$$

При наличии компенсации возмущения \bar{U}_0 выражение (7) представится в виде

$$\dot{\bar{x}} = A_{\bar{x}} \bar{x} + B_{\bar{x}u} \bar{u} + B_{\bar{x}m} m. \quad (10)$$

На рис. 3 представлена схема двухканальной ОСУ с учётом компенсаций внутренних возмущений. Здесь выражение U_e представляется суммой членов:

$$U_e(\bar{x}, \bar{u}, u_{y0}) = k_{e\bar{x}} \bar{x} + k_{e\bar{u}} \bar{u} + k_{e0} u_{y0},$$

где $k_{e\bar{x}} = -(\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T A \Gamma_{\bar{x}}$; $k_{e\bar{u}} = -(\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T B_u \ell \bar{u}$; k_{e0} – определяется из выражения $-(\Phi^T B_u L)^{-1} \Phi^T A \Gamma_0 = k_{e0} u_{y0}$.

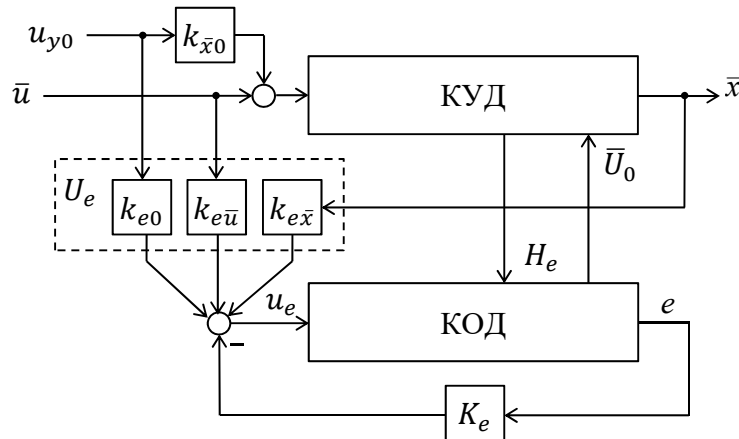


Рис. 3. Каналы усреднённого и относительного движения с компенсациями внутренних возмущений

Уравнение (10) в операторном виде

$$\bar{x}(p) = (pI - A_{\bar{x}})^{-1} B_{\bar{x}u} \bar{u}(p) + (pI - A_{\bar{x}})^{-1} B_{\bar{x}m} m(p).$$

Усреднённая переменная (выходная переменная КУД)

$$\bar{y}(p) = C_{\bar{x}} \bar{x}(p) = W_{0u}(p) \bar{u}(p) + W_{0m}(p) m(p),$$

где $C_{\bar{x}} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ – выходной вектор КУД; $W_{0u}(p) = C_{\bar{x}}(pI - A_{\bar{x}})^{-1} B_{\bar{x}u} = \frac{b_{0u}(p)}{p^v a_1(p)}$ – передаточная функция объекта КУД по управлению; $W_{0m}(p) = C_{\bar{x}}(pI - A_{\bar{x}})^{-1} B_{\bar{x}m} = \frac{b_{0m}(p)}{p^v a_1(p)}$ – передаточная функция объекта КУД по возмущению; v – количество интегрирующих звеньев в передаточных функциях объекта КУД по управлению и возмущению.

Предполагается, что характеристический полином объекта КУД $a_0(p) = p^v a_1(p) = p^v (a_n p^{n-v} + \dots + a_v)$ одинаков и по управлению, и по возмущению, что характерно для электроприводов. Для простоты исследования статических свойств объекта КУД обозначим коэффициенты усиления объекта при $p = 0$:

$$k_{0u} = \frac{b_{0u}(0)}{a_1(0)}, \quad k_{0m} = \frac{b_{0m}(0)}{a_1(0)}.$$

Тогда

$$W_{0u}(0) = \left. \frac{k_{0u}}{p^v} \right|_{p=0}, \quad W_{0m}(0) = \left. \frac{k_{0m}}{p^v} \right|_{p=0}.$$

Таким образом, при исследовании статических свойств объекта КУД, в соответствии с теоремой о конечном значении оригинала по его изображению по Лапласу [1], будем рассматривать установившееся значение выходной переменной объекта КУД:

$$\begin{aligned} \bar{y}_{yk} &= \lim_{p \rightarrow 0} p (W_{0u}(p) \bar{u}(p) + W_{0m}(p) m(p)) = \lim_{p \rightarrow 0} p \left(\frac{k_{0u}}{p^v} \frac{\bar{u}_k}{p^{k+1}} + \frac{k_{0m}}{p^v} \frac{m_k}{p^{k+1}} \right) = \\ &= \left. \frac{k_{0u}}{p^{v+k}} \right|_{p=0} \bar{u}_k + \left. \frac{k_{0m}}{p^{v+k}} \right|_{p=0} m_k, \end{aligned} \quad (11)$$

где воздействия $\bar{u}(t) = \frac{\bar{u}_k t^k}{k!}$ и $m(t) = \frac{m_k t^k}{k!}$ представляют собой ступенчатый сигнал при $k = 0$, линейно-возрастающий – $k = 1$ и квадратично-возрастающий – $k = 2$. Величина \bar{y}_{yk} – установившееся значение при подаче на управляющий и возмущающий вход сигнала k -го порядка.

Из выражения (11) видно, что статические свойства объекта КУД и по управлению, и по возмущению одинаковы и определяются астатизмом объекта КУД ν .

Для исследования статических свойств ССУ необходимо рассмотреть применение обратной связи с регулятором. По сути, система автоматического регулирования с КУД и есть ССУ. Сигналы \bar{u} – управляющий сигнал ОСУ, а \bar{y} – регулируемая переменная ССУ. Рассмотрим регулятор в прямом канале ССУ с передаточной функцией

$$\bar{u}(p) = W_p(p)(\bar{y}^*(p) - \bar{y}(p)) = W_p(p)\bar{\varepsilon}(p),$$

где $\bar{y}^*(p)$ – задающее воздействие ССУ; $\bar{\varepsilon}(p)$ – сигнал ошибки ССУ.

Тогда

$$\begin{aligned}\bar{y}(p) &= W_{0u}(p)W_p(p)(\bar{y}^*(p) - \bar{y}(p)) + W_{0m}(p)m(p); \\ \bar{y}(p) &= \frac{W_u(p)}{1 + W_u(p)}\bar{y}^*(p) + \frac{W_{0m}(p)}{1 + W_u(p)}m(p),\end{aligned}$$

где $W_u(p) = W_{0u}(p)W_p(p) = \frac{b_u(p)}{p^r a_1(p)}$ – передаточная функция разомкнутой системы ССУ по управлению; $b_u(p)$ – полином числителя разомкнутой системы ССУ, где содержатся полиномы числителя ОСУ $b_{0u}(p)$ и регулятора; r – порядок астатизма ССУ, включающий порядок астатизма ОСУ ν и регулятора, причём $r \geq \nu$.

Коэффициент разомкнутой системы ССУ

$$k_u = k_p k_{0u} = \frac{b_u(0)}{a_1(0)},$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора.

Тогда

$$W_u(0) = \left. \frac{k_u}{p^r} \right|_{p=0}.$$

Сигнал ошибки ССУ [8]

$$\bar{\varepsilon}(p) = \bar{y}^*(p) - \bar{y}(p) = \frac{1}{1 + W_u(p)}\bar{y}^*(p) - \frac{W_{0m}(p)}{1 + W_u(p)}m(p) = \bar{\varepsilon}_u(p) + \bar{\varepsilon}_m(p).$$

Исследуем составляющие сигнала ошибки по управлению $\bar{\varepsilon}_u$ и по возмущению $\bar{\varepsilon}_m$.

1. Точность по управлению

$$\bar{\varepsilon}_{uk} = \lim_{p \rightarrow 0} p \frac{1}{1 + W_u(p)}\bar{y}^*(p) = p \frac{1}{1 + \frac{k_u}{p^r} p^{k+1}} \bar{y}_k^* \Big|_{p=0} = \frac{p^{r-k}}{p^r + k_u} \Big|_{p=0} \bar{y}_k^*. \quad (12)$$

2. Точность по возмущению

$$\bar{\varepsilon}_{mk} = \lim_{p \rightarrow 0} \left(-p \frac{W_{0m}(p)}{1 + W_u(p)} m(p) \right) = -p \frac{\frac{k_{0m}}{p^\nu} m_k}{1 + \frac{k_u}{p^r} p^{k+1}} \Big|_{p=0} = -\frac{k_{0m} p^{r-\nu-k}}{p^r + k_u} \Big|_{p=0} m_k. \quad (13)$$

Абсолютные значения ошибок ССУ по управлению и возмущению при различном астатизме регулятора и ОСУ представлены в табл. 1 и 2.



Таблица 1

Абсолютная ошибка ССУ по управлению

Порядок сигнала $\bar{y}^*(t)$		$k = 0$	$k = r > 0$
Астатизм	Объект – статический ($v = 0$) Регулятор – статический ($r = v$)	$\bar{\varepsilon}_{u0} = \frac{1}{1 + k_u} \bar{y}_0^*$	–
	Объект – астатический ($v > 0$) Регулятор – статический ($r = v$)	$\bar{\varepsilon}_{u0} = 0$	$\bar{\varepsilon}_{ur} = \frac{1}{k_u} \bar{y}_r^*$ при $r = 1, 2, \dots$
	Объект – статический ($v = 0$) Регулятор – астатический ($r > v$)		
	Объект – астатический ($v > 0$) Регулятор – астатический ($r > v$)		$\bar{\varepsilon}_{ur} = \frac{1}{k_u} \bar{y}_r^*$ при $r = v + 1, v + 2, \dots$

Таблица 2

Абсолютная ошибка ССУ по возмущению

Порядок сигнала $m(t)$		$k = 0$	$k = r - v > 0$
Астатизм	Объект – статический ($v = 0$) Регулятор – статический ($r = v$)	$\bar{\varepsilon}_{m0} = -\frac{k_{0m}}{1 + k_u} m_0$	–
	Объект – астатический ($v > 0$) Регулятор – статический ($r = v$)	$\bar{\varepsilon}_{m0} = -\frac{k_{0m}}{k_u} m_0$	–
	Объект – статический ($v = 0$) Регулятор – астатический ($r > v$)	$\bar{\varepsilon}_{m0} = 0$	$\bar{\varepsilon}_{mr} = -\frac{k_{0m}}{k_u} m_r$ при $r = 1, 2, \dots$
	Объект – астатический ($v > 0$) Регулятор – астатический ($r > v$)		$\bar{\varepsilon}_{m(r-v)} = -\frac{k_{0m}}{k_u} m_{r-v}$ при $r - v = 1, 2, \dots$

Анализируя точность ССУ по выражениям (12) и (13), можно прийти к следующим выводам:

1. Если задано задающее воздействие порядка k , т.е. $\bar{y}^*(t) = \frac{\bar{y}_k^* t^k}{k!}$, то ССУ будет статически инвариантной, т.е. в установившемся режиме $\bar{y}(t) = \bar{y}^*(t)$, при регуляторе с астатизмом больше $k - v$. В этом случае порядок астатизма ССУ должен быть $r > k$ и в установившемся режиме $\bar{\varepsilon}(t) = 0$.

2. Для статической инвариантности по возмущающему воздействию порядка k регулятор должен иметь астатизм больше k , т.е. как минимум первого порядка. Тогда порядок астатизма ССУ должен быть $r > k + v$.

Вывод. Таким образом, можно сделать общий вывод: изложенная в [2, 5] методика, где учитываются не внешние возмущающие воздействия по отношению ко всему многоканальному объекту, а только внутренние между сепаратными каналами, может быть применена для систем стабилизации усреднённой переменной \bar{y} при наличии астатического регулятора. В этом случае внешнее возмущающее воздействие не сказывается на установившемся значении усреднённой переменной \bar{y} .

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Мирошник, И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
3. Мирошник, И. В. Адаптивное управление пространственным движением нелинейных объектов / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров // АиТ. – 1991. – № 9. – С. 78-87.
4. Мирошник, И. В. Методы координации в задачах планирования и управления пространственным движением манипуляционных роботов / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров // Анализ и управление нелинейными колебательными системами / под ред. Г. А. Леонова и А. Л. Фрадкова. – СПб.: Наука, 1998. – С. 215-236.
5. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами / И. В. Мирошник – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 128 с.
6. Мирошник, И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И. В. Мирошник. – СПб.: Питер, 2005. – 336 с.
7. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-2(38). – С. 28-40.
8. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – М.: «Энергия», 1969. – 375 с.
9. Miroshnik, I. V. Trajectory motion control and coordination of multilink robots / I. V. Miroshnik, V. O. Nikiforov // 13 IFAC World Congress, San-Francisco. – 1996. – V. A. – P. 361-366.
10. Murray, R. M. A mathematical introduction to robotic manipulation / R. M. Murray, I. L. Zexiang, S. S. Sastry. – Boca Raton: CRC Press, 1993. – 480 p.



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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР ДЕНЬ-НОЧЬ НА ОСНОВЕ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**MATHEMATICAL MODELING OF ENERGY OBTAINING PROCESS USING
TEMPERATURE DIFFERENCE DAY-NIGHT BASED ON NEURAL NETWORKS
AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Челухин Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)8980231. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Vladimir A. Chelukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 89098980231. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

Кружаев Максим Александрович – аспирант кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 89622868692. E-mail: karibnet@mail.ru.

Maksim A. Kruzhaev – a Post-graduate Student, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)2868692. E-mail: karibnet@mail.ru.

Пьей Зон Аунг – аспирант кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)8298770. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

PayZone Aung – a Post-graduate Student, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)8298770. E-mail: pyaythar87@gmail.com.

Абрамсон Елизавета Владимировна – аспирантка кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(914)1650000. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

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)1650000. E-mail: Elizaveta27@bk.ru.

Аннотация. Предложен способ получения энергии с помощью такого источника энергии, как перепад температур между днём и ночью. Преимущества такого способа очевидны – полное отсутствие вредного экологического влияния, абсолютная безопасность для человека и природы, бесконечность источника такой энергии. Как известно, температура воздуха окружающей среды подвержена колебаниям в течение суток в пределах от 8 до 25 °С и более. Воздействие такого изменения температуры на различные материалы вызывает изменение их физического состояния, в частности линейных размеров. Сила, возникающая при изменении линейных размеров тела, например металла, весьма велика, и её можно использовать для получения энергии. С целью повышения эффективности преобразователя предложено модифицировать алгоритм его работы так, чтобы предугадывать величину перепада температур на основе имеющихся наблюдений. Если заранее известны точные значения температуры в точках экстремума, можно не только дать точную оценку эффективности работы преобразователя, но и скорректировать его работу для ещё большей энергоотдачи.

Summary. A method of obtaining energy using such an energy source as the temperature difference between day and night is proposed. The advantages of this method are obvious. They are: the complete absence of harmful environmental impact, absolute safety for man and nature, and the infinity of the source of such energy. As it is known, the ambient air temperature is subject to fluctuations during the day in the range from 8 to 25 °C and higher. The effect of this change in temperature on different materials causes a change in their physical state, in particular linear dimensions. The force generated by changing the linear dimensions of a body, such as a metal, is very large and can be used to produce energy. In order to improve the efficiency of the Converter, it is proposed to modify the al-

gorithm of its operation so as to predict the value of the temperature difference on the basis of available observations. If the exact temperature values at the extremum points are known in advance, it is possible not only to give an accurate assessment of the efficiency of the Converter, but also to adjust its operation for even greater energy efficiency.

Ключевые слова: перепад температур, преобразователи тепловой энергии, заряд, ёмкость, диэлектрическая проницаемость, конденсатор, внешняя температура, сегнетоэлектрик, напряжение зарядки, диэлектрик.

Key words: temperature drop, thermal energy converters, charge, capacitance, dielectric constant, capacitor, external temperature, ferroelectric, charging voltage, dielectrics.

УДК 621.362

Введение

Современные преобразователи тепловой энергии созданы для преобразования энергии на основе невозобновляемых ресурсов, например, бензина, дизельного топлива, угля и т.п.

Сегодня всё больше интереса проявляется к возобновляемым и экологически чистым источникам энергии. Чаще всего в этом качестве рассматривается ветроэнергетика, гелиотехника, геотермальные источники и др. Характеризуя эти источники, можно отметить, что любой из них имеет какой-либо принципиальный недостаток, который препятствует его широкому внедрению. На пример, ветростанции и геотермальные станции жёстко привязаны к месту, где имеются соответствующие достаточно приемлемые ресурсы, местонахождение которых зачастую находится вдалеке от промышленных центров. То же можно сказать и о солнечной энергетике, волновой.

Однако, по мнению авторов, современная наука мало обращает внимания на возможность получения энергии с помощью такого источника энергии, как перепад температур между днём и ночью. Основные преимущества такого метода получения энергии очевидны – полное отсутствие вредного экологического влияния, абсолютная безопасность для человека и природы, бесконечность источника такой энергии и несложность технической реализации на современном уровне [1-5].

Авторами предложен способ получения энергии с помощью такого источника энергии, как перепад температур между днём и ночью. Суть идеи получения энергии от перепада температур заключается в следующем. Как известно, температура воздуха окружающей среды подвержена колебаниям в течении суток (перепад температур день-ночь). В среднем этот перепад колеблется в пределах от 8 до 25 °С и более. Воздействие такого изменения температуры на различные материалы вызывает изменение их физического состояния, в частности линейных размеров. Сила, возникающая при изменении линейных размеров тела, например металла, весьма велика, и её можно использовать для получения энергии.

В общем случае устройство содержит две пластины ёмкости, одна из которых закреплена неподвижно, а вторая – подвижная – прикреплена к одному концу бруска из любого диэлектрического материала, имеющего большое изменение своих линейных размеров при изменении внешней температуры. Второй конец этого бруска жёстко закреплён на неподвижном основании. Когда изменяется внешняя температура, брусок меняет свои линейные размеры и отодвигает или приближает подвижную пластину ёмкости к неподвижной в зависимости от направления изменения температуры. Между подвижной и неподвижной пластинами конденсатора помещён материал, имеющий высокую относительную диэлектрическую проницаемость, например сегнетоэлектрик. Между этой частью сегнетоэлектрика и подвижной пластиной устанавливается небольшой воздушный зазор, который подбирается таким образом, что при максимальном удлинении бруска из пластика подвижная пластина плотно прижимается к нему, а при минимальном размере подвижная пластина ёмкости отодвигается от сегнетоэлектрика и образует воздушный зазор.

При помещении устройства в пространство с высокой температурой брусок увеличивает свои размеры в осевом направлении и придвигает подвижную пластину к диэлектрику, имеющему высокую относительную диэлектрическую проницаемость, плотно прижимая её к нему. В этом

случае ёмкость устройства будет максимальной и пропорциональной относительной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика, помещённого между пластинами ёмкости. В этом состоянии пластины подключаются к контактам источника возбуждения, после чего конденсатор заряжается зарядами до напряжения возбуждения.

При понижении температуры, например ночью, брусок уменьшает свои линейные размеры в осевом направлении и отодвигает подвижную пластину от диэлектрика, имеющего высокую относительную диэлектрическую проницаемость, создавая зазор между ней и диэлектриком. В этом случае ёмкость устройства скачком упадёт пропорционально снижению относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика вследствие появления воздушного зазора между пластиной ёмкости и диэлектриком, напряжение вырастет до максимума и разрядится на нагрузку. Далее процесс повторяется с периодическим падением и ростом внешней температуры.

Основной проблемой получения электрической энергии с помощью преобразователя перепада температур является низкая эффективность процесса преобразования энергии в силу медленного суточного изменения температуры. В среднем такой перепад в умеренных областях северного полушария составляет примерно 10 °C в сутки. Однако данные недостатки не являются непреодолимыми, и на сегодня уже авторами предложены весьма несложные пути решения указанных проблем [6-8].

Эффективность работы преобразователя напрямую зависит от как величин максимальной и минимальной суточных температур, так и от полноты использования величины температурного перепада. Если величина перепада – внешний параметр, на который повлиять никак нельзя, то полнота его использования зависит от алгоритма работы системы управления преобразователем энергии перепада температур.

Система управления преобразователем периодически проводит опрос датчика температуры и в случае необходимости выполняет перенос накопленной энергии в аккумулятор или напрямую к потребителю [9-11].

Устройство преобразователя, описанного в [6-11], не предполагает подключения к метеостанциям, интернету или иным источникам прогноза погоды, поскольку полная автономность и способность работать как в земном пространстве, так и в космосе и – потенциально – на других планетах является одной из основных характеристик. Следовательно, единственным источником данных, позволяющим спрогнозировать перепад температур, является набор датчиков температуры, входящий в устройство преобразователя.

С целью повышения эффективности преобразователя предложено модифицировать алгоритм его работы так, чтобы предугадывать величину перепада температур на основе имеющихся наблюдений.

Постановка задачи

Если заранее известны точные значения температуры в точках экстремума, то можно не только дать точную оценку эффективности работы преобразователя, но и скорректировать его работу для ещё большей энергоотдачи.

Имеется набор упорядоченных пар

$$\langle t_1, T_1 \rangle, \langle t_2, T_2 \rangle, \dots, \langle t_n, T_n \rangle, \quad (1)$$

где t_i – числовое представление момента времени, следующего за t_{i-1} и предшествующего t_{i+1} ; T_i – значение температуры в момент времени t_i .

Следует учесть, что с течением времени набор (1) постоянно пополняется, поскольку преобразователь через равные промежутки времени считывает данные с датчиков температур и записывает их в память.

Требуется составить наиболее адекватную математическую модель аппроксимации набора данных (1) функцией $T(t)$ с целью последующей экстраполяции.

Для выбора математической модели определим характер исходных данных. На рис. 1 показан результат замеров минимальных суточных температур в окрестностях города Комсомольска-

на-Амуре с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года. Ось абсцисс соответствует номеру дня, где 1 января 2008 года – 1-й день, 2 января 2008 года – 2-й день и т.д. На рис. 2 приведено графическое представление суточных максимумов за тот же период.

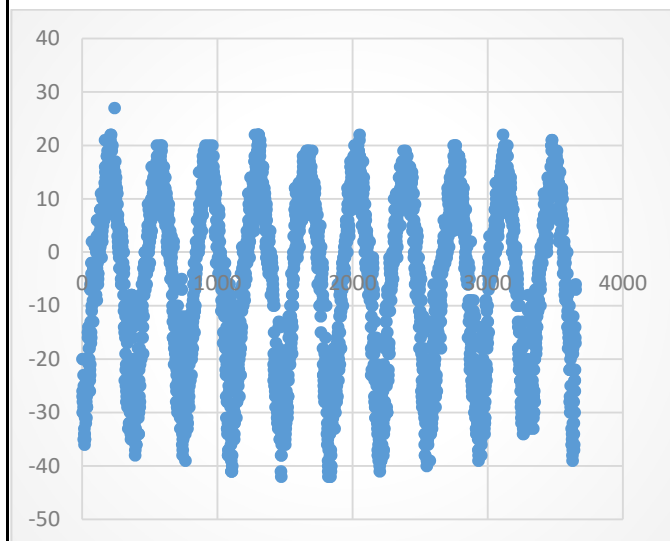


Рис. 1. Корреляционное поле суточных минимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с последовательным учётом дней

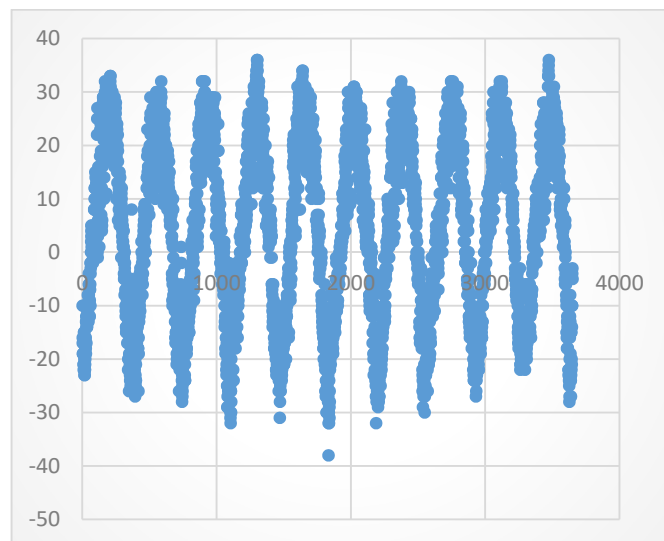


Рис. 2. Корреляционное поле суточных максимумов температур с 1 января 2008 года по 31 декабря 2017 года с последовательным учётом дней

Как видно из рис. 1 и 2, исходные данные имеют явный периодический вид, поэтому для их аппроксимации потребуется метод, подходящий для функций периодического вида.

Разработка математической модели

При составлении математической модели применим более привычные обозначения: t_i будем обозначать как x_i , а T_i обозначим как y_i .

Рассмотрим три варианта аппроксимации функции заданного типа: аппроксимация периодической функцией общего вида, аппроксимация рядом Фурье и применение нейронных сетей.

В качестве периодической функции общего вида рассмотрим функцию вида

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

Здесь:

- $ax + b$ 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 вида (2) породит систему нелинейных уравнений. Для того чтобы избежать нелинейности, преобразуем её в функцию вида

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

Ряд Фурье (модель тригонометрического тренда применительно к данному случаю) имеет вид

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

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 персептрона, 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;

$Dy = \frac{1}{n-1} \sum_x (y_i - My)^2$ – 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 $net = newtb(x; y'; 0.2; 10)$. Моделирование нейронной сети выполняется помощью функции $yn' = sim(net, x)$.

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:

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

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 Российская Федерация, МПК H02M 3/04(2006.01). Преобразователь энергии перепада температур с жидкометаллическим электродом: № 2012152676: заявлено 06.12.2012: опубликовано 27.08.2014 / Челухин В. А., Челухин И. В.; заявитель ФГБОУВПО «КНАГТУ». – 4 с.
5. Патент № 2513539 Российская Федерация, 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.



6. Патент № 2564994 Российская Федерация, 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.
7. Патент № 2557066 Российская Федерация, МПК H02M 3/04(2006.01). Преобразователь энергии перепада температур с электронным управлением: № 2014112479: заявлено 31.03.2014: опубликовано 20.07.2015 / Челухин В. А., Абрамсон Е. В., Челухин И. В.; заявитель ФГБОУВПО «КНАГТУ». – 5 с.
8. Патент № 2559290 Российская Федерация, МПК H02N 1/00(2006.01). Пьезоэлектрический первичный источник энергии перепада температур: № 2014112475: заявлено 31.03.2014: опубликовано 10.08.2015 / Челухин В. А., Абрамсон Е. В., Челухин И. В.; заявитель ФГБОУВПО «КНАГТУ». – 4 с.
9. Челухин В. А. Электрооборудование с ёмкостными компонентами / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 80 с.
10. Челухин, В. А. К вопросу электроснабжения поселений на Марсе / В. А. Челухин, Е. В. Абрамсон // Электричество. – 2016. – № 5. – С. 45-52.
11. Копылов, И. П. Электромеханические преобразователи тепла / И. П. Копылов, Н. П. Дьяченко // Электромеханика. – 1980. – № 4. – С. 92-99.
12. Медведев, В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: Диалог – МИФИ, 2002. – 630 с.
13. Организация и обучение искусственных нейронных сетей / авт.-сост. Л. В. Калацкая, В. А. Новиков, В. С. Садков. – Минск: БГУ, 2003.
14. Нейронные сети. Statistica Neural Networks / пер. с англ. – М.: Телеком, 2000. – 182 с.
15. Bishop C. Neural networks for pattern recognition. Oxford: University Press, 1995.
16. Челухин, В. А. К вопросу использования энергии перепада суточных температур / В. А. Челухин, В. С. Миронова // Materialy IX mezinarodni vedecko – prakticka conference «Moderni vymozenosti vedy – 2013» – Dil 75. Technicke vedy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. – 104 s.

Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В.
K. I. Kim, K. K. Kim, V. V. Veshkin

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ

CHARACTERISTICS OF ASYNCHRONOUS MACHINE IN SPEED CONTROL MODES

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.

Konstantin I. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, St. 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.

Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, St. 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.

Vadim V. Veshkin – Assistant, Theoretical electrical engineering Department, Sp. 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 рассматриваются подходы к анализу уравнений асинхронной машины в переходных процессах. Приведён способ исследования, обеспечивающий возможность получения аналитического выражения скорости в произвольном диапазоне изменения скольжения. Сделана оценка применимости методов малого параметра, интегральных уравнений Вольтера второго рода и Лагранжа при понижении сложности решения относительно ускорения при одновременном обеспечении точности. Доказано, что полученные уравнения переходных параметров указывают на несущественность влияния ускорения при малых значениях скорости. Рассмотрена интерпретация физической стороны образования вращающих моментов, показывающая, что составляющие намагничивающих сил, имеющие одинаковые фазы, моментов не создают; при определении моментов необходим учёт составляющих с различными сдвигами (неодинаковость начальных фаз, различие частот изменения токов); при определении моментов выбор координатной оси, относительно которой определяется положение намагничивающих сил, произвольный. Установлена связь между характером намагничивающей силы статора и режимом работы асинхронной машины (при опережающем намагничивании имеет место двигательный режим, отстающем – генераторный). Исследовано дифференциальное уравнение баланса моментов, действующих на вал ротора асинхронной машины в переходных режимах, и решена задача определения скорости ротора, включая сверхсинхронные скорости.

Summary. The article considers approaches to the analysis of asynchronous machine equations in transients. A method of investigation that provides the possibility of obtaining an analytical expression of the velocity in an arbitrary range of sliding changes is presented. We estimate the applicability of small parameter methods, second-order Voltaire integral equations, and Lagrange equations for reducing the complexity of the solution with respect to acceleration while ensuring accuracy. It is proved that the obtained equations of transient parameters indicate that the acceleration effect is insignificant at low speed values. We consider the interpretation of the physical side of education torque, showing that the components of the magnetizing forces having the same phase points do not create; when determining the moments is required to account for components with different shifts (variations of the initial

phases of the difference frequency changes of currents); in determining the moments coordinate axes, relative to which the position is determined by the magnetizing force, arbitrary. The relationship between the nature of the magnetizing force of the stator and the mode of operation of the asynchronous machine (with advanced magnetization, there is a motor mode, lagging – generator mode) is established. The differential equation of the balance of moments acting on the rotor shaft of an asynchronous machine in transient modes is investigated and the problem of determining the rotor speed, including supersynchronous speeds, is solved.

Ключевые слова: асинхронная машина, переходный режим, вращающий момент, скорость.

Key words: asynchronous machine, transition mode, torque, speed.

УДК 621.3.019

Введение

Задача определения характеристики скорости в переходных режимах, при необходимости учёта ускорения ротора, связана с анализом дифференциальных уравнений, рассмотренных в [1]. В этих уравнениях изменение электрических параметров учитывается членом \bar{u}_1 , изменение механической нагрузки – членом M_c , искомыми переменными являются обобщённые векторы токов (\bar{i}_1, \bar{i}_2) и скорость вращения ротора (ω). Так как эти переменные связаны между собой нелинейной зависимостью, то решение указанных уравнений возможно лишь приближёнными методами. При этом выбор метода в значительной степени зависит от характера исследуемого процесса. Так, например, при анализе процессов, протекающих при скоростях, меньших скорости опрокидывания, возможно использовать метод последовательных приближений, тогда как при рассмотрении других режимов (например, режима разгона двигателя) применение этого метода оказывается весьма затруднительным. Причиной этому служит то обстоятельство, что в общем случае вращающий момент выражается через скольжение достаточно сложным образом, благодаря чему расчёт второго приближения скорости уже встречает большие трудности. В связи с этим анализ указанных уравнений естественно провести таким способом, при котором оказалось бы возможным получить решение скорости, удобное для расчёта независимо от того, в каких пределах происходит изменение скольжения.

Постановка задачи исследования. Пусть действительная характеристика скорости представляется в виде кусочно-линейной аппроксимации.

Тогда для любого из участков можно написать

$$\omega_n = \omega_{n0} + a_n t. \quad (1)$$

Подставляя это выражение в преобразованные уравнения напряжений [1], можно получить систему линейных уравнений с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}_{1n}}{dt} - \frac{x_{12}}{x_1'} [\rho_2 \sigma - j(\omega_{n0} + a_n t)] \bar{i}_{2n} + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 \sigma + j(1 - \sigma)(\omega_{n0} + a_n t)] \bar{i}_{1n} &= \frac{\bar{u}_1}{x_1'}, \\ \frac{d\bar{i}_{2n}}{dt} + \frac{1}{\sigma} [\rho_2 \sigma - j(\omega_{n0} + a_n t)] \bar{i}_{2n} - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} [\rho_1 \sigma + j(\omega_{n0} + a_n t)] \bar{i}_{1n} &= -\frac{(1 - \sigma) \bar{u}_1}{x_{12} \sigma}. \end{aligned}$$

Допускается, что каким-либо образом решения получены и имеют вид

$$\bar{i}_{1n} = f_1(t); \quad \bar{i}_{2n} = f_2(t). \quad (2)$$

Тогда из условия непрерывности величин \bar{i}_1 и \bar{i}_2 и их производных для границ участков можно получить решения и для всех других участков. Подставляя выражения (2) в последнее уравнение исходной системы и учитывая, что величины \bar{i}_1 и \bar{i}_2 зависят не только от времени, но и от параметров машины и ускорения, можно получить

$$\frac{d\omega_n}{dt} = M(t, a_n, \omega_{n0}, \rho_2 \dots) - \frac{M_c}{H}. \quad (3)$$

Из последнего уравнения находится величина ускорения на n -м участке. Производя аналогичные операции, можно определить ускорение и на всех других участках. После нахождения ускорения на основании формулы (1) строится кривая скорости.

Метод решения исходных уравнений. Звеном, на которое в последующем придётся обращать особенное внимание, является уравнение (3). Задача состоит в том, чтобы получить это уравнение в форме, допускающей достаточно простое решение относительно ускорения при одновременном удовлетворении условиям точности. Эти требования, вообще говоря, трудновыполнимы (т.к. само явление достаточно сложно), но, тем не менее, идя в этом направлении, можно получить некоторые результаты.

Выполнимость этих требований во многом зависит от выбора метода анализа уравнений (1). Теоретически эти уравнения исследуются следующими способами: методом малого параметра, методом интегральных уравнений Вольтера второго рода и методом Лагранжа.

Однако первые два метода доставляют решения в форме, мало пригодной для решения поставленной задачи. Доказательством этого являются следующие моменты.

Уравнения (1) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{i}_{1n}}{dt} - \frac{x_{12}}{x_1'} (\rho_2 \sigma - j\omega_{n0}) \bar{i}_{2n} + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 \sigma + j(1 - \sigma)\omega_{n0}] \bar{i}_{1n} &= \frac{\bar{u}_1}{x_1'} - j \frac{x_{12}}{x_1'} a_n t \left(\bar{i}_{2n} + \frac{x_{12}}{x_2} \bar{i}_{1n} \right); \\ \frac{d\bar{i}_{2n}}{dt} + \frac{1}{\sigma} (\rho_2 \sigma - j\omega_{n0}) \bar{i}_{2n} - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} [\rho_1 \sigma + j\omega_{n0}] \bar{i}_{1n} &= -\frac{(1 - \sigma)}{x_{12} \sigma} \bar{u}_1 + j \frac{a_n t}{\sigma} \left(\bar{i}_{2n} + \frac{x_{12}}{x_2} \bar{i}_{1n} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассматривая ускорение a_n как малый параметр, можно получить решения в виде ряда:

$$\bar{i}_{kn} = \bar{i}_{kn}^{(0)} + a_n \bar{i}_{kn}^{(1)} + a_n^2 \bar{i}_{kn}^{(2)} + \dots \quad (5)$$

где $k = 1, 2$.

Первый член этого ряда ($\bar{i}_{kn}^{(0)}$) можно получить из уравнений (4), положив $a_n = 0$. Все другие члены найдутся из указанных уравнений, но с иной правой частью. Так, например, член $\bar{i}_{kn}^{(m)}$ будет удовлетворять следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} L_1(\bar{i}_{1n}^{(m)}, \bar{i}_{2n}^{(m)}) &= -j \frac{x_{12}}{x_1'} t \left(\bar{i}_{2n}^{(m-1)} + \frac{x_{12}}{x_2} \bar{i}_{1n}^{(m-1)} \right), \\ L_2(\bar{i}_{1n}^{(m)}, \bar{i}_{2n}^{(m)}) &= j \frac{t}{\sigma} \left(\bar{i}_{2n}^{(m-1)} + \frac{x_{12}}{x_2} \bar{i}_{1n}^{(m-1)} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь через L_1 и L_2 обозначены левые части уравнений (4). Несложно отметить одну трудность, которая будет возникать в процессе вычислений. Уравнения (6) соответствуют резонансному случаю, т.к. в правой части их будут величины, частота изменения и коэффициент затухания которых равны соответствующим частям корней характеристического уравнения. Это обстоятельство приводит к тому, что при членах указанного ряда, начиная со второго, появляется время, причём показатель его будет в два раза больше показателя ускорения (если в каждом из решений $\bar{i}_{kn}^{(m)}$ принимать во внимание член, при котором время имеет наибольший показатель). Таким образом, при $t_m > 1$ в выражении (5) придётся удерживать значительное количество членов. Вообще говоря, показатель при t можно снизить до показателя при a (т.е. усилить сходимость ряда), применяя искусственные приёмы, например, метод Ляпунова.

Однако как в том, так и в другом случае критерий сходимости указанного ряда будет определяться не только ускорением, но и величиной t . Так как обе величины фактически неизвестны, то получить конечную формулу для токов не удаётся.

Исходные дифференциальные уравнения можно преобразовать в интегральное уравнение Вольтера II рода. Для этого введём новую переменную V_n , связанную со старыми следующим образом:

$$V_n = \int_0^t \bar{i}_{1n} dt - \frac{\left[\bar{i}_{1n} + \frac{x_{12}}{x_2} \bar{i}_{2n} - \frac{\bar{u}_1}{jx_1} \right]_{t=0}}{\rho_1 \sigma}.$$

Тогда можно получить

$$\frac{d^2 V_n}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n) \frac{dV_n}{dt} + \rho_1(\rho_2 \sigma - j\omega_n) V_n = \frac{\bar{u}_1}{jx_1'} (\rho_2 \sigma + js_n).$$

Принимая

$$\frac{d^2 V_n}{dt^2} = l_n(t),$$

получается

$$l_n(t) + \int_0^t K(t, \tau) l_n(\tau) d\tau = \varphi_n(t), \quad (7)$$

где ядро

$$K(t, \tau) = \rho_1 + \rho_2 - j\omega_n + \rho_1(\rho_2 \sigma - j\omega_n)(t - \tau),$$

$$\varphi_n(t) = \frac{\bar{u}_1}{dx_1'} (\rho_2 \sigma + js_n) - (\rho_1 + \rho_2 - j\omega_n) \left(\frac{d\bar{u}_1}{dt} \right)_{t=0}.$$

Из теории интегральных уравнений известно, что решение уравнения выражается через резольвенту следующим образом:

$$l_n(t) = \varphi_n(t) - \int_0^+ R(t, \tau) \varphi_n(\tau) d\tau,$$

где $R(t, \tau)$ – резольвента.

Уравнение резольвенты можно найти либо в виде ряда Фредгольма, используя для определения его членов рекуррентные формулы, либо методом последовательных приближений, находя последовательно выражения для итерированных ядер. Однако как в том, так и в другом случае возникают большие технические трудности ввиду сложности ядра.

Так, например, второй член ряда Фредгольма уже содержит 7 слагаемых, а второе итерированное ядро имеет 10 членов. Очевидно, с возрастанием порядка членов в указанном ряде или итерированного ядра во втором случае число слагаемых будет увеличиваться несоизмеримо быстрее.

Это обстоятельство в значительной степени затрудняет определение уравнения резольвенты, следовательно, и решение уравнения (7).

Изложенное с достаточной ясностью показывает, что оба рассмотренных метода дают решения для токов в такой форме, которая исключает практически возможность их применения при рассмотрении уравнения (3). Очевидно, к аналогичному выводу приведёт и рассмотрение других методов.

Значительно более приемлемые результаты получаются при применении метода Лагранжа, для чего достаточно предположить, что активное сопротивление статора равно нулю. Следует отметить, что в некоторых случаях для получения выражений для переходных токов может быть применен метод малого параметра, а для расчёта скорости – метод последовательных приближений.

На основе изложенных выше предварительных сведений о способах анализа переходных процессов остановимся на вопросах, связанных с определением переходных характеристик: $\bar{i} = f_1(t)$, $M = f_2(t)$ и $\omega = f_3(t)$.

Рассмотрим более подробно дифференциальные уравнения [1]

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{l}_1}{dt} - \frac{x_{12}}{x_1'} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{l}_2 + \frac{1}{\sigma} [\rho_1 + j(1 - \sigma)\omega] \bar{l}_1 &= \frac{\bar{u}_1}{x_1}, \\ \frac{d\bar{l}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma} (\rho_2 \sigma - j\omega) \bar{l}_2 - \frac{x_{12}}{x_2 \sigma} (\rho_1 \sigma + j\omega) \bar{l}_1 &= -\frac{(1 - \sigma)}{x_{12} \sigma} \bar{u}_1, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{jx_{12}}{2H} (\bar{l}_2 \hat{l}_1 - \hat{l}_2 \bar{l}_1) - \frac{M_c}{H} \end{aligned} \quad (8)$$

и, используя их решения, получим указанные зависимости в форме, удобной для практического и теоретического использования.

Уравнения переходных токов. Выбирая первые два уравнения исходной системы (8), принимаем $r_1 = 0$, и, складывая их, получим

$$\frac{D\bar{l}_1}{dt} + \frac{x_{12}}{x_1} \frac{d\bar{l}_2}{dt} = \frac{\bar{u}_1}{x_1}. \quad (9)$$

На основании преобразования выражений напряжений, токов и потокосцеплений трёхфазной системы к системе осей α и β , неподвижно связанных со статором, и условия, что фазные напряжения статорной обмотки образуют систему прямой последовательности, находится выражение для обобщённого вектора напряжения в следующем виде: $\bar{u}_1 = U_{m1} e^{jt}$.

Тогда, интегрируя равенство (9), будем иметь

$$\bar{l}_1 + \frac{x_{12}}{x_1} \bar{l}_2 = \frac{\bar{u}_1}{jx_1} + K_1. \quad (10)$$

Так как при $r_1 = 0$ статорные и роторные токи связаны между собой алгебраической зависимостью, то задача определения их сводится к рассмотрению уравнения первого порядка, которое может быть получено подстановкой соотношения (10) в одно из двух первых уравнений (8), например, в первое. Тогда получим

$$\frac{d\bar{l}_1}{dt} + (\rho_2 - j\omega) \bar{l}_1 = \frac{\bar{u}_1}{x_1'} + (\rho_2 \sigma - j\omega) \left(\frac{\bar{u}_1}{jx_1'} + \frac{K_1}{\sigma} \right). \quad (11)$$

Решение данного уравнения без правой части можно представить следующим образом:

$$\bar{l}_1 = C e^{-\rho_2 t + j(\gamma - \gamma_0)},$$

где $\gamma - \gamma_0 = \int \omega dt$, C – постоянная интегрирования.

Для определения общего решения указанного уравнения можно применить метод вариации произвольных постоянных. Это позволяет получить следующее уравнение:

$$\frac{dC}{dt} = \left[\frac{\bar{u}_1}{x_1'} + (\rho_2 \sigma - j\omega) \left(\frac{\bar{u}_1}{jx_1'} + \frac{K_1}{\sigma} \right) \right] e^{\rho_2 t - j(\gamma - \gamma_0)},$$

решение которого для величины C приводит к выражению

$$C = \left(\frac{K_1}{\sigma} + \frac{\bar{u}_1}{jx_1'} \right) e^{\rho_2 t - j(\gamma - \gamma_0)} - (1 - \sigma) \rho_2 \left[\frac{K_1}{\sigma} \int e^{\rho_2 t - j(\gamma - \gamma_0)} dt + \frac{U_{m1}}{jx_1'} \int e^{\rho_2 t + j(t - \gamma + \gamma_0)} dt + K_2 \right].$$

Следовательно, общее решение уравнения (11) представится следующим образом:

$$\bar{l}_1 = \frac{K_1}{\sigma} + \frac{\bar{u}_1}{jx_1'} - (1 - \sigma) \rho_2 \left[\frac{K_1}{\sigma} \int e^{\rho_2 t - j(\gamma - \gamma_0)} dt + \frac{U_{m1}}{jx_1'} \int e^{\rho_2 t + j(t - \gamma + \gamma_0)} dt + K_2 \right] e^{-\rho_2 t + j(\gamma - \gamma_0)}.$$

На основании последнего и равенства (10) находим выражение для \bar{l}_2 :

$$\bar{i}_2 = -\frac{x_{12}}{x_2} \left\{ \frac{K_1}{\sigma} + \frac{\bar{u}_1}{jx'_1} - \rho_2 \left[\frac{K_1}{\sigma} \int e^{\rho_2 t - j(\gamma - \gamma_0)} dt + \frac{U_{m1}}{jx'_1} \int e^{\rho_2 t + j(t - \gamma + \gamma_0)} dt + K_2 \right] e^{-\rho_2 t + j(\gamma - \gamma_0)} \right\}.$$

Таким образом, при начальных условиях \bar{i}_{10} и \bar{i}_{20} можно получить

$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= \bar{i}_0 + \frac{\bar{u}_1 - U_{m1}}{jx'_1} - (1 - \sigma)\rho_2 \left[\left(\bar{i}_0 - \frac{U_{m1}}{jx'_1} \right) F_\omega(t) + \frac{U_{m1}}{jx'_1} F_s(t) + \frac{\bar{i}_0 - \bar{i}_{10}}{(1 - \sigma)\rho_2} \right] e^{-\rho_2 t + j\gamma}, \\ \bar{i}_2 &= -\frac{x_{12}}{x_2} \left\{ \bar{i}_0 + \frac{\bar{u}_1 - U_{m1}}{jx'_1} - \rho_2 \left[\left(\bar{i}_0 - \frac{U_{m1}}{jx'_1} \right) F_\omega(t) + \frac{U_{m1}}{jx'_1} F_s(t) + \frac{\bar{i}_0 - \bar{i}_{10}}{(1 - \sigma)\rho_2} \right] e^{-\rho_2 t + j\gamma} \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\bar{i}_0 = \frac{1}{\sigma} \left(\bar{i}_{10} + \frac{x_{12}}{x_1} \bar{i}_{20} \right); \quad \gamma = \int_0^t \omega dt; \quad F_\omega(t) = \int_0^t e^{\rho_2 t - j\gamma} dt; \quad F_s(t) = \int_0^t e^{\rho_2 t + j(t - \gamma)} dt.$$

На основании уравнений (12) нетрудно получить выражения токов для любого из интервалов. Причём $\gamma = \omega_0 t + \frac{a}{2} t^2$.

Для первого интервала, полагая

$$\bar{i}_{10} = \frac{U_{m1}}{jx'_1} \times \frac{\rho_2 + js_0}{\rho_2 + js_0}, \quad \bar{i}_{20} = -\frac{U_{m1}}{x_{12}\sigma} (1 - \sigma) \frac{s_0}{\rho_2 + js_0},$$

т.е. считая, что при $t = 0$ имеет место стационарный режим, получим

$$\begin{aligned} \bar{i}_{1(1)} &= \frac{U_{m1}}{jx'_1} \left\{ e^{jt} - (1 - \sigma)\rho_2 \left[F_{s1}^{(t)} + \frac{1}{\rho_2 + js_0} \right] e^{-\rho_2 t + j\gamma} \right\}, \\ \bar{i}_{2(1)} &= -\frac{U_{m1}}{jx'_1} \frac{x_{12}}{x_2} \left\{ e^{jt} - \rho_2 \left[F_{s1}^{(t)} + \frac{1}{\rho_2 + js_0} \right] e^{-\rho_2 t + j\gamma} \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для интервала «n» будем иметь

$$\begin{aligned} \bar{i}_{1(n)} &= \frac{U_{m1}}{jx'_1} \left\{ e^{jt} - (1 - \sigma)\rho_2 [F_{sn}(t) + \eta_n] e^{-\rho_2 t + j\gamma} \right\}, \\ \bar{i}_{2(n)} &= -\frac{U_{m1}}{jx'_1} \frac{x_{12}}{x_2} \left\{ e^{jt} - \rho_2 [F_{sn}(t) + \eta_n] e^{-\rho_2 t + j\gamma} \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где η_n – коэффициент, учитывающий начальные условия

$$\eta_n = e^{-\rho_2 t_{(n-1)} + j\gamma_{(n-1)}} \int_0^t e^{\rho_2 t + j(t - \gamma_{(n-1)})} dt + \dots + \frac{1}{\rho + js_0} e^{-\rho_2 (t_{(n-1)} + \dots + t_1) + j(\gamma_{(n-1)} + \dots + \gamma_1)},$$

здесь t_{n-1}, t_{n-2}, \dots – величины участков.

Необходимо заметить, что уравнения токов (13) и (14) написаны в координатах, жёстко связанных со статором. Поэтому чтобы иметь представление о действительных роторных токах, необходимо \bar{i}_2 умножить на выражение $e^{-j\omega t}$.

Указанные уравнения подтверждают вывод о несущественности влияния ускорения при малых значениях скорости, который получен выше на основе простейшего рассмотрения вопроса. Изложенное непосредственно вытекает из рассмотрения выражения $F_s(t)$, которое в данном случае может быть проинтегрировано в предположении, что s – параметр, т.к. влияние ускорения на

величину γ практически достаточно мало. Также очевидно, что при малых скольжениях величина $F_s(t)$ существенным образом зависит от ускорения.

Вращающий электромагнитный момент. На основе приведённых выше уравнений токов нетрудно получить выражения для вращающих электромагнитных моментов.

Вращающий электромагнитный момент может быть определён из соотношения

$$M = \frac{jx_{12}}{2} (\bar{i}_2 \hat{i}_1 - \hat{i}_2 \bar{i}_1).$$

Последнее можно представить в несколько ином виде путём введения следующих обозначений:

$$\bar{i}_1 = J_1(t)e^{j\theta_1}; \quad \bar{i}_2 = J_2(t)e^{j\theta_2},$$

тогда

$$M = x_{12}J_1(t)J_2(t)\sin\theta,$$

где $\theta = \theta_1 - \theta_2$ – угол сдвига между намагничивающими силами статора и ротора.

Такая форма написания допускает относительно простую интерпретацию физической стороны образования моментов. Действительно, из приведённого выражения следует:

- составляющие намагничивающих сил, имеющие одинаковые фазы, моментов не создают;
- в образовании моментов примут участие лишь составляющие с различными сдвигами, обусловленными неодинаковостью начальных фаз или частот изменения токов, образующих эти составляющие;
- выбор координатной оси, относительно которой определяется положение намагничивающих сил, при определении моментов роли не играет;
- при опережающей намагничивающей силе статора машина развивает положительный момент, т.е. имеет место двигательный режим;
- в обратном случае момент получает отрицательный знак, т.е. имеет место генераторный режим.

Изложенное позволяет получить выражения для вращающих моментов достаточно простым образом. Так, например, исходя из выражений (13) и (14), нетрудно видеть, что токи основной частоты и составляющие с величиной

$$F_{s_1}(t)e^{-\rho_2 t + j\gamma}$$

создадут момент

$$\frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 e^{-\rho_2 t}}{x'_1} [F'_{s_1}(t) \sin(t - \gamma) - F''_{s_1} \cos(t - \gamma)],$$

а составляющие

$$e^{-\rho_2 t + j\gamma}$$

с первым из указанных токов создают момент, определяемый по формуле

$$\frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 e^{-\rho_2 t}}{x'_1} \left[\frac{\rho_2}{\rho_2^2 + s_0} \sin(t - \gamma) - \frac{s_0}{\rho_2^2 + s_0} \cos(t - \gamma) \right].$$

Здесь величины $F'_{s_1}(t)$ и F''_{s_1} соответственно означают вещественные и мнимые части выражения $F_{s_1}(t)$.

Что касается взаимодействия составляющих токов

$$F_{s_1}(t)e^{-\rho_2 t + j\gamma} \text{ и } e^{-\rho_2 t + j\gamma},$$

то результирующее значение образованных ими моментов будет равно нулю. Таким образом, для первого интервала будем иметь

$$M = \frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 e^{-\rho_2 t}}{x'_1} \left\{ \left[F'_{s_1} + \frac{\rho_0}{\rho_2^2 + s_0^2} \right] \sin(t - \gamma) - \left[F''_{s_1}(t) - \frac{s_0}{\rho_2^2 + s_0^2} \right] \cos(t - \gamma) \right\}.$$

Соответственно для интервала n получим

$$M = \frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 e^{-\rho_2 t}}{x'_1} \{ [F'_{s_n} + \eta'_n] \sin(t - \gamma) - [F''_{s_n}(t) - \eta''_n] \cos(t - \gamma) \}, \quad (15)$$

где η'_n и η''_n – вещественные и мнимые части выражения η_n .

Заметим, что величины η'_n и η''_n также могут быть получены из условия непрерывности вращающих моментов и их производных на границе участков. Последнее непосредственно вытекает из аналогичного же условия, отнесённого к токам и к их производным, которое было использовано выше при определении величины η_n . Обозначив через M_{n-1} величину моментов в начале участка n , даваемую формулой (15) при $n - 1$, указанное условие можем представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2}{x'_1} \eta''_n &= M_{n-1}, \\ \frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2}{x'_1} [\eta'_n s_{n0} - \eta''_n \rho_2] &= \frac{dM_{n-1}}{dt}. \end{aligned}$$

Из последних выражений следует

$$\begin{aligned} \eta''_n &= \frac{x'_1}{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 s_{n0}} \left[\frac{dM_{n-1}}{dt} + \rho_2 M_{n-1} \right], \\ \eta'_n &= \frac{x'_1}{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2} M_{n-1}. \end{aligned}$$

Уравнение механического равновесия системы и его преобразование. На основании, полученных результатов перейдём к рассмотрению задачи определения скорости ротора. Если вопросы, связанные с определением токов и вращающих моментов, при условии ($r_1 = 0$) решаются относительно просто, то расчёт скорости, вообще говоря, представляет более сложную задачу.

Известно, что явления механического переходного процесса подчиняются дифференциальному уравнению моментов, действующих на вал ротора.

Подставляя выражение (15) в дифференциальное уравнение переходных процессов идеализированной асинхронной машины, получим

$$a_n = \frac{U_{m_1}^2 (1 - \sigma) \rho_2 e^{-\rho_2 t}}{H x'_1} \left\{ [F'_{s_n} + \eta'_n] \sin \left(s_{n0} t - \frac{a_n t^2}{2} \right) - [F''_{s_n} + \eta''_n] \cos \left(s_{n0} t - \frac{a_n t^2}{2} \right) \right\} - \frac{M_c}{H}. \quad (16)$$

Уравнение (16), как легко заметить, в общем виде не решается. Возможно лишь приближённое его решение, например, следующим образом. Рассматривая величины $F'_{s_n}(t)$ и $F''_{s_n}(t)$ как некоторые новые переменные, уравнение (16) можно представить в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Для этого достаточно добавить к указанному уравнению

$$\begin{aligned} \frac{dF'_{s_n}(t)}{dt} &= e^{\rho_2 t} \cos \left(s_{n0} t - \frac{a_n t^2}{2} \right), \\ \frac{dF''_{s_n}(t)}{dt} &= e^{\rho_2 t} \sin \left(s_{n0} t - \frac{a_n t^2}{2} \right). \end{aligned}$$

При этом известно

$$F'_{s_n} = 0, \quad F''_{s_n} = 0.$$

Для определения ускорения можно воспользоваться численным методом, например, методом последовательных интервалов.

Однако при относительной простоте самого метода решение указанных уравнений при этом всё же встречает значительные технические трудности. Причиной этому служит то обстоятельство, что с увеличением мгновенного значения скольжения приходится либо уменьшать величину интервалов, либо учитывать разности более высоких порядков. Как в том, так и в другом случае число расчётных операций естественно увеличивается.

Вследствие этого целесообразно искать более совершенное решение задачи.

Рассмотрим выражения $F'_{s_n}(t)$ и $F''_{s_n}(t)$. Последние можно представить следующим образом:

$$F'_{s_n}(t) = \int_0^t e^{\rho_2 t} \left[\cos(s_{n0}t) \cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \sin(s_{n0}t) \sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) \right] dt,$$

$$F''_{s_n}(t) = \int_0^t e^{\rho_2 t} \left[\sin(s_{n0}t) \cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) - \cos(s_{n0}t) \sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) \right] dt.$$

В приведённых интегралах выражения $\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right)$ и $\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right)$ можно рассматривать как периодические функции аргумента (t^2). Тогда возможны существенные преобразования.

Напишем следующие тождества:

$$\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = \left[\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{3^2} \sin 3\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{5^2} \sin 5\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) - \dots \right] + \frac{1}{3^2} \left[\sin\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{3^2} \sin 3\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{5^2} \sin 5\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) - \dots \right] + \left[-\frac{1}{5^2} \sin\left(\frac{5a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{7^2} \sin\left(\frac{7a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{11^2} \sin\left(\frac{11a_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{13^2} \sin\left(\frac{13a_n t^2}{2}\right) - \dots \right],$$

$$\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = \left[\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{3^2} \cos 3\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{5^2} \cos 5\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \dots \right] - \frac{1}{3^2} \left[\cos\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{3^2} \cos 3\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{5^2} \cos 5\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \dots \right] + \left[\frac{1}{5^2} \cos\left(\frac{5a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{7^2} \cos\left(\frac{7a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{11^2} \cos\left(\frac{11a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{13^2} \cos\left(\frac{13a_n t^2}{2}\right) + \dots \right].$$

На основании последних можно перейти к следующим приближённым равенствам:

$$\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = \left[\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{3^2} \sin 3\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \dots \right] \frac{1}{3^2} \left[\sin\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{3^2} \sin 3\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \dots \right],$$

$$\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = f_{s_1} + f_{s_2};$$

$$\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = \left[\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{3^2} \cos 3\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) + \dots \right] \frac{1}{3^2} \left[\cos\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{3^2} \cos 3\left(\frac{3a_n t^2}{2}\right) + \dots \right],$$

$$\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) = f_{c_1} + f_{c_2}.$$

В приведённых соотношениях каждому из рядов соответствуют периодические функции, ход изменения которых показан на рис. 1 и 2.

Таким образом, в пределах от $\frac{ma_n t^2}{2} = 0$ до $\frac{ma_n t^2}{2} = \frac{\pi}{2}$ будем иметь

$$f_{s_m} = \frac{1}{m^2} \left[\sin\left(\frac{ma_n t^2}{2}\right) - \frac{1}{3^2} \sin 3\left(\frac{ma_n t^2}{2}\right) + \dots \right] = \frac{\pi^2}{8m^2} \left(1 - \frac{ma_n t^2}{2} \right),$$

$$f_{c_m} = \frac{1}{m^2} \left[\cos\left(\frac{ma_n t^2}{2}\right) + \frac{1}{3^2} \cos 3\left(\frac{ma_n t^2}{2}\right) + \dots \right] = \frac{\pi}{8m} a_n t^2,$$

так, что при $0 \leq t \leq \sqrt{\frac{\pi}{3a_n}}$

$$\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) \approx \frac{4}{3} \times \frac{\pi}{8} a_n t^2, \quad (17)$$

$$\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right) \approx \frac{2}{3} \times \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{4}{3} - a_n t^2\right). \quad (18)$$

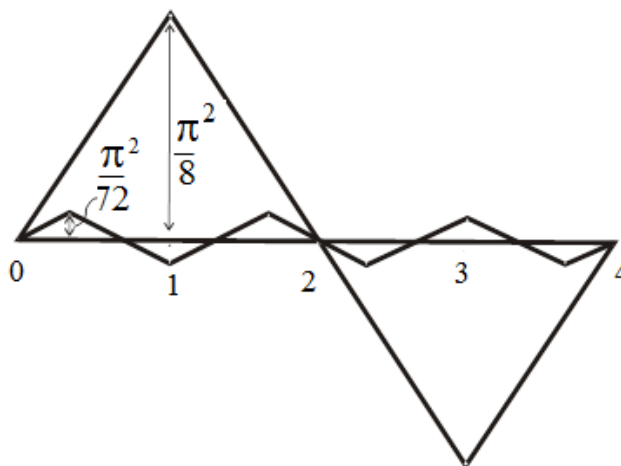


Рис. 1. Синусоидальная составляющая периодической функции

Для $t > \sqrt{\frac{\pi}{3a_n}}$ выражения этих же величин непосредственно получаются из рис. 1 и 2.

Интегралы $F'_{sn}(t)$ и $F''_{sn}(t)$ можно преобразовать, применяя все получаемые таким путём соотношения для величин $\sin\left(\frac{a_n t^2}{2}\right)$ и $\cos\left(\frac{a_n t^2}{2}\right)$.

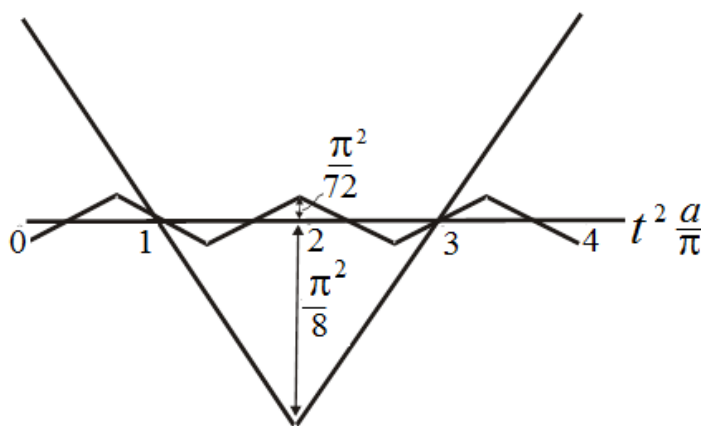


Рис. 2. Косинусоидальная составляющая периодической функции

Однако в дальнейшем используем только выражения (17) и (18). В соответствии с последними указанные интегралы можно представить следующим образом:

$$F'_{sn}(t) = \frac{\pi^2}{9} \left\{ \frac{\cos(s_{n0} t) + k \sin(s_{n0} t)}{\rho_2(1+k^2)} e^{\rho_2 t} - \frac{1}{\rho_2(1+k^2)} - \right.$$

$$-\frac{3a_n}{4\pi}e^{\rho_2 t}(B-2A)\sin(s_{n_0}t) + (A+2B)\cos(s_{n_0}t) - e^{-\rho_2 t}(2C-D)\},$$

$$F_{sn}''(t) = \frac{\pi^2}{9} \left\{ \frac{\sin(s_{n_0}t) - k\cos(s_{n_0}t)}{\rho_2(1+k^2)} e^{\rho_2 t} + \frac{k}{\rho_2(1+k^2)} - \right.$$

$$\left. -\frac{3a_n}{4\pi}e^{\rho_2 t}[(A+2B)\sin(s_{n_0}t) - (B-2A)\cos(s_{n_0}t) + (C+2D)e^{-\rho_2 t}] \right\}.$$

Здесь

$$k = \frac{S_{n_0}}{\rho_2}; \quad A+D = \frac{t^2}{\rho_2(1+k^2)} - 2\frac{1-k^2}{\rho_2^2(1+k^2)^2}t;$$

$$B+C = \frac{kt^2}{\rho_2(1+k^2)} - \frac{4kt}{\rho_2^2(1+k^2)^2};$$

$$C = \frac{6k-2k^3}{\rho_2^3(1+k^2)^3}; \quad D = \frac{6k^2-2}{\rho_2^3(1+k^2)^3}.$$

Внося полученное в уравнение (16), после ряда преобразований и упрощений найдём

$$\frac{U_{m1}^2(1-\sigma)\rho_2}{x_1'} \{0,35t^2[B + e^{-\rho_2 t}(D\sin(s_{n_0}t) - C\cos(s_{n_0}t))]a_n^2 + 0,29[2A -$$

$$-B - \frac{k+2}{\rho_2(1+k^2)}t^2 + e^{-\rho_2 t}((2C-D)\sin(s_{n_0}t) + (C+2D)\cos(s_{n_0}t))]\}a_n +$$

$$+ \left[\frac{k}{\rho_2(1+k^2)} - e^{-\rho_2 t} \left(\frac{1}{\rho_2(1+k^2)} - \eta_n' \right) \sin(s_{n_0}t) - \left(\frac{k}{\rho_2(1+k^2)} - \eta_n'' \right) \cos(s_{n_0}t) \right] = M_c + Ha_n.$$

Окончательно

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

Причём

$$R = 0,35M_{n_0}t^2 \left\{ t^2 - \frac{4t}{\rho_2(1+k^2)} + \frac{6-2k^2}{\rho_2^2(1+k^2)^2} + \frac{e^{-\rho_2 t}}{\rho_2^2(1+k^2)^2} \left[(6k - \right.$$

$$\left. - \frac{2}{k})\sin(s_{n_0}t) - (6-2k^2)\cos(s_{n_0}t) \right],$$

$$Q = -\frac{0,83R}{t^2} - 0,58M_{n_0} \left\{ -0,5t^2 + \frac{(1-k^2)2t}{\rho_2 k(1+k^2)} - \frac{2-6k^2}{\rho_2^2 k(1+k^2)^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\rho_2 t}}{\rho_2^2(1+k^2)^2} (6-2k^2)\sin(s_{n_0}t) + (6k - \frac{2}{k})\cos(s_{n_0}t) \right\},$$

$$N = M_{n_0}[1 - e^{-\rho_2 t}(\delta_n'\sin(s_{n_0}t) + \delta_n''\cos(s_{n_0}t))],$$

(19)

где M_{n_0} – статический момент при скольжении s_{n_0} ; δ_n' , δ_n'' – коэффициенты, учитывающие разность переходных и статических моментов при s_{n_0} .

Таким образом, для расчёта ускорения получено квадратное уравнение. Это оказалось возможным благодаря преобразованию выражений $F_{sn}'(t)$ и $F_{sn}''(t)$ рассмотренным способом. Всякое



иное их преобразование приводит к уравнению более высокого порядка, что существенно снижает эффективность анализа переходных процессов.

При выводе уравнения (19) не делалось предположений относительно величины начального скольжения, поэтому это уравнение может быть использовано и при анализе переходных процессов, протекающих в области сверхсинхронной скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2010. – 314 с.
2. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Альянс, 2016. – 528 с.
3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. Иванов, С. Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 4-8.
5. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии: моногр. [Электронный ресурс] / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Электрон. дан. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html>.
6. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – Череповец: Меркурий-Пресс, 2000. – 386 с.
7. Kim, K. I. Equations of a synchronous machine with electrodynamic suspension of the rotor / K. I. Kim, K. K. Kim // Elektrichestvo. – 1989. – Issue 1. – P. 10-22.
8. Kim, K. K. Heat-generating electromechanical converter / K. K. Kim, S. N. Ivanov, I. M. Karpova // Russian Electrical Engineering. – September 2008. – Vol. 79. – Issue 9. – P. 508-513.
9. Kim K. K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters / K. K. Kim // Russian Electrical Engineering. – August 2009. – Vol. 80. – Issue 8. – P. 459-465.
10. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
11. Ким, К. К. Влияние скорости ротора асинхронной машины на характер протекания переходных электромагнитных процессов / К. И. Ким, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1(40). – С. 28-36.

Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОЩНОСТИ В СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А.
S. N. Ivanov, K. K. Kim, O. V. Prihodchenko, A. A. Prosolovich

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОЩНОСТИ В СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

THEORETICAL FOUNDATIONS OF MATHEMATICAL MODELING OF POWER CONVERSION PROCESSES IN COMBINED POWER DEVICES

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, 1-60; тел. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Sergey N. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Kotovsky str. 60-1; tel. 8(914)1859120. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Московский проспект, 9; тел. 8(903)0965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head Theoretical Electrical Engineering Department, St.Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); Russia, Sankt-Petersburg, Moskovsky Ave., 9; tel. 8(903)0965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Приходченко Оксана Вадимовна – кандидат технических наук, Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859358. E-mail: okpr68@mail.ru.

Oksana V. Prichodchenko – PhD in Engineering, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859358. E-mail: okpr68@mail.ru.

Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)1859359. E-mail: alpr72@mail.ru.

Alexey A. Prosolovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Computer-Aided Design Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)1859359. E-mail: alpr72@mail.ru.

Аннотация. Повышение эффективности энергетических устройств представляет одну из актуальных проблем, затрагивающих большинство отраслей промышленности и транспорта. В данной статье рассмотрены теоретические и методические основы разработки и имитационного моделирования класса технических систем, в которых объединены исполнительное и приводное устройства. Приведено описание базовой конструкции преобразователя и поясняющая происходящие в нём энергетические процессы диаграмма. Предметом изучения являются совокупность процессов, протекающих в рассматриваемом устройстве, и их связь с размерными соотношениями параметров отдельных элементов. Определена последовательность подготовки и решения задачи установления оптимальных проектных параметров напорного элемента совмещённого энергетического устройства. Обоснована номенклатура варьируемых величин, установлены характеристические области исследования, условия равенства и ограничения. Осуществлена спецификация параметризуемых модулей объекта исследования. Обоснованы критерии выбора параметров методом разложения по процессным уровням – электромагнитным, механическим, гидравлическим и тепловым.

Summary. Improving the efficiency of energy devices is one of the most pressing problems affecting most industries and transport. This article discusses the theoretical and methodological foundations for the development and simulation of a class of technical systems that combine Executive and drive devices. A description of the basic design of the Converter and a diagram explaining the energy processes occurring in it is given. The subject of the study is a set of processes occurring in the device under consideration, and their relationship with the dimensional relations of the parameters of individual elements. The sequence of preparation and solution of the problem of es-

establishing the optimal design parameters of the pressure element of the combined energy device is determined. The nomenclature of variable values is justified, characteristic areas of research, equality conditions and restrictions are established. The specification of parameterized modules of the object of research is carried out. The criteria for selecting parameters using the decomposition method for process levels – electromagnetic, mechanical, hydraulic, and thermal are justified.

Ключевые слова: совмещённое устройство, моделирование, проектные параметры.

Key words: combined device, modeling, design parameters.

УДК 621. 313.17

Постановка задачи исследования. Повышение эффективности энергетических устройств за счёт изменения их конструкции, связанного с объединением части структурных элементов, является причиной возрастающего взаимного влияния процессов преобразования мощности и существенно усложняет их анализ. Несмотря на очевидные преимущества совмещения элементов в одном устройстве, большинство имеющихся исследований связано с общими вопросами разработки конструкций и упрощённым рассмотрением энергетических процессов [1–6]. В большей степени рассматриваемому вопросу посвящены работы [7–9].

Установление зависимости выходных характеристик совмещённых энергетических устройств (СЭУ) от проектных параметров позволяет создавать оптимальные устройства, адаптированные под заданные условия эксплуатации. В качестве критерия оценки могут быть рассмотрены результаты анализа функциональных связей проектных величин и средних скоростей рабочей среды в областях моделирования, определяющих выходные характеристики рассматриваемых устройств.

Для определения границ и геометрии области исследования, установления условий равенств и ограничений при определении основных размерных соотношений необходимо предварительно описать конструкцию совмещённого энергетического устройства.

Конструктивное исполнение объекта исследования. Конструктивно СЭУ аналогичны электромеханическим преобразователям переменного тока (асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором). Один из конструктивных вариантов СЭУ показан на рис. 1.

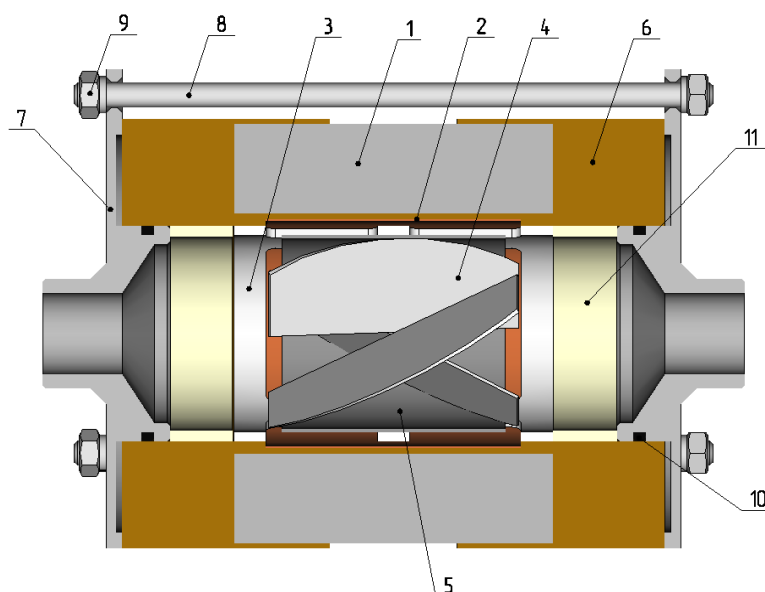


Рис. 1. Конструкция СЭУ

СЭУ состоит из герметичного статора, включающего магнитопровод 1 с уложенной в нём сетевой (первичной) обмоткой и неподвижную короткозамкнутую обмотку 2, выполненную из

немагнитного электропроводящего материала, а также исполнительного элемента (ИЭ) 3 в виде вращающейся короткозамкнутой вторичной обмотки цилиндрической формы. Сетевая обмотка уложена в пазы статора, причём толщина зубцов b_z определяется как [10]

$$b_z = \frac{t \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_z}, \quad (1)$$

где t – зубцовое деление по внутреннему диаметру статора, м; B_δ – величина магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл; B_z – величина магнитной индукции в расчётном сечении зубца, составляющая 1,7...2,1 Тл; k_c – коэффициент заполнения сталью сердечника статора, принимаемый равным 0,95...0,97 [10].

На внутренней поверхности вращающегося элемента 3 установлен ферромагнитный магнитопровод 5 и закреплены напорные лопасти 4. Исполнительный элемент 3 и магнитопровод 1 разделены самосмазывающимся неэлектропроводящим материалом 6, образующим радиально-упорный подшипник скольжения и обеспечивающим свободное вращение ротора 3 в тангенциальном направлении.

Необходимость использования внутреннего магнитопровода 5 связана в первую очередь с требованиями энергоэффективности и энергосбережения. Основной особенностью СЭУ как устройства для перемещения нагреваемой среды является чрезвычайно малое гидравлическое сопротивление, обусловленное отсутствием вала и классических подшипниковых узлов.

В то же время такая конструкция при отсутствии внутреннего ферромагнитопровода характеризуется значительным намагничивающим реактивным током и потребляемой мощностью, приводящими к нагреву герметичного статора СЭУ, что связано с повышенным магнитным сопротивлением намагничивающего контура и таким распределением электромагнитного поля, при котором большая часть силовых линий проходит по немагнитному участку внутри устройства.

На рис. 2 для сравнения показано распределение магнитного поля во внутренней области СЭУ (см. рис. 2, а) и асинхронного двигателя (см. рис. 2, б) для четырёхполюсного исполнения.

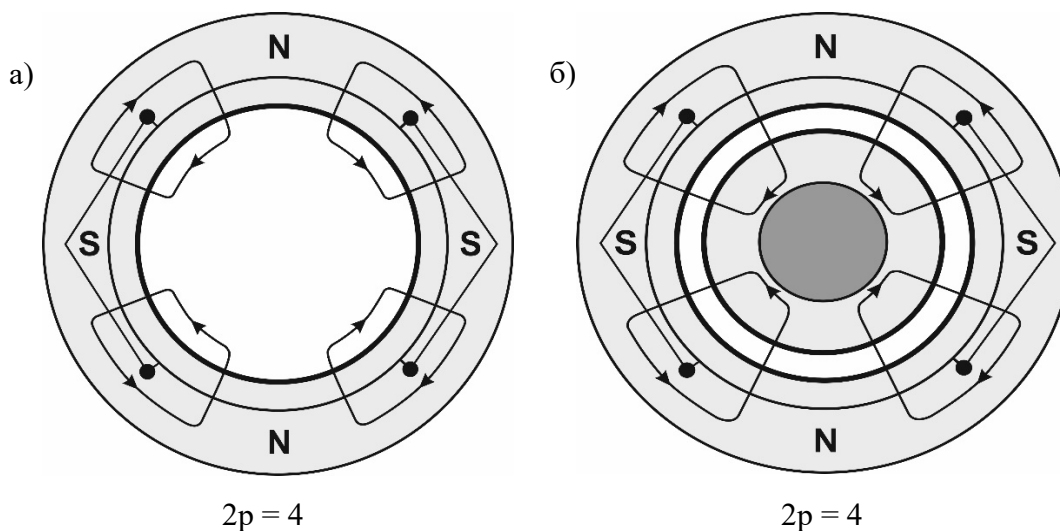


Рис. 2. Силовые линии магнитного поля при отсутствии (а) и наличии (б) внутреннего ферромагнитопровода

Соответственно, по сравнению с асинхронным двигателем потребляемый СЭУ без внутреннего ферромагнитопровода из сети ток на порядок выше (в зависимости от мощности и числа пар полюсов), а коэффициент мощности не превышает 0,15...0,20. Кроме этого, рис. 2 показывает существенную зависимость величины тока от числа полюсов, что отличает СЭУ от стандартных асинхронных двигателей, аналогичные характеристики которых в существенно меньшей степени зависят от этого параметра.

Таким образом, отсутствие в конструкции СЭУ внутреннего ферромагнитопровода приводит к напряжённому тепловому режиму и низким напорным характеристикам устройства. Следует отметить, что особенностью определения размерных соотношений внутреннего ферромагнитопровода СЭУ наряду с электромагнитными является учёт его влияния на гидравлические и тепловые процессы, что дополнительно усложняет процесс проектирования напорного элемента.

Конструкционную целостность устройства в варианте, приведённом на рис. 1, обеспечивают две торцевых крышки 7, стянутые шпильками 8, 9. Для обеспечения герметичности между крышками 7 и статором 6 могут быть использованы уплотнительные кольца 10 из технической резины. Сопряжение СЭУ с внешней гидравлической системой осуществляется с помощью входного и выходного патрубков (диффузор и конфузор), выполненных в крышках 7. Между напорным элементом и крышками расположены распорные кольца 11 из композиционного материала, компенсирующие осевое смещение напорного элемента.

На рис. 3 приведена энергетическая диаграмма СЭУ, на которой проиллюстрировано преобразование и распределение мощностей в СЭУ с выделением всех составляющих потерь, определяющих эффективность устройства.

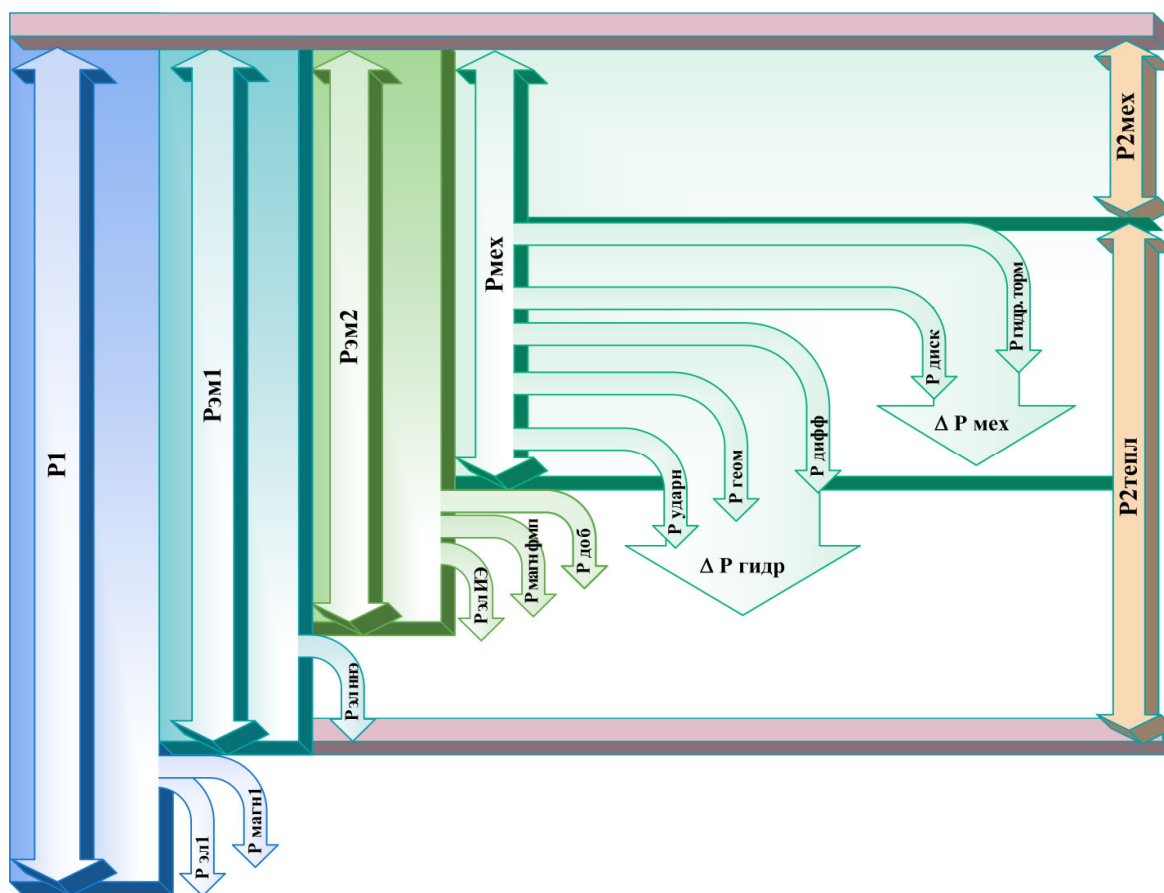


Рис. 3. Энергетическая диаграмма СЭУ

Из диаграммы видно, что потребляемая мощность P_1 преобразуется в выходную мощность СЭУ, представленную суммой тепловой и механической мощностей. При этом мощность, идущая на транспортирование и нагрев рабочей среды, составляет разность между P_1 и всеми потерями, за исключением электрических в первичной обмотке $P_{эл1}$ и магнитных в стали герметичного магнитопровода $P_{магн1}$. Механическая мощность $P_{2мех}$ обеспечивает перемещение рабочей среды с заданными параметрами напора и производительности, а тепловая $P_{2тепл}$ – её нагрев до требуемой температуры. В установившихся режимах работы СЭУ при скорости вращения напорного элемента близкой к синхронной (n_1) тепловые параметры СЭУ будут определяться главным образом пара-

метрами неподвижного нагревательного элемента (ННЭ), в то время как исполнительный элемент будет определять производительность (расход) и давление (напор).

Основная часть подводимой мощности, за исключением указанных потерь ($P_{эл1}$, $P_{магн1}$), передаётся через воздушный (немагнитный) зазор на элементы вторичной цепи и является суммарной электромагнитной мощностью, определяющей два основных процесса в СЭУ: нагрев ННЭ электрическими потерями $P_{эл\text{ ННЭ}}$, обеспечиваемыми электромагнитной мощностью $P_{эм1}$, и нагрев и вращение ротора, обеспечиваемые электромагнитной мощностью $P_{эм2}$ и потерями, складывающимися из электрических потерь в исполнительном элементе $P_{эл\text{ ИЭ}}$, магнитных потерь во внутреннем ферромагнитопроводе $P_{магн\text{ фмп}}$ и добавочных потерь $P_{доб}$. При вращении напорного элемента возникают дополнительные источники нагрева рабочей среды, обусловленные гидравлическими потерями $\Delta P_{гидравл}$, которые включают ударные $P_{ударн}$, геометрические $P_{геом}$ и дифференциальные $P_{дифф}$, а также механическими потерями $\Delta P_{мех}$ в виде дисковых потерь $P_{диск}$ и потерь гидравлического торможения $P_{гидр.торм}$. Для рассматриваемого класса устройств перечисленные потери относятся к внутренним полезным потерям и являются дополнительным источником нагрева рабочей среды.

Для количественного разделения выходной мощности на механическую и тепловую необходимо определение отдельных составляющих потерь мощности, причём точное нахождение этих величин представляет самостоятельную сложную научно-исследовательскую задачу.

Область проектирования. Для решения основной задачи – определения номинальных параметров напорного элемента, обеспечивающих заданные выходные характеристики СЭУ, – первоначально необходимо выделить область проектирования (см. рис. 4).

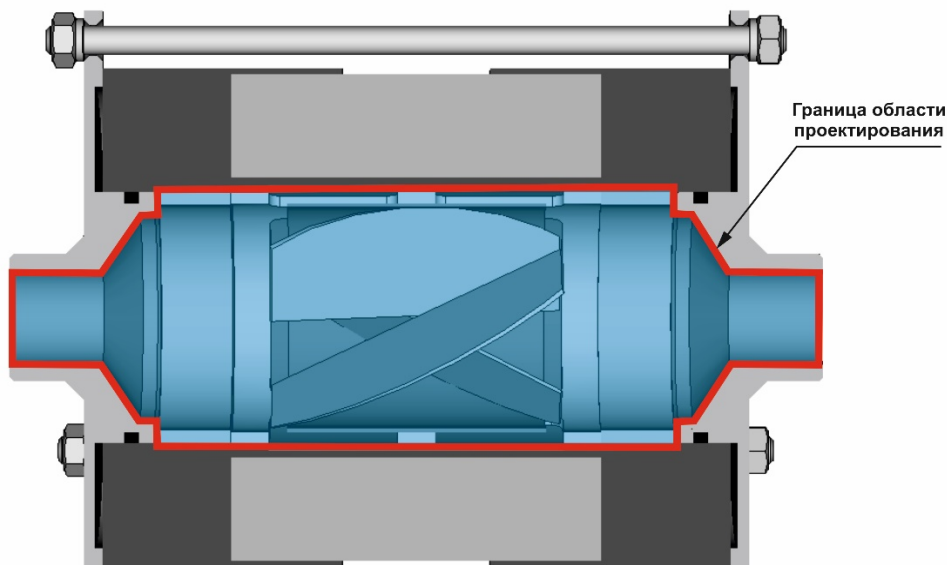


Рис. 4. К выбору области проектирования

Область проектирования характеризуется тем, что качественно и количественно определяет диапазон вариативности конструктивных параметров и размерных соотношений, влияющих на гидравлические и тепловые процессы, являющиеся результатом преобразования электромагнитной мощности в СЭУ.

Из рис. 4 видно, что область исследования ограничена статором, опорными поверхностями, поверхностями входного диффузора и выходного конфузора.

Выбор проектных параметров. Априорно количественное влияние отдельных параметров напорного элемента на характеристики СЭУ неизвестно, поэтому на начальном этапе максимально учитываются все геометрические величины, которые теоретически могут влиять на эффективность устройства. В качестве проектных параметров при известных размерных соотношениях неподвижной части принимаются (см. рис. 5):

- наружный диаметр напорного элемента d ;

- длина напорного элемента l ;
- толщина напорного элемента t ;
- количество колец напорного элемента n_k ;
- количество ребер напорного элемента n_p ;
- ширина кольца напорного элемента w_k ;
- ширина ребра напорного элемента w_p ;
- длина лопасти l_l ;
- толщина лопасти t_l ;
- высота лопасти h_l ;
- количество лопастей n_l ;
- угол установки лопасти α ;
- диаметр внутреннего ферромагнитопровода (ФМ) d_ϕ ;
- длина ФМ l_ϕ ;
- толщина ФМ t_ϕ .

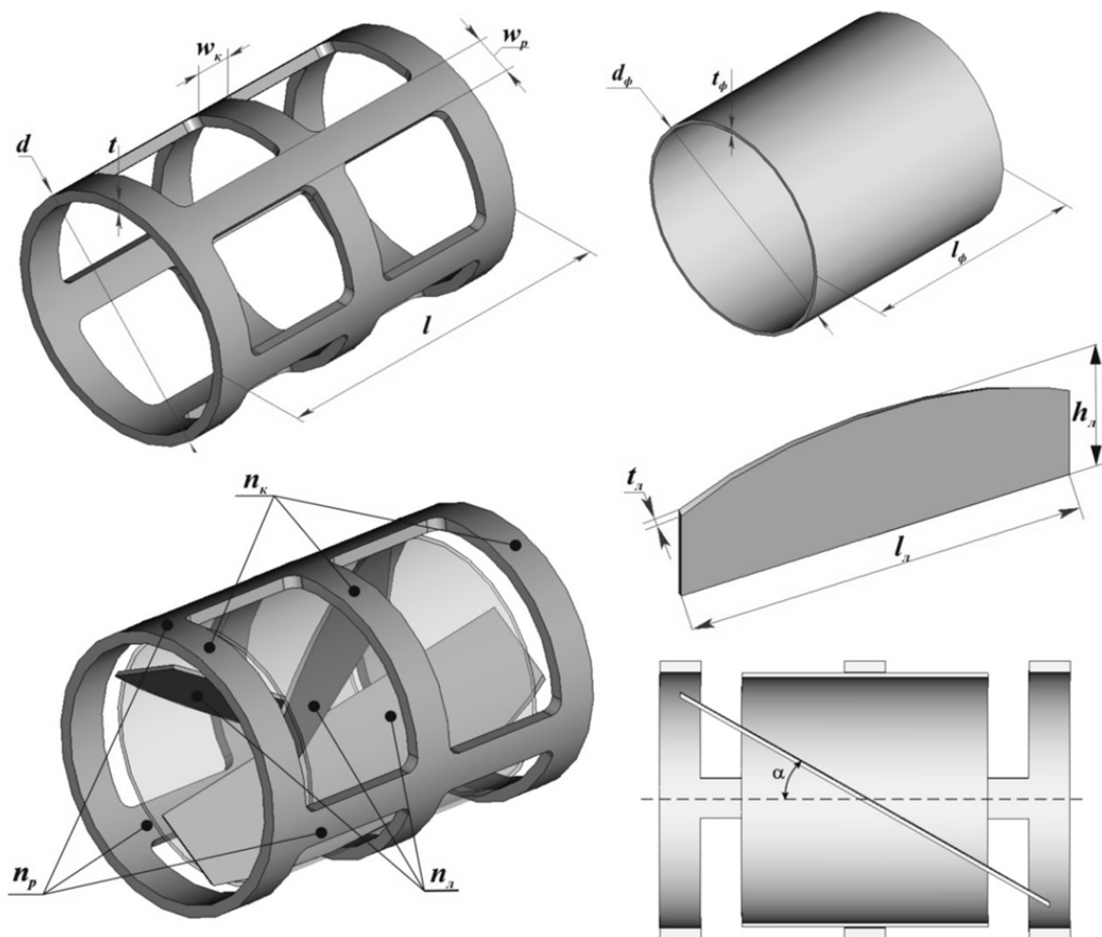


Рис. 5. К выбору проектных параметров напорного элемента СЭУ

Условия равенства и условия ограничения. Исходя из конфигурации области исследования и рекомендаций по проектированию классических ЭМП, можно ограничить диапазоны варьирования отдельных параметров. Наружный диаметр и длина напорного элемента выбираются из условий:

$$d < D_1; \quad l < l_1,$$

где D_1 , l_1 – внутренний диаметр и длина статора, выбираются по каталожным данным [11] или определяются в результате электромагнитного расчёта.

При этом целесообразно выбирать возможно максимальные значения d и l , поскольку при этом возрастает удельное использование СЭУ.

Толщина напорного элемента определяется условиями минимального гидравлического сопротивления и необходимой механической прочности:

$$0 < t \leq k_n \cdot t_{\text{доп}},$$

где k_n – коэффициент надёжности, учитывающий конструктивные особенности и технологию производства, принимаемый по общемашиностроительным методикам и составляющий 1,1...1,2 для сплошного цилиндра; $t_{\text{доп}}$ – минимальная толщина напорного элемента, получаемая с учётом пределов прочности материала и результатов механического расчёта.

Количество колец выбирается исходя из условия замыкания вторичного тока $n_k = 2$. При необходимости повышения механической прочности напорного элемента и обеспечения возможности размещения напорных лопастей n_k может быть увеличено, но это не должно приводить к ухудшению условий теплообмена при движении рабочей жидкости.

Ширина рёбер w_p и колец w_k напорного элемента выбираются по допустимой плотности тока в условиях вынужденной конвекции, с учётом механических нагрузок и по результатам гидравлического расчёта.

Количество рёбер n_p выбирается из условия

$$n_p = \frac{M_2}{(l - 2w_k)w_p t \cdot \sigma_{\text{доп}}},$$

где M_2 – вращающий момент, приложенный к напорному элементу; $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимый предел прочности материала.

Длина лопасти l_l ограничивается величиной угла установки α и внутренним диаметром ферромагнитопровода и может выбираться при проектировании из диапазона $0 < l_l \leq l_{l,\text{max}}$.

Диапазон вариации угла установки лопасти $\alpha - 0...45^\circ$.

Толщина лопасти должна выбираться в соответствии с минимальным гидравлическим сопротивлением и необходимой механической прочностью:

$$0 < t_l \leq k_n \cdot t_{\text{доп}},$$

где $t_{\text{доп}}$ – минимальная толщина лопасти, получаемая с учётом пределов прочности материала и результатов механического расчёта лопасти.

Высота лопасти ограничивается диаметром внутреннего ферромагнитопровода:

$$h_l < 0,5d_\phi.$$

Минимальное количество лопастей выбирается из условия симметрии:

$$n_l \geq 2.$$

Наружный диаметр внутреннего ферромагнитопровода должен удовлетворять условию

$$d_\phi < d - t.$$

Длина внутреннего ферромагнитопровода

$$0 < l_\phi < l - 2w_k.$$

Толщина внутреннего ферромагнитопровода, определяющая его внутренний диаметр и, соответственно, гидравлическое сопротивление проточной части, предварительно выбирается равной минимальной ширине зубца статора $t_\phi = b_z$ (см. формулу (1)).

Все перечисленные условия выбора параметров напорного элемента являются рекомендуемыми. Окончательные условия ограничения и равенства параметров напорного элемента формулируются по результатам математического моделирования и анализа процессов в СЭУ [12].

Критерии выбора параметров. Диапазон, ограничивающий выбор значений параметров, определяется совокупностью процессов, протекающих в СЭУ, а также конструктивными особенностями устройства как с точки зрения взаимосвязи размерных соотношений параметров отдельных элементов устройства, так и наиболее эффективного использования устройства в целом (технологичность конструкции, например, выбор базовых элементов СЭУ стандартных типоразмеров, материалоемкость, минимальные вибрационные характеристики, требующие условия симметрии расположения элементов и т.д.).

При моделировании процессов, протекающих в СЭУ, в качестве определяющих критериев могут быть выбраны:

- для электромагнитных процессов – допустимая плотность тока, обусловленная вторичными ЭДС, с учётом условий теплообмена с рабочей жидкостью, допустимое значение индукции в элементах магнитной цепи;
- для механических процессов – предел прочности элементов конструкции в статических и динамических режимах;
- для гидравлических процессов – минимальное гидравлическое сопротивление, создаваемое напорным элементом СЭУ;
- для тепловых процессов – обеспечение заданных значений температуры рабочей среды на выходе напорного элемента, допустимые с точки зрения термической устойчивости тепловые нагрузки элементов СЭУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы [Электронный ресурс]: моногр. / К. К. Ким, С. Н. Иванов, В. М. Кузьмин. – Электрон. текстовые данные. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 418 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85851.html>.
2. Иванов, С. Н. Электромеханические генераторы тепловой энергии [Электронный ресурс]: моногр. / С. Н. Иванов, К. К. Ким. – Электрон. текстовые данные. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2019. – 289 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/85859.html>.
3. Ким, К. К. Моделирование процессов тепло- и массообмена в теплогенераторах / К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 176 с.
4. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 352 с.
5. 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.
6. Иванов, С. Н. Преимущества применения устройств транспортирования и нагрева жидких рабочих сред в различных отраслях промышленности / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (трансэнергоком-2018): сборник науч. тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Саратов, 16-17 мая 2018 г. – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. – Саратов: СГТУ, 2018. – С. 124-130.
7. Иванов, С. Н. Моделирование комбинированного электропривода / С. Н. Иванов, К. К. Ким // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Т. 62. – № 3 (197). – С. 44-51.
8. Приходченко, О. В. Исследование процессов массо- и теплообмена в совмещённых энергетических устройствах методами визуального анализа / О. В. Приходченко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 22-29.
9. Приходченко, О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических теплогенерирующих преобразователях / О. В. Приходченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 27-37.
10. Попов, В. В. Электрические машины. Машины переменного тока / В. В. Попов, А. И. Вольдек. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.
11. Ким, К. К. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1(26). – С. 4-8.
12. Kim, K. K. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of heating electromechanical transducers / K. K. Kim, N. S. Karpova, O. V. Prichodchenko // Izvestia of St. Petersburg University of means of communication. 2013. Issue: 2(35). – P. 26-31.

Зайченко И. В., Гордин С. А., Егорова Ю. Г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭРГОНОМИЧНОСТИ

Зайченко И. В., Гордин С. А., Егорова Ю. Г.

I. V. Zaychenko, S. A. Gordin, Yu. G. Egorova

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ
С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭРГОНОМИЧНОСТИ**

**MATHEMATICAL MODELING AND CONTROLLING OF HUMAN SYSTEM EFFICIENCY
USING INTEGRATED CRITERIA FOR EVALUATING ERGONOMICS**

Зайченко Илья Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление инновационными процессами и проектами» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Mr. Ilya V. Zaychenko – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Management of Innovative Processes and Projects Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: zaychenko@inbox.ru.

Гордин Сергей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gordin@knastu.ru.

Mr. Sergey A. Gordin – PhD in Engineering, Head of Applied Mathematics and Computer Science Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gordin@knastu.ru.

Егорова Юлия Георгиевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Прикладная математика и информатика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: egorova_jg@mail.ru.

Mrs. Yulia G. Egorova – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Applied Mathematics and Computer Science Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: egorova_jg@mail.ru.

Аннотация. Статья посвящена разработке комплексного критерия оценки эргономики в человеко-машинных системах с неподдерживаемой посадкой. Проведено математическое моделирование рабочего места. Выделены характерные преимущества необеспеченных мест и их недостатки. Определены компоненты для оценки комфорта человеко-машинных систем с сидячей рабочей позой. Сформулирован интегральный критерий комплексной оценки эргономики сиденья, который одновременно учитывает распределение контактных давлений и расположение проекции центра тяжести тела на пятно контакта.

Summary. The article is devoted to the development of a comprehensive criterion for evaluating ergonomics in man-machine systems with unsupported fit. A mathematical simulation of the workplace is built. The characteristic advantages of unsecured places and their disadvantages are highlighted. The components for assessing the comfort of man-machine systems with a sitting working position are identified. An integral criterion is formulated for a comprehensive assessment of seat ergonomics, which simultaneously takes into account the distribution of contact pressures and the location of the projection of the body's center of gravity on the contact spot.

Ключевые слова: математическое моделирование, управление, человеко-машинные системы, эргономика.

Key words: mathematical modeling, control, human systems, ergonomics.

УДК 004.942

Человеко-машинные системы сегодня являются одним из наиболее активно развивающихся направлений техники и технологий. В последние годы особое внимание уделяется вопросу гармонизации пользовательских интерфейсов, переходу процесса взаимодействия оператора с ЭВМ на интуитивный уровень. Однако наряду с этим значительно меньше внимания уделяется вопросу эргономики непосредственно рабочего места [4].

При этом оператор современных человеко-машинных систем на протяжении всего рабочего дня сохраняет сидячее положение, что оказывает серьёзное негативное влияние на состояние опорно-двигательной системы. Актуальность этой проблемы подтверждается ростом в последние годы числа случаев временной нетрудоспособности населения из-за обострения различных заболеваний опорно-двигательной системы: остеохондроза, сколиоза, грыжи межпозвоночного диска и т.д. [5].

В то же время негативные последствия сидячего образа жизни можно существенно минимизировать. Сохранить правильное положение сидя помогут нужная осанка и эргономичное сиденье.

Разработка эргономичного сиденья – вопрос довольно сложный. Необходимо учитывать не только параметры сиденья и его способность адаптироваться к человеку, но и специфику движений человека. Сам факт наличия эргономичного сиденья не может гарантировать его верное функционирование. Только при принятии оператором человеко-машинной системы правильной анатомической позы эргономичное сиденье будет функционировать должным образом [6].

Очень важна стабильная поддержка в области малого таза. Йоги называют это основанием нашей позы или пятном «Н». В положении сидя мы должны опираться на бёдра и две маленькие тазовые кости в нижней части таза, называемые клубнями седалищной кости. Следовательно, если правильно опираться на клубни седалищной кости, спинка сиденья не требуется. Если же часть спины согнута, то под клубнями седалищной кости нет опоры и человек склоняется к спинке сиденья. В результате вся поза нарушается и стабильность исчезает.

При оценке эргономичности сидений очень важна разработка комплексного критерия такой оценки. [15] Человек находится в прямом контакте с сиденьем, и у каждого есть свои физиологические особенности, что усложняет задачу. В экспериментах Доули и Максвелла [9] люди оценивали удобство сидячей позы, анализируя свои субъективные ощущения, а затем превращали их в условные точки. Оценка с использованием баллов позволила испытуемым разделить это чувство на 5-7 уровней. Это субъективный (психологический) метод исследования комфорта (дискомфорта) сидячей позы. Большинство исследователей считают, что чем дольше субъект сидит на стуле, тем точнее будет его оценка. Акерблом [7] писал, что для того, чтобы говорить о комфорте (дискомфоте) сиденья, нужно сидеть на нём шесть месяцев.

Согласно работе Штробеля [14], значение давления для обеспечения максимального комфорта составляет 7-8 кПа. В других местах подушки сиденья, где тело человека находится в контакте с сиденьем, давление должно быть существенно ниже (см. рис. 1).

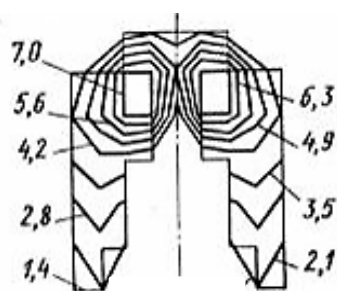


Рис. 1. Схема удовлетворительного распределения давления на подушке (кПа)

С точки зрения схемы распределения контактных давлений важную роль играет форма отклонения распределения давления от оптимального. Отклонение в какой-то области сиденья означает, что человек сидит неправильно.

Аруин и Зациорский [6] в работе по эргономике сидений обнаружили, что если человек долго сидит в неправильном положении, может произойти перекрёстное пережатие кровеносного сосуда, влияющее на кровоток в нижних конечностях. Это происходит, когда большая часть давления падает на область бёдер. Кровеносные сосуды бёдер легко зажимаются на твёрдой поверхности бедренной кости. Бедренная мышечная система не может

полностью защитить сосуды от перекрещивания.

Для оценки значений давления в зоне контакта человека с подушкой можно использовать несколько методов. Наиболее эффективен метод с использованием измерительной прокладки с интегрированными в неё датчиками давления.

Датчики подключены к компьютеру через коммутатор. Камидзе [10] описывает аналогичную систему, обеспечивающую регистрацию распределения давления при контакте человека с подушкой.

Датчики считывают положение тела человека с помощью распознавания давления, приложенного к телу в положении сидя. Существуют также методы с использованием бумаги, чувствительной к давлению. Во всех случаях между человеком и сиденьем должна быть эластичная прокладка измерительного устройства.

Многие автомобильные компании в своих исследованиях используют современное измерительное оборудование с системой сбора и обработки данных. Эта система позволяет измерять форму поверхности сиденья и строить поверхность распределения контактных давлений при посадке человека [10].

Тротт [16] выдвинул гипотезу об оптимальном распределении контактного давления на сиденье, при котором у человека нет субъективного ощущения дискомфорта. Максимальные контактные давления интерполируются с использованием следующего уравнения:

$$P_{\max pr}(x, z) = (23,19 + 62,23x + 989,10x^2 - 2446,37x^3 + 2615,74x^5 - 1640900,95x^{15}) * \\ * (5,712 + 119,874|z| - 1784,037z^2 + 8386,98|z|^3 - 98719,48|z|^5),$$

где $P_{\max pr}(x, z)$ – давление, Па; x, z – координаты точек, м.

Таким образом, Тротт составил таблицу с нормированными значениями распределения контактных давлений на подушке, рассчитанными в определённых точках.

Большое внимание было уделено изготовлению математических моделей человеко-машинных систем и отдельных элементов тела [14].

Некоторые исследования направлены на изучение положения человека на рабочем месте с целью разработки дизайна сидений. Результаты этих исследований представлены в работах Кудрявцева и Шатилова [11; 12].

Шишкин [13] в своей статье рассказывает о попытках найти объективный критерий, количественно оценивающий комфортность сиденья. Он сформулировал количественную оценку комфорта сиденья, учитывая два параметра: распределение контактного давления и форму позвоночника сидящего человека. Эти параметры подразумевают анализ сиденья и давления на спинку кресла, но сложные критерии неподдерживаемого сиденья при этом отсутствуют.

В данном исследовании предложен критерий объективной количественной оценки комфорта сидений. В его качестве принято минимальное расстояние между проекцией центра веса человека на плоскость сиденья корректора и геометрическим центром пятна контакта при условии равномерного распределения давления по его площади.

Значение уровня комфорта сиденья оценивается с помощью одновременной регистрации распределения контактного давления и расположения проекции центра тяжести на точку контакта:

$$D_{c\Sigma\sigma} = \sqrt{k_{D\Omega op} D_{cp\sigma}^2 + k_{D\Omega or} D_{cr\sigma}^2},$$

где $D_{c\Sigma\sigma}$ – значение уровня комфорта сиденья; $D_{cp\sigma}$ и $D_{cr\sigma}$ – соответствующие оценки контактных давлений и расстояния от проекции центра тяжести на сиденье до геометрического центра подушки; $k_{D\Omega op}$ и $k_{D\Omega or}$ – коэффициенты, которые следует выбирать в соответствии с важностью параметра и значениями $D_{cp\sigma}$ и $D_{cr\sigma}$.

Уравнение распределения контактного давления имеет вид

$$D_{cp\sigma}^2 = \sqrt{\frac{1}{S} \iint_{\Omega} \left[\frac{P(k_x x, k_z z)}{\bar{P}} - \frac{P_0(x, z)}{\bar{P}_0} \right]^2 ds},$$

или

$$D_{cp\sigma}^2 = \sqrt{S \int_{x_0}^{x_1} dx \int_{z_0(x)}^{z_1(x)} \left[\frac{P(k_x x, k_z z)}{F_{\Sigma}} - \frac{P_0(x, z)}{F_{0\Sigma}} \right]^2 dz},$$

где S – величина площади контактной поверхности; Ω – площадь контакта человека массой M_0 с сиденьем; $P(x, z)$ – реальное рабочее давление в точке контакта человека и сиденья с координатами (x, z) ; k_x, k_z – коэффициенты для преобразования координат x и z , необходимые для уменьшения размера человеческого тела для оцениваемого давления до размера человеческого тела, для которого берётся эталонное распределение контактного давления; \bar{P} – среднее арифметическое давление по всей поверхности контакта ($\bar{P} = F_{\Sigma}/S$); $P_0(x, z)$ – давление в точке (x, z) , принятое за оптимальное; \bar{P}_0 – среднее арифметическое по всему контактному поверхностному давлению, принятое за оптимальное ($\bar{P}_0 = F_{0\Sigma}/S$); $x_0, x_1, z_0(x), z_1(x)$ – координаты границ зоны контакта человека с массой M_0 ; F_{Σ} – общая сила, действующая на человека со стороны сиденья; $F_{0\Sigma}$ – случай оптимального распределения контактного давления.

Уравнение, представленное выше, является критерием определения дискомфорта с точки зрения распределения контактных давлений. Чем больше значение $D_{cp\sigma}^2$, тем выше дискомфорт сиденья.

Оптимальное давление $P_0(x, z)$ определяется как давление, при котором отсутствует субъективное ощущение дискомфорта, умноженное на постоянный коэффициент, поэтому сумма давлений по всей поверхности контакта равна $M_0 g$. Эта зависимость имеет вид

$$P_{0i}(x, z) = \frac{M_0 g}{\int_{x_2}^{x_1} dx \int_{z_0(x)}^{z_1(x)} P_{\max i}(x, z) dz} * P_{\max}(x, z),$$

где $P_{\max i}(x, z)$ – максимальное давление, при котором субъективное чувство дискомфорта отсутствует в i -й точке; M_0 – масса контрольного субъекта; g – ускорение свободного падения.

Зона контакта человека массой M_0 и поверхности сиденья определяется так:

$$S = \int_{x_0}^{x_1} [z_1(x) - z_0(x)] dx.$$

Расстояние между проекцией центра тяжести и геометрическим центром сиденья определяется по следующей формуле:

$$D_{cp\sigma}^2 = \frac{1}{R},$$

где R – расстояние между проекцией центра тяжести и геометрическим центром подушки.

Ещё одним препятствием на пути достижения неподдерживаемого комфорта сидений является нерациональная форма подушки сиденья. Она может привести к перекрёстному зажиму кровеносных сосудов, повышению давления, усталости на рабочем месте и нарушению физиологических процессов.

Для рационального дизайна формы подушки сиденья был разработан алгоритм [7], показанный на рис. 2.

Как видно из рис. 2, входными данными для проектирования формы сиденья являются:

- жёсткость подушки или жёсткость конструкционного материала, из которого изготовлено сиденье;
- жёсткость в зависимости от сжатия;
- параметры человека, для которого необходим дизайн рациональной формы поверхности подушки (длина бедра, длина голени, масса человека, форма в свободном состоянии и жёсткость поверхности тела человека).

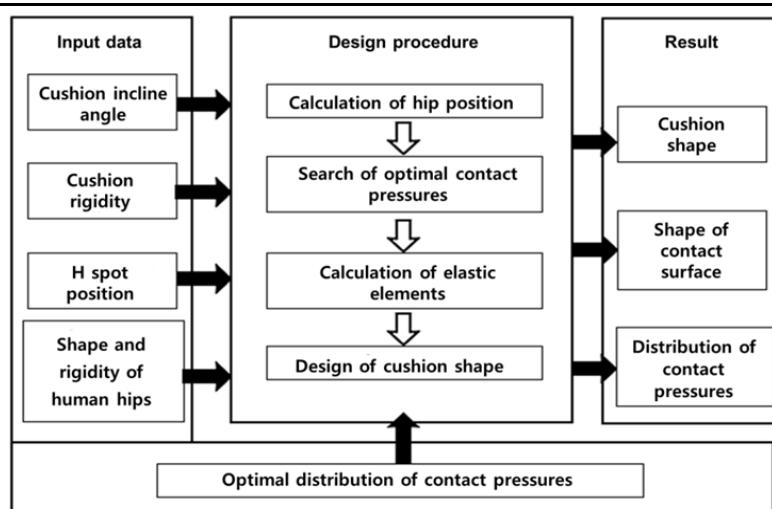


Рис. 2. Алгоритм проектирования рациональной формы подушки сиденья

Жёсткость устанавливается как функция сжатия; это оптимальное распределение контактного давления на подушке сиденья, принятое за лучшее. Этот параметр взят по умолчанию, как показано на рис. 1. Положение Н-пятна – это пятно, которое обеспечивает устойчивость человека в положении сидя.

Результатом расчёта является такая форма сиденья, при которой контактные давления для данного объекта являются оптимальными. Кроме этого, определены форма поверхности и величины контактных давлений после того, как человек сядет на сиденье с заявленной жёсткостью и рассчитанной формой. На основе этого алгоритма можно определить форму контактных подвижных поверхностей в подушке сиденья.

Таким образом, был сформулирован критерий комплексной оценки эргономики сиденья. Данный критерий учитывает не только распределение контактных давлений по всему профилю подушки, но и положение тела человека с помощью мониторинга проекции его центра тяжести. Был получен алгоритм расчёта рациональной формы подушки сиденья, позволяющий создать эргономичную поверхность сиденья. Алгоритм обеспечивает удобство сидения человека и мониторинг положения его тела в течение рабочего дня и позволяет реализовать роботизированные решения для автоматизации процесса эргономичной коррекции профиля сиденья оператора человеко-машинной системы [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аруин, А. С. Эргономическая биомеханика / А. С. Аруин, В. М. Зациорский. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
2. Белов, А. А. Художественное конструирование мебели / А. А. Белов, В. В. Янов. – М.: Ясен, 1985. – 216 с.
3. Березовский, В. А. Биофизические характеристики тканей человека / В. А. Березовский, Н. Н. Колотилов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 342 с.
4. Гончарова, С. А. Инновационные устройства для профилактики заболеваний позвоночника / С. А. Гончарова, И. В. Зайченко // Современные междисциплинарные исследования: история, настоящее, будущее. Сборник материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово: Центр научного развития «Большая книга», 2017. – С. 8-13.
5. Гончарова, С. А. Эргономика рабочего места, сиденья и её значение для оптимизации трудовой деятельности человека / С. А. Гончарова, И. В. Зайченко // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы междунар. науч.-практ. конф. / С. В. Белых (отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2017. – С. 77-78.
6. Гончарова, С. А. Оптимизация трудовой деятельности персонала предприятия, находящегося на рабочем месте в положении сидя / С. А. Гончарова, И. В. Зайченко // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сборник науч. статей по итогам второй междунар. науч. конф. – Казань: Конверт, 2019. – С. 120-122.

7. Гончарова, С. А. Алгоритм расчёта рациональной формы роботизированного сиденья и оценка комфортности / С. А. Гончарова, И. В. Зайченко // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2018. – С. 259-262.
8. Гончарова, С. А. Разработка роботизированного корректора с автоматически изменяющимся профилем для повышения качества работы сотрудников на производстве / С. А. Гончарова, И. В. Зайченко // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всерос. национальной науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2019. – С. 285-288.
9. Доули, Д. Факторный анализ как статистический метод / Д. Доули, Л. Максвелл. – М.: Мир, 1967. – 114 с.
10. Kamijo, K., Tsujimura, H., Obara, H., and Katsumata, M. Evaluation of Seating Comfort, SAE Technical Paper 820761, 1982, <https://doi.org/10.4271/820761>.
11. Кудрявцев, С. М. Комфортабельность автомобильных сидений / С. М. Кудрявцев, В. И. Шишкин, А. В. Шатилов // Проблемы проектирования, испытаний, эксплуатации и маркетинга автотранспортной техники, двигателей внутреннего сгорания, строительных и дорожных машин, транспортно-технологических комплексов и вездеходов. – Новгород: НГТУ, 2000. – 278 с.
12. Шатилов, А. В. Ортопедический комфорт сидений / А. В. Шатилов, В. И. Шишкин, С. М. Кудрявцев // Проблемы проектирования, испытаний, эксплуатации и маркетинга автотранспортной техники, двигателей внутреннего сгорания, строительных и дорожных машин, транспортно-технологических комплексов и вездеходов. – Новгород: НГТУ, 2000. – 168 с.
13. Шишкин, В. И. Критерии объективной оценки комфортности сиденья / В. И. Шишкин, М. В. Шишкин // Проблемы транспортных и технологических комплексов: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 30-летию кафедры «Строительные и дорожные машины». – Новгород: НГТУ, 2002. – С. 210-215.
14. Штробель, В. К. Современный автомобильный кузов / В. К. Штробель. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
15. Burkov A. F., Zaychenko I. V., Goncharova S. A. Development of a comprehensive criterion for evaluating the ergonomics configuration of the seat // 2019 international science and technology conference «eastconf». – Vladivostok: FEFU, 2019. DOI: 10.1109/Eastconf.2019.8725313.
16. Trott, B. Drivers seat layout / B. Trott // Automobile Engineer. – 1971. – № 5. – P. 52-53.

Дерюжкова Н. Е., Купова А. В., Соловьёв В. А.
N. E. Deryuzhkova, A. V. Kupova, V. A. Solovyov

НЕЧЁТКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

FUZZY CONTROL ALGORITHMS FOR STATIC THYRISTOR COMPENSATOR IN VARIABLE ELECTRICITY SYSTEM LOAD

Дерюжкова Нелли Егоровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mrs. Nelli E. Deryuzhkova – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Купова Анастасия Викторовна – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

Mrs. Anastasia V. Kupova – Senior Lecturer, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, St. Petersburg Electrotechnical University named after B. I. Ulianov (Lenin) (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

Соловьёв Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyov – Doctor of Engineering, Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрено использование нечётких принципов управления статическим тиристорным компенсатором. К основным задачам статического компенсатора относятся поддержание заданного уровня напряжения и компенсация реактивной мощности в точке подключения. Алгоритмы управления компенсатором могут быть расширены, если он установлен в системе электроснабжения с резко изменяющейся мощностью нагрузки. В качестве примера рассмотрена система электроснабжения дуговой сталеплавильной печи. Переключение обмоток печного трансформатора приводит к резкому изменению потребляемой печью мощности. Учёт влияния энергетических режимов позволяет повысить эффективность применения статического тиристорного компенсатора.

Summary. The article considers the use of fuzzy logic controller in the control system of static thyristor compensator. The main task of the compensator is voltage and reactive power stabilization at the connection point. If the compensator is installed in a system with variable load, the control systems algorithms can be supplemented. As an example, the system of power supply of the arc furnace is considered. Switching the windings of the furnace transformer leads to a change in the power consumption of the furnace. Taking into account the influence of energy modes can improve the efficiency of the static thyristor compensator.

Ключевые слова: статический тиристорный компенсатор, стабилизация напряжения, нечёткая логика.

Key words: static thyristor compensator, voltage stabilization, fuzzy logic.

УДК 004.896

Нелинейные и несимметричные нагрузки промышленных предприятий влияют на качество электроэнергии в распределительных сетях. Поэтому для повышения качества и надёжности электроснабжения используются устройства, позволяющие повысить пропускную способность линии

и снизить потери энергии, а также обеспечить устойчивую работу электроприёмников. Одним из таких устройств является статический тиристорный компенсатор (СТК), использование которого позволяет осуществлять быструю и непрерывную компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения [1; 2]. Многолетнее применение СТК в различных энергосистемах говорит о положительном опыте использования данного вида устройств. Тем не менее совершенствование алгоритмов управления СТК позволяет повысить эффективность использования компенсатора.

Традиционно в системах управления СТК использовались классические ПИ-законы управления. В последние годы в качестве адаптивных аналогов управления СТК появляются решения об использовании систем управления, реализующие принципы нечёткой логики. В [3; 4; 5; 6] рассмотрено применение нечётких алгоритмов в системе управления СТК для систем передачи электроэнергии на дальние расстояния. Однако алгоритмы управления СТК в таких системах будут отличаться от алгоритмов управления компенсатором, который установлен непосредственно в точке подключения нагрузки, например, как показано на рис. 1.

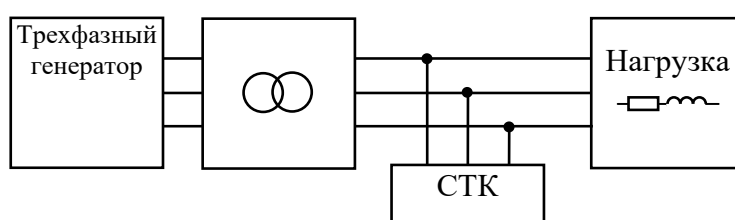


Рис. 1. Функциональная схема системы электроснабжения с СТК

Для исследования принципов работы системы управления СТК была разработана имитационная модель системы электроснабжения с установленной мощностью нагрузки до 120 МВт, нагрузка и СТК в которой подключены к линии 35 кВ. В этой модели за основу была принята модель статического тиристорного компенсатора (см. рис. 2), приведённого в [7]. СТК состоит из управляемого тиристорами реактора (TCR) и четырёх ступенчато коммутируемых ёмкостных фильтров (TSC).

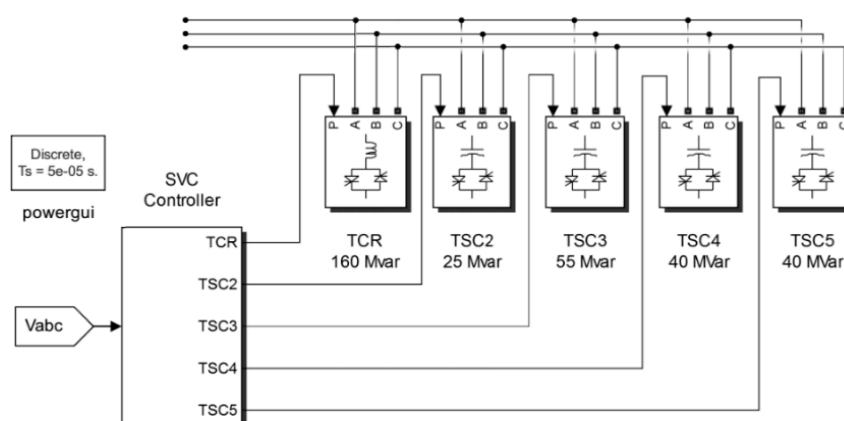


Рис. 2. Модель статического компенсатора в MatLab

На рис. 3 показана функциональная схема системы управления СТК с ПИ-регулятором. В качестве входного сигнала выбран сигнал рассогласования e заданного V_{ref} и измеренного V_{meas} напряжений в точке подключения компенсатора. На выходе регулятора формируется сигнал проводимости B , которую должен обеспечить СТК. Затем в блоке Distribution Unit определяется, на какую группу элементов должны подаваться управляющие импульсы. В зависимости от значения B должно производиться включение ёмкостных элементов. В случае превышения значения проводимости B , вырабатываемой регулятором, для точной коррекции путём введения дополнительной

индуктивной составляющей определяются углы отпирания тириستоров реактора. После этого в блоке Pulse Generator вырабатываются управляющие импульсы для тиристоров элементов TSC и TCR.

Полагаем, что и в случае использования нечётких принципов управления СТК основной задачей системы управления электроснабжением является поддержание уровня напряжения в точке подключения СТК и нагрузки. Поэтому в качестве входных лингвистических переменных для регулятора были выбраны e (отклонение напряжение от заданного значения) и de/dt (производная этого отклонения). Схема включения нечёткого регулятора в систему управления показана на рис. 4.

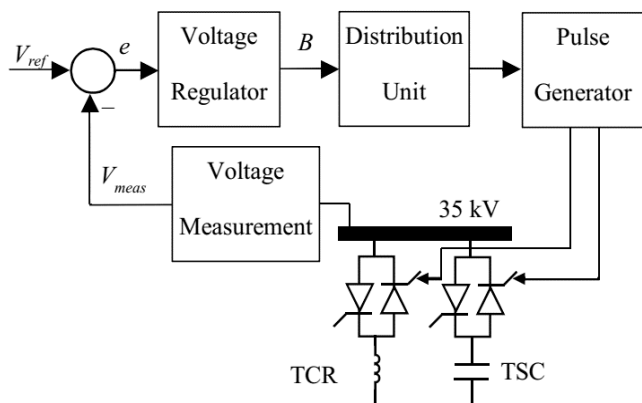


Рис. 3. Функциональная схема системы управления статического тиристорного компенсатора

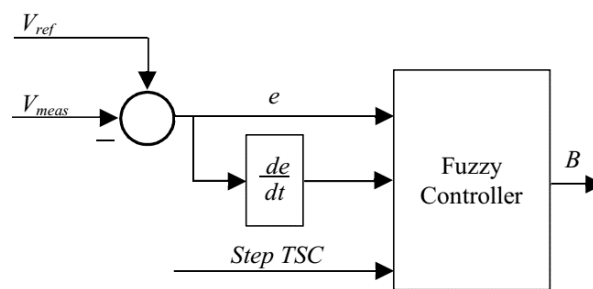


Рис. 4. Схема включения нечёткого регулятора

При условии, что заданный уровень напряжения достигнут при значении переменной B , определённой регулятором, требуется обеспечить поддержание включёнными фильтров TSC, соответствующих этому значению B . Поэтому нечёткий логический регулятор был дополнен входной переменной Step TSC.

В результате исследований на имитационной модели были получены области определения переменных e и de/dt . Переменная отклонения e в рассматриваемом диапазоне имеет пять термов: N – соответствует перерегулированию, Z – нахождению около заданного значения, PS – малому отклонению, PM – среднему отклонению и PB – большому отклонению. Термы переменной de/dt определяют скорость изменения отклонения e : N – быстро уменьшается, P – быстро увеличивается, Z – не изменяется или изменяется незначительно. Для входной переменной Step TSC термы определяются количеством включённых фильтров: Step0 – все TSC выключены, Step1 – включён TSC2, Step2 – включены TSC2 и TSC3 и т.д.

Область определения выходной лингвистической переменной B задана в относительных единицах от 0 до 1. Здесь «0» соответствует отключённому СТК, «1» – работающему на максимальной мощности. Функции принадлежности были выбраны с учётом значения ёмкостной проводимости, которую вносят соответствующие элементы TSC.

В результате настройки нечёткого регулятора для нагрузки мощностью 120 МВт, подключённой к линии 35 кВ, были определены функции принадлежности рассматриваемых лингвистических переменных, результат показан на рис. 5, правила определения выходной переменной приведены в табл. 1.

Сравнительную оценку эффективности использования нечётких алгоритмов управления проведём на основе реакции системы управления SVC на включение нагрузки. На рис. 6 приведены графики напряжения и коэффициента мощности для одного из возможных состояний нагрузки системы электроснабжения.

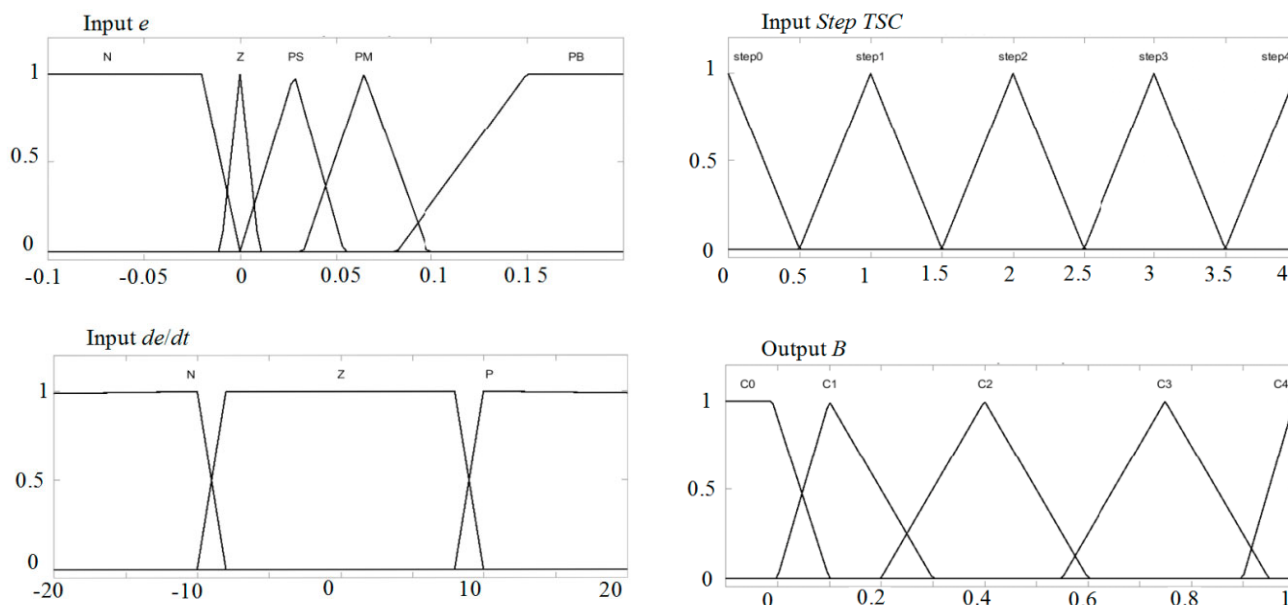


Рис. 5. Функции принадлежности входных и выходного сигналов

Таблица 1

База правил нечёткого регулятора

de/dt	e	TSC				
		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
Z	N	C0	C0	C1	C2	C3
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C2	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C4	C4	C4	C4	C4
P	N	C0	C1	C2	C3	C4
	Z	C0	C1	C2	C3	C4
	PS	C1	C1	C2	C3	C4
	PM	C1	C2	C3	C4	C4
	PB	C2	C3	C4	C4	C4
N	N	C0	C0	C0	C1	C2
	Z	C0	C0	C1	C2	C3
	PS	C0	C0	C1	C2	C3
	PM	C0	C1	C2	C3	C4
	PB	C0	C1	C2	C3	C4

Изменение нагрузки приводит к снижению уровня напряжения в системе без СТК до 0,885 о.е. Использование СТК с ПИ-законом управления [10] при данном изменении нагрузки позволяет поднять уровень напряжения до 0,97 о.е. В случае использования СТК с регулятором с нечётким принципом управления выводит напряжение к заданному уровню с перерегулированием менее чем 0,5 %. По величине коэффициента мощности $\cos \varphi$ можно оценить влияние СТК на уровень реактивной мощности в системе. В точке подключения СТК выбранная величина нагрузки снижает $\cos \varphi$ до 0,4. Применение в системе электроснабжения СТК с ПИ-законом управления позволяет поднять коэффициент мощности до 0,9, с нечётким регулятором – до 1.

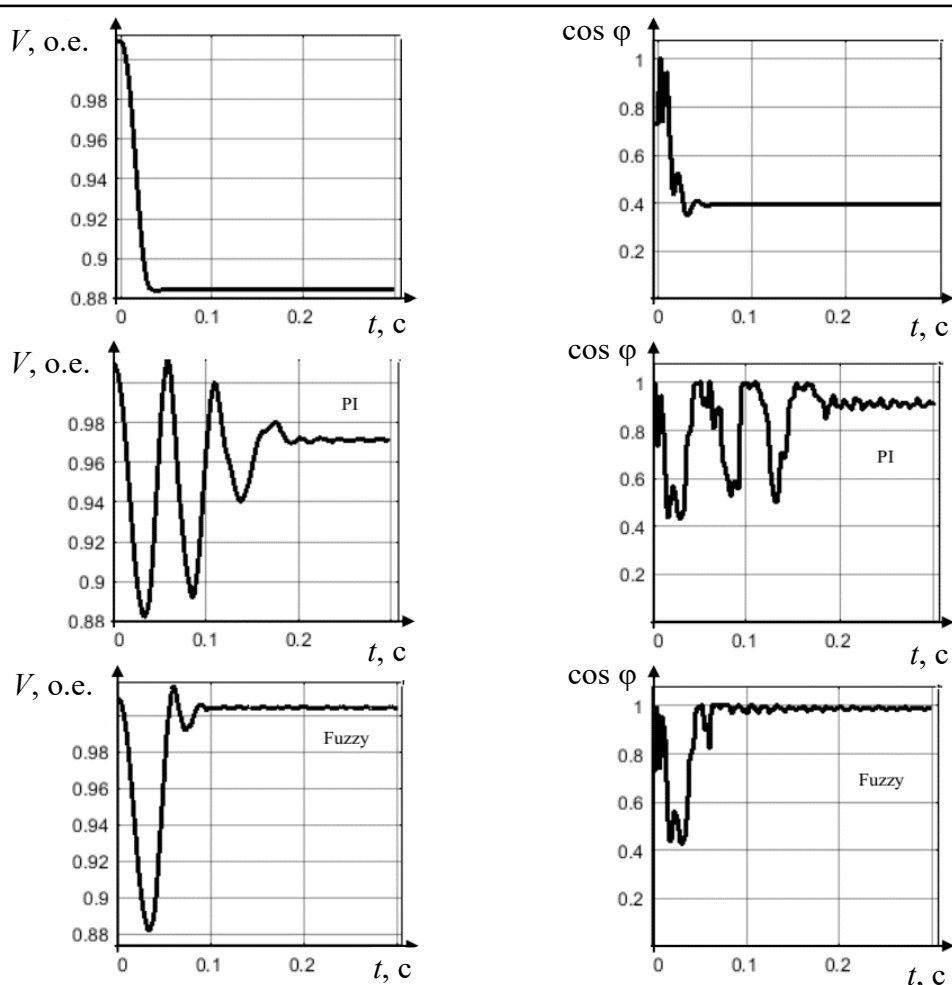


Рис. 6. Кривые изменения напряжения и коэффициента мощности

Кроме того, анализ кривых наглядно демонстрирует эффективность использования нечётких алгоритмов управления СТК с точки зрения быстродействия системы управления. Время переходного процесса в системе с нечётким регулятором почти в два раза меньше, чем в системе с ПИ-регулятором. Это преимущество оказывается существенным, если нагрузка имеет резкопеременный характер, как, например, в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи. На рис. 7 показана схема включения дуговой печи [8] как нагрузки в системе электроснабжения (см. рис. 1).

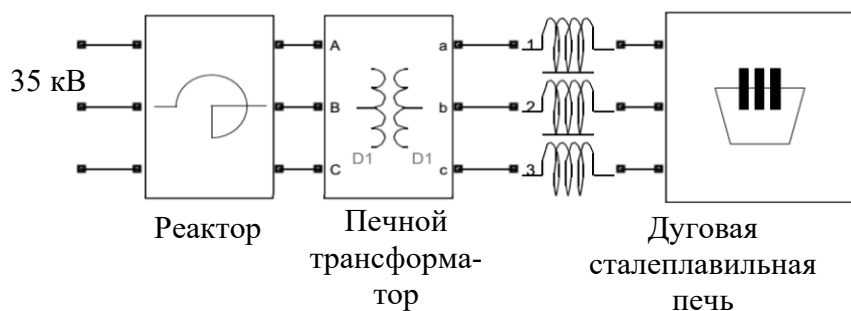


Рис. 7. Схема включения дуговой сталеплавильной печи

На стадии проплавления колодцев в шихте электрические параметры системы изменяются достаточно быстро. На рис. 8 показаны графики возможных изменений напряжения и коэффици-

ента мощности в системе электроснабжения на этапе проплавления колодцев для трёх случаев: при отсутствии в системе СТК, при использовании СТК с ПИ-законом управления, при использовании СТК с нечётким законом управления.

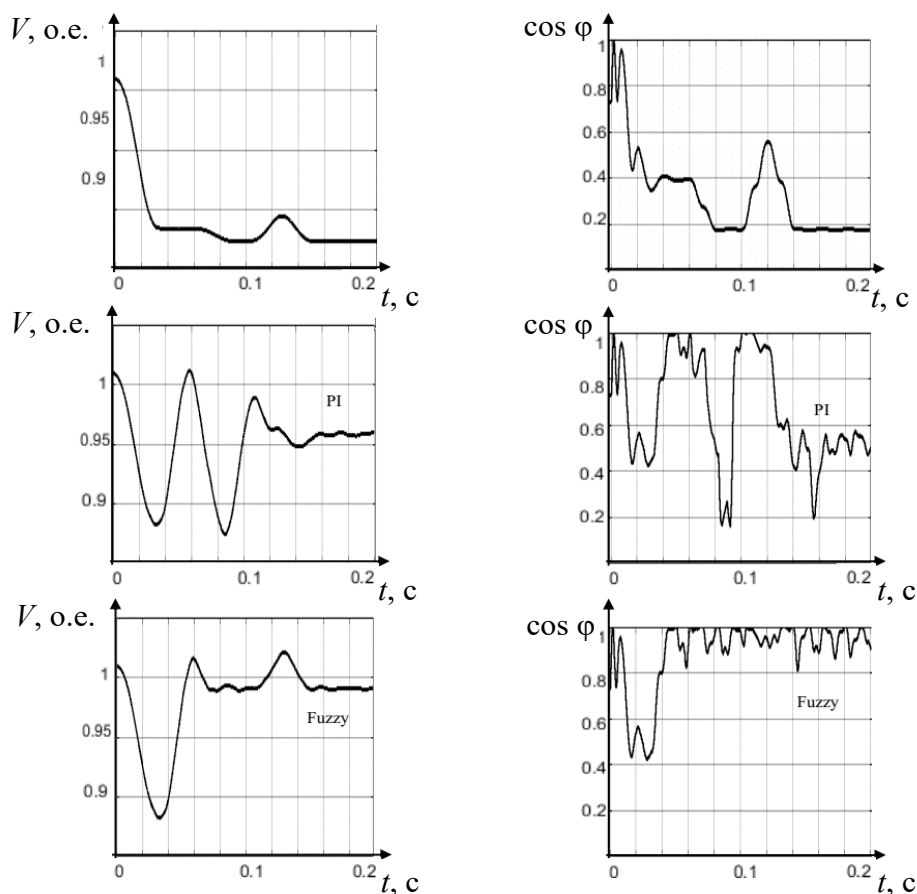


Рис. 8. Кривые изменения напряжения и коэффициента мощности в системе электроснабжения с резкопеременной нагрузкой

По результатам моделирования видно, что в системе с ПИ-регулятором переменная напряжения V , прежде чем прийти в установившиеся значение, успевает совершить несколько колебаний со значительным отклонением от заданного значения. В системах электроснабжения с резкопеременной нагрузкой это приводит к неустойчивости напряжения и невозможности скомпенсировать реактивную составляющую мощности. В сравнении с ПИ-регулятором нечёткий логический регулятор позволяет добиться лучших результатов по стабилизации напряжения и компенсации реактивной мощности.

Рассмотренные выше ситуации характерны для случайных процессов, но зачастую изменение нагрузки происходит по заданному временному графику. Например, для рассмотренного выше примера электроприёмника дуговой сталеплавильной печи, несмотря на случайный характер изменения электрических параметров, эти изменения происходят в определённых диапазонах, которые задаются режимами работы печи. Изменение режима осуществляется переключением обмоток печного трансформатора и изменением потребляемой мощности. На рис. 9 показан приблизительный график такого изменения в течение одной плавки. Включение того или иного режима происходит не случайно и известно заранее. Соответственно, возможно дополнить систему управления СТК входным сигналом, сообщаящим, что в ближайшее время произойдёт изменение потребляемой мощности.

При этом введение такого сигнала непосредственно в нечёткий регулятор нежелательно, т.к. это существенно увеличит базу правил регулятора и время вычислений. Целесообразнее воспользоваться коррекцией одной из уже имеющихся входных переменных. Лучше всего для этого подходит переменная de/dt , которая показывает скорость изменения отклонения напряжения, т.к. при переключении режимов печи происходит быстрое изменение нагрузки и, соответственно, быстро изменяется уровень напряжения. Так как время переключения режимов печи известно предварительно, то в систему управления СТК должен поступать упреждающий сигнал (см. рис. 10), который позволит вывести переменную de/dt в области быстрых изменений (термы N и P) до того, как эти изменения наступят.

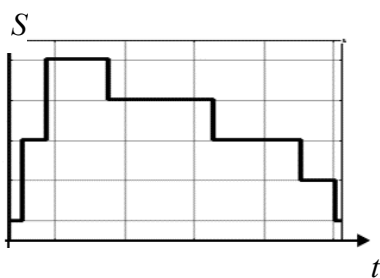


Рис. 9. График нагрузки дуговой сталеплавильной печи

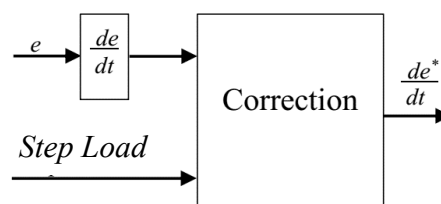


Рис. 10. Коррекция сигнала производной отклонения, учитывающая изменение режима нагрузки

На рис. 11 показаны графики изменения уровня напряжения в момент переключения мощности. Оба сигнала наблюдаются в системах управления с нечётким регулятором. Введение на нечёткий регулятор упреждающего сигнала переключения режима приводит к существенно меньшему отклонению напряжения от заданного значения.

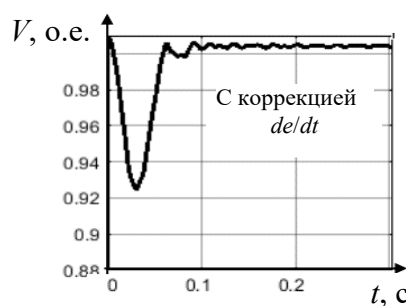
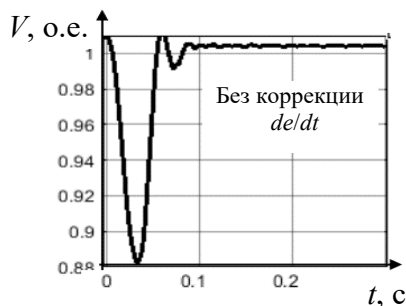


Рис. 11. Влияние упреждающего сигнала на работу нечёткого регулятора

Аналогичные результаты могут быть трансформированы и на другие виды нагрузки. Например, технологические режимы работы прокатных станов также представляют собой переменную циклическую нагрузку, которая зависит от программы прокатки [9]. Более того, к резкопеременной нагрузке можно отнести работу группы электроприёмников, которые включаются и отключаются в разное время. В общем графике нагрузки это также отразится как изменение режима потребления мощности. Если эти электроприёмники являются особо чувствительными к изменению параметров сети, то использование упреждающих сигналов коррекции (возможно задаваемых оператором) для СТК окажется весьма полезным, т.к. это позволит снизить просадки напряжения в системе электроснабжения.



ЛИТЕРАТУРА

1. Hingorani, N. G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / N. G. Hingorani, L. Gyugyi. – New York: Wiley-IEEE Press, 2000. – 428 p.
2. Reactive Power Compensator Technologies: State-of-the-Art-Review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodrigues, R. Domke // Proceeding of the IEEE. – 2005. – № 93(12). – P. 2144-2164.
3. Rahim, A. H. M. A. Power system damping control through fuzzy static VAR compensator design including crisp optimum theory / A. H. M. A. Rahim, H. M. Al-Maghraby, E. P. Nowicki // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2001. – [S. l.], V. 11, N. 3/4. – P. 185-194.
4. Abusorrah, A. M. Optimal Power Flow Using Adaptive Fuzzy Logic Controllers [Электронный ресурс] / A. M. Abusorrah // Mathematical Problems in Engineering. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/975170/> (дата обращения: 17.03.2019).
5. Nangrania, S. P. Chaos driven instability control using interval type-2 fuzzy logic controller for better performance / S. P. Nangrania, A. R. Singha, A. Chandanb // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2018. – [S. l.], V. 34, N. 3. – P. 1491-1501.
6. Karpagam, N. Improved fuzzy logic controller for SVC in power system damping using global signals / N. Karpagam, D. Devaraj, P. Subbaraj // Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 91. Issue 7, March. – P. 395-404.
7. Giroux, P. SVC (Detailed Model) Mathworks USA [Электронный ресурс] / P. Giroux, G. Sybille, 1994-2017. URL: http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model (дата обращения: 18.08.2017).
8. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
9. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
10. Стельмашук, С. В. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование / С. В. Стельмашук, А. Ю. Чернов // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 256-265.

Дмитриева Т. Л., Уламбаяр Х.

T. L. Dmitrieva, Kh. Ulambayar

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ УСЛОВНО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

DEVELOPMENT AND TESTING OF EFFICIENT ALGORITHM FOR NUMERICAL SOLUTION OF CONVENTIONALLY EXTREMUM PROBLEMS

Дмитриева Татьяна Львовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и сопротивления материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: dmitrievat@list.ru.

Ms. Tatiana L. Dmitrieva – Doctor of Engineering, Professor, Mechanics and Strength of Materials Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83. E-mail: dmitrievat@list.ru.

Хухуудэй Уламбаяр – аспирант кафедры автоматизированных систем Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: Ulambayar_kh@yahoo.com.

Mr. Khukhuudei Ulambayar – Post-Graduate Student, Automated Systems Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 664074, Irkutsk, Lermontov street, 83. E-mail: Ulambayar_kh@yahoo.com.

Аннотация. Предложены алгоритмы решения условно-экстремальной задачи на основе сведения её к задаче на безусловный экстремум, которая в свою очередь исследуется с применением модифицированных функций Лагранжа. Достоинством такого подхода является высокая скорость сходимости, которая в значительной степени компенсирует вычислительные усложнения на каждой итерации. Для иллюстрации алгоритмов исследованы тестовый математический пример, а также пример оптимизации пятистержневой фермы. Решения представлены в универсальном математическом пакете MathCAD. Исследовано влияние некоторых параметров, входящих в модифицированные функции Лагранжа, на сходимость алгоритма. Предложенная методика может быть использована в алгоритмах проекторночного расчёта конструкций, где критерий оптимальности определён как расход материала, а заданные конструктивные требования представлены в виде функций ограничений.

Summary. Algorithms are proposed for solving a conventionally-extremum problem based on reducing it to an unconstrained extremum problem, which, in turn, is studied using an augmented Lagrangian function. The advantage of this approach is the high convergence rate, which largely compensates for the computational complications at each iteration. To illustrate the algorithms, test mathematical examples are investigated. The solutions are presented in the universal mathematical package MathCAD. The influence of some parameters included in an augmented Lagrangian functions on the convergence of the algorithm is investigated. The proposed technique can be used in the algorithms of design and structural analysis, where the optimality criterion is defined as material consumption, and the given design requirements are presented in the form of constraint functions.

Ключевые слова: алгоритм, безусловная минимизация, нелинейное программирование, модифицированная функция Лагранжа.

Key words: algorithm, unconstrained minimization, nonlinear programming, augmented Lagrangian function.

УДК 519.85

Введение

Одной из наиболее известных постановок условно-экстремальных задач является их формулировка в виде задачи нелинейного программирования (НЛП). Существует множество исследований по сравнительному анализу различных вычислительных подходов к решению задач этого вида и выбору наиболее надёжных алгоритмов.

Сейчас ясно, что ни один из этих алгоритмов не может быть одинаково эффективен и представлен как универсальный для задач НЛП, относящихся к различным областям науки и техники. Поэтому проблема поиска алгоритмов, имеющих устойчивую сходимость для того или иного класса задач, является до сих пор актуальной.

Теоретическим исследованиям задач НЛП и алгоритмам их решения посвящены обширные статьи открытого доступа [1-6].

Достаточно популярными среди них являются алгоритмы, использующие методы множителей Лагранжа как наиболее математически обоснованные и полно описывающие физические и геометрические параметры прикладных задач, которые формализуются в виде НЛП. Для улучшения свойства прямой и двойственной задачи, формулируемой с помощью функций Лагранжа,

были предложены различные её модификации.

Теория модифицированных функций Лагранжа (МФЛ) возникла из стремления преодолеть недостатки классической схемы Лагранжа.

Термин «МФЛ» впервые был введён в [7], где на основе простейшей квадратичной модификации функции Лагранжа был построен непрерывный аналог седлового градиентного метода для решения задачи НЛП с ограничениями в форме равенств. Интерес к МФЛ возрос после появления работ [8; 9], где с помощью той же функции был разработан итерационный метод, доказавший свою эффективность [10].

Исследования в этой области за последние годы приведены в [11-15].

В данной работе введены две модифицированные функции Лагранжа, каждая из которых используется для отыскания экстремумов отдельно для прямой и двойственной задачи.

Целями статьи являются иллюстрация эффективности предложенных авторами численных алгоритмов решения условно-экстремальных задач на примерах и сравнение результатов расчёта при помощи двух предложенных алгоритмов.

Сформулированная цель предполагает решение следующих задач:

- исследование свойств двух предложенных модифицированных функций Лагранжа;
- представление численных алгоритмов на основе этих функций;
- тестирование сходимости алгоритмов.

Постановка задачи и необходимые определения

Задача условной минимизации в форме НЛП сводится к отысканию наименьшего значения некоторой функции цели, а также выполнению ряда условий в форме равенств и неравенств с заданной степенью погрешности.

Приведём общую формулировку этой задачи:
найти

$$\min f(x), \quad x \in E^{nx}, \quad (1)$$

при ограничениях:

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, nx, \quad (3)$$

где $f(x)$ – целевая функция, зависящая от искоемых (варьируемых) параметров x ; $\{X\}$ – вектор этих параметров на интервале $\{x^L\}$ – $\{x^U\}$ размерностью nx ; m – множество заданных функций ограничений $g(x)$.

Для построения алгоритма решения этой задачи введём две модифицированные функции Лагранжа F_P и F_M :

$$F_P = k_f F_L + 0,5 \{g\}^T [\delta] \{g\} + 0,5 k_f \{Y\}^T ([\delta] - [I]) \{\Delta Z\}, \quad (4)$$

$$F_M = k_f F_L (1 - \tau) - 0,5 \tau \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\}^T \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\}, \quad (5)$$

которые включают стандартную функцию Лагранжа F_L :

$$F_L = f(x) + \{Y\}^T [\delta] \{g\}. \quad (6)$$

В выражениях (4)-(6) $\{Y\}$ – вектор множителей Лагранжа; $[I]$ – единичная матрица; k_f – множитель нормировки целевой функции; ΔZ_j – величина сдвига j -го ограничения в допустимую область; τ – константа, введённая для повышения устойчивости вычислений; $[\delta]$ – диагональная матрица булевых переменных, элементы которой определяются из условия:

$$\text{если } g_j + \Delta Z_j > 0, \text{ то } \delta_{jj} = 1, \text{ иначе } \delta_{jj} = 0.$$

Диагональная матрица штрафных коэффициентов $[k]$ связана с двойственными переменными задачи (или множителями Лагранжа) y_j следующим образом:

$$k_{jj} = \frac{k_f y_j}{\Delta Z_{\max}} + k_{\min}, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где ΔZ_{\max} , k_{\min} – заданные параметры, регулирующие сходимость.

Запишем выражение для определения величины сдвига ограничений:

$$\Delta Z_j = \frac{k_f y_j}{k_{jj}}. \quad (7)$$

Рассмотрим свойства функций (4), (5). Функция F_P включает функцию Лагранжа и штраф за нарушение ограничений. С другой стороны, функция F_P представляет собой сумму целевой функции и функции подвижного внешнего штрафа, сдвинутого на величину ΔZ в допустимую область.

Последнее слагаемое $0,5k_f \{Y\}^T ([\delta] - [I]) \{\Delta Z\}$ введено для того, чтобы F_P совпадала с целевой функцией $f(x)$, в случае если активные ограничения выполняются со знаком равенства.

В силу соотношения (7) выполняются следующие равенства:

$$0,5\Delta f = 0,5k_f' \{Y\}^T [\delta] \{\Delta Z'\} = 0,5k_f' [\delta] \{\Delta Z'\} [k'] = 0,5k_f' \{Y\}^T [\delta] \{g\}.$$

Приведём графическую интерпретацию функции F_P (см. рис. 1).

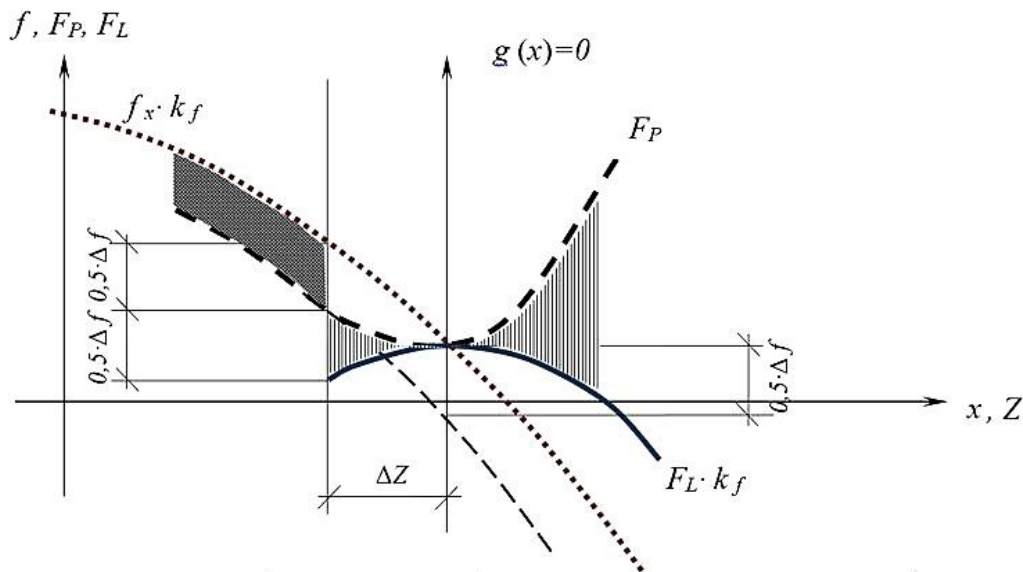


Рис. 1. Модифицированная функция Лагранжа F_P при $m = 1$

График демонстрирует, что функция F_P является непрерывной и выпуклой для тех случаев, когда функция Лагранжа F_L невыпуклая.

Кривизна F_P регулируется коэффициентами k_f и k_{jj} .

Функция F_M представляет собой сумму функции Лагранжа и штрафа за невыполнение условий стационарности в точке $\{X^t\}$.

Обозначим решение задачи (1)-(3) как $\{X^*, Y^*\}$, тогда справедливо соотношение

$$\frac{1}{k_f^t} F_M(x^*, y) \leq F_L(x^*, y^*) \leq \frac{1}{k_f^t} F_P(x, y^*).$$

Знак равенства в этом выражении возможен только при $X = X^*, Y = Y^*$, т.к. штрафные добавки при этом обращаются в ноль.

Рассмотрим итерационные алгоритмы, использующие функцию Лагранжа, а также её модификации, которые включают в себя поочередно две основные процедуры:

- определение вектора прямых переменных $\{X^{t+1}\}$;
- определение вектора двойственных переменных $\{Y^{t+1}\}$.

Итерационный процесс завершается по условию сходимости

$$|X^{t+1} - X^t| \leq \varepsilon_x |X^t|, \quad |\bar{g}| \leq \varepsilon_g \quad (8)$$

либо при превышении заданного предельного числа итераций nt_lim .

В выражении (8) $|\bar{g}|$ – множество потенциально активных ограничений; $\varepsilon_x, \varepsilon_g$ – заданная погрешность вычислений; t – номер итерации.

Прямой алгоритм решения задачи НЛП

Рассмотрим итерационный алгоритм решения задачи (1)-(3), который оперирует с функцией $F_P(x, y)$. Этот алгоритм исследован в [16]. При сравнительном анализе с другим алгоритмом обозначим его как «прямой», поскольку поиск экстремума на итерации t здесь производится только по прямым переменным $\{X\}$:

$$\begin{aligned} \{X^{t+1}\} &\in \text{Arg min } F_P(X^t, Y^t) \\ \{X^L\} &\leq \{X\} \leq \{X^U\} \end{aligned} \quad (9)$$

а двойственные находятся по выражению, полученному из сравнения условий стационарности по x функции Лагранжа и функции F_P :

$$y_j^{t+1} = \max \left(y_j^t + \frac{k_{jj}^t}{k_f^t} g(x^{t+1}) \right), \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Комбинированный метод решения условно-экстремальных задач

Рассмотрим алгоритм решения задачи (1)-(3) с использованием двух модифицированных функций Лагранжа (4), (5). Этот алгоритм более эффективен с вычислительной точки зрения, если известно хорошее начальное приближение по переменным x и нет рекомендаций по назначению двойственных переменных.

Для нахождения вектора $\{X^{t+1}\}$ также минимизируем функцию F_P по x по выражению (9).

Двойственные переменные Y определяем непосредственно через прямые путём максимизации функции F_M :

$$\begin{aligned} \{Y^{t+1}\} &\in \text{Arg max } F_M(X^t, Y^t) \\ Y &\in E^m \end{aligned} \quad (10)$$

Получим выражение (10) в явном виде. Для этого в функцию F_M (5) подставим выражение функции Лагранжа F_L :

$$F_M = k_f F_L (1 - \tau) - 0,5\tau \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\}^T \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\} = k_f (1 - \tau) \left(f(x) + \{g(x)\}^T [\delta] \{Y\} \right) - 0,5\tau \left[\left(\left\{ \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right\} + \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right] [\delta] \{Y\} \right)^T \left(\left\{ \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right\} + \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right] [\delta] \{Y\} \right) \right]. \quad (11)$$

Для максимизации функции F_M по y продифференцируем уравнение (11) по этой переменной и приравняем результат нулю:

$$\left\{ \frac{\partial F_M}{\partial y} \right\} = k_f (1 - \tau) [\delta] \{g(x)\} - 0,5\tau \left[\left(2[\delta] \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right]^T \left\{ \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right\} + 2[\delta] \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right]^T \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right] [\delta] \{Y\} \right) \right] = 0.$$

Раскроем скобки и выполним упрощение:

$$\left\{ \frac{\partial F_M}{\partial y} \right\} = k_f (1 - \tau) [\delta] \{g(x)\} - \tau [\delta] \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right]^T \left\{ \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right\} - \tau [\delta] \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right]^T \left[\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right] [\delta] \{Y\} = 0.$$

Поскольку функция F_M квадратична, это выражение приводим к симметричной системе линейных алгебраических уравнений относительно Y :

$$[W] \{\bar{Y}\} = \{P\}, \quad (12)$$

где $[W]$ – матрица, размерность которой определяется числом активных ограничений ($m^* \times m^*$); $\{\bar{Y}\}$ – редуцированный до размерности m^* вектор двойственных переменных.

Каждый элемент матрицы $[W]$ определяется произведением векторов:

$$W_{ij} = \left\{ \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial \bar{g}_j}{\partial x} \right\}.$$

Знак надчерка указывает на то, что производные берутся только по активным ограничениям. Размерность матрицы $\left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial x} \right] = n \times m^*$.

Элемент i вектора P формируется по выражению

$$P_i = -k_f \left\{ \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial x} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} \right\} + \frac{(1 - \tau)}{\tau} g_i.$$

Векторы $\left\{ \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial x} \right\}, \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} \right\}$ имеют размерность nx , где nx – число варьируемых параметров, которые принадлежат допустимой области.

Значения x , вышедшие на границы допустимой области, считаются фиксированными.

Из уравнения (12) находим редуцированный вектор двойственных переменных:

$$\{\bar{Y}^{i+1}\} = [W]^{-1} \{P\}.$$

Отметим, что трудоёмкость комбинированного алгоритма определяется также трудоёмкостью решения вспомогательной задачи (9).

Отличительная особенность алгоритма состоит в том, что при решении этой задачи не выдвигается требование к погрешности результата, т.е. точность вычисления прямых переменных $\{X^{t+1}\}$ может не соответствовать точности вычислений двойственных переменных $\{Y^{t+1}\}$.

В целом для решения задачи (9) целесообразно использовать любые известные методы безусловной минимизации [17].

Решение тестовой задачи

При оценке алгоритма нельзя пренебрегать влиянием размерности и структуры задачи на степень его надёжности [18]. Некоторые алгоритмы достаточно эффективны, если число переменных задачи невелико, а ограничения близки к нелинейным и оказываются неработоспособными в других случаях.

Для иллюстрации описанных выше алгоритмов приведём решение тестовой задачи прямым и комбинированным методом.

Решение задачи произведём в математическом пакете MathCAD.

Пример 1. Требуется определить вектор $\{X\}$ из условия

$$\min f(x) = (X_1 - 2)^2 + (X_2 - 1)^2,$$

при ограничениях

$$g_1 = X_1^2 - X_2,$$

$$g_2 = X_1 + X_2 - 2.$$

Число варьируемых переменных $n_x = 2$, а число ограничений $m = 2$; it – число итерации, шаг равен 1.

Параметры алгоритма оптимизации приняты следующие:

- минимальное значение коэффициента штрафа (k_{\min}) – 20;
- максимальное значение сдвига (ΔZ_{\max}) – 0,3;
- коэффициент нормировки целевой функции (k_f) – 20;
- коэффициент нормировки функций ограничений (k_g) – 1.

Для численного решения были применены 2 итерационных алгоритма МФЛ – прямой и комбинированный.

Листинги программ приведены на рис. 2 – 6: прямой метод – на рис. 2 – 3, комбинированный метод – на рис. 3 – 5.

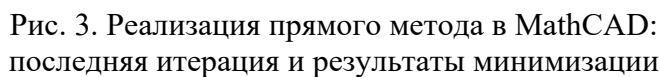
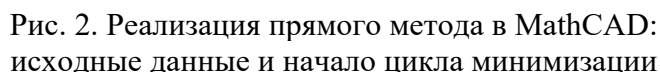
Алгоритм решения условно-экстремальных задач НЛП комбинированным методом показан на рис. 7.

Результаты сравнительных расчётов по двум методам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные результаты расчётов

Наименование	Точное решение	Численные решения	
		Прямой метод	Комбинированный метод
Число итераций	-	6	4
Значение целевой функции	$f(x) = 1$	$f(x) = 0,99833$	$f(x) = 1,00001$
Активные ограничения	-	$g_1 = -7,2 \cdot 10^{-6}$ $g_2 = 2,52 \cdot 10^{-3}$	$g_1 = -9,79 \cdot 10^{-6}$ $g_2 = -9,78 \cdot 10^{-6}$
X_1	1	1,00084	0,99999
X_2	1	1,00168	1



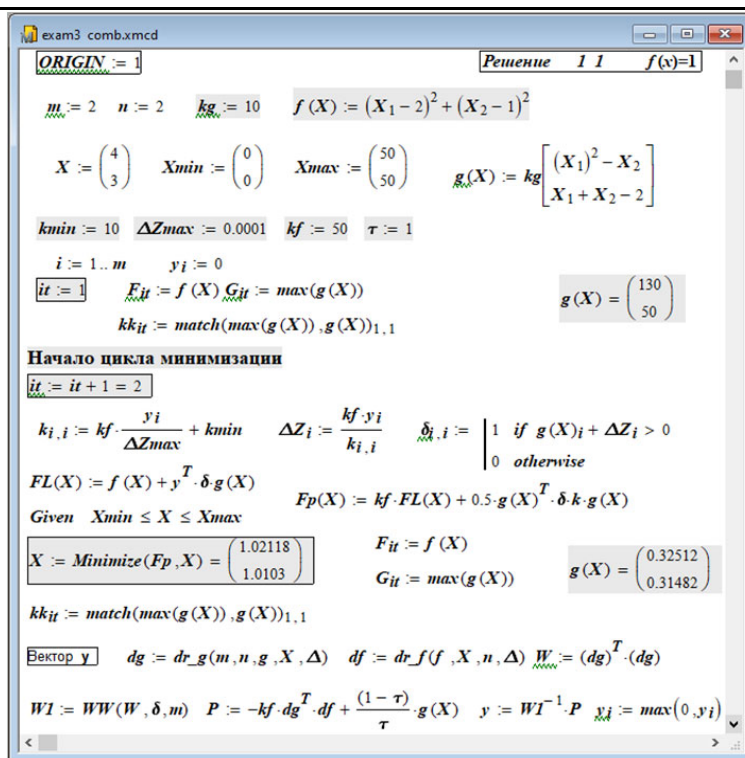


Рис. 4. Реализация комбинированного метода в MathCAD: исходные данные и начало цикла минимизации

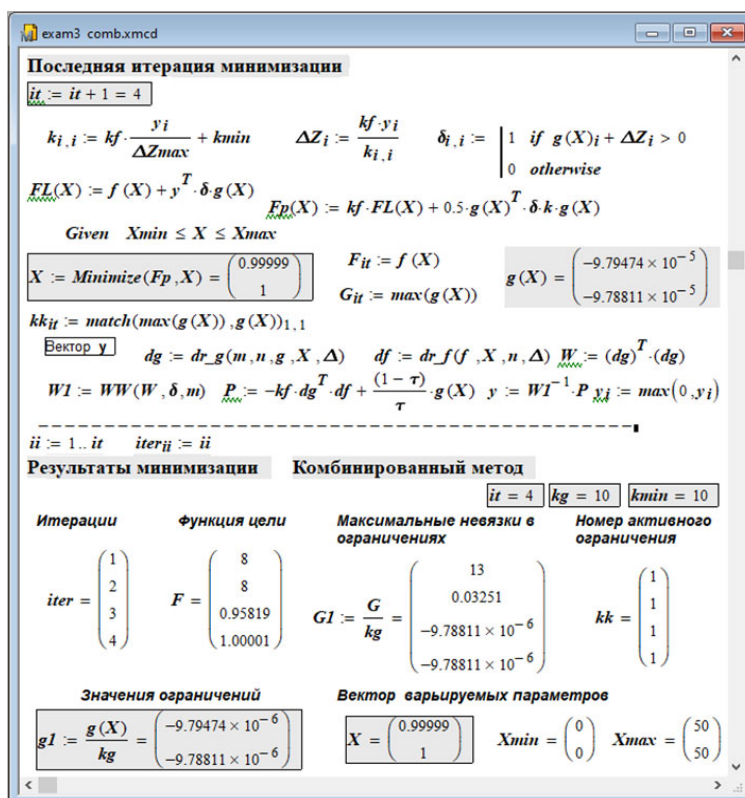


Рис. 5. Реализация комбинированного метода в MathCAD: последняя итерация и результаты минимизации

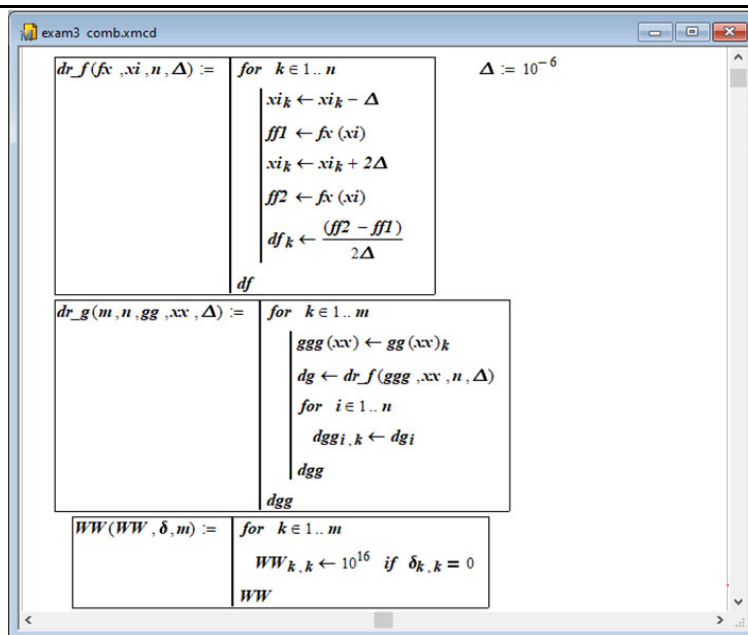


Рис. 6. Подпрограммы, используемые в алгоритме

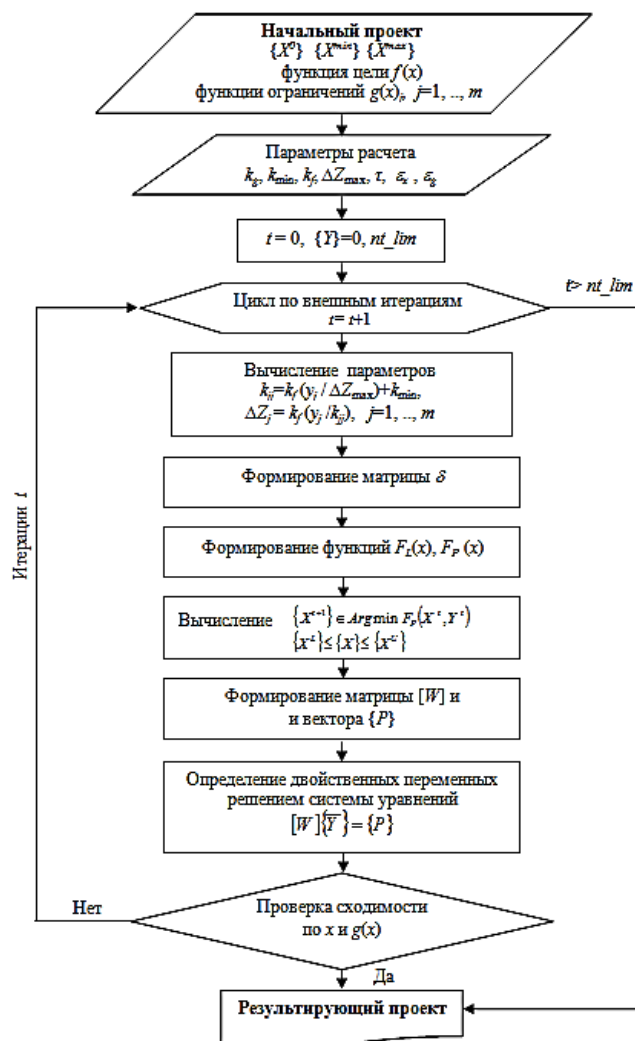


Рис. 7. Блок-схема алгоритма решения условно-экстремальной задачи комбинированным методом

Пример 2. Для верификации разработанного алгоритма рассмотрим задачу оптимизации статически определимой пятистержневой фермы (см. рис. 8), нагруженной в среднем узле нижнего пояса сосредоточенной силой P .

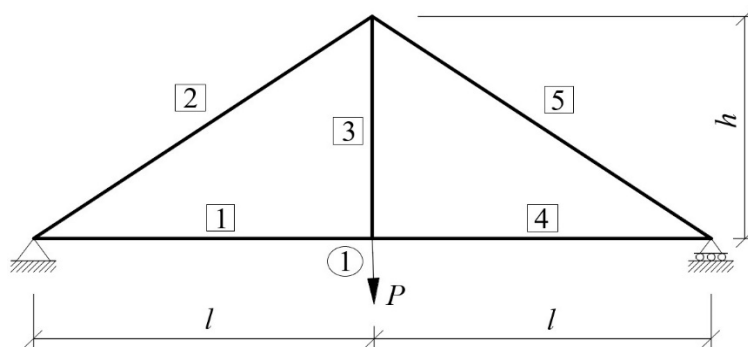


Рис. 8. Расчётная схема фермы

Требуется подобрать площадь поперечного сечения элементов из условия минимума объёма конструкции. Ограничения накладываются на прочность в элементах фермы, а также на вертикальное перемещение узла 1.

Исходные данные: $l = 6$ м; $h = 4$ м; $P = 240$ кН. Приняты следующие физические характеристики: модуль упругости $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; расчётное сопротивление $R_y = 230$ МПа.

Алгоритм расчёта в среде MathCAD, а также результаты расчёта приведены на рис. 9–15: прямой метод – на рис. 10 – 12, комбинированный метод – на рис. 13 – 15.

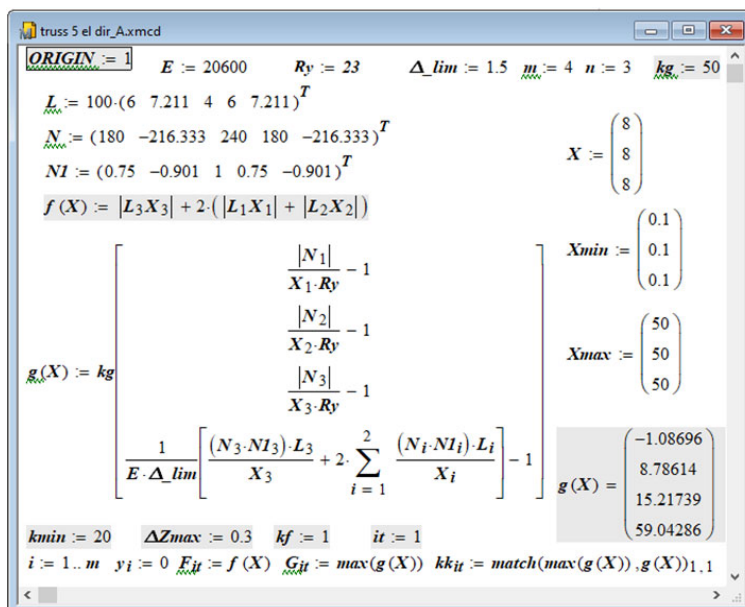


Рис. 9. Исходные данные задачи в MathCAD

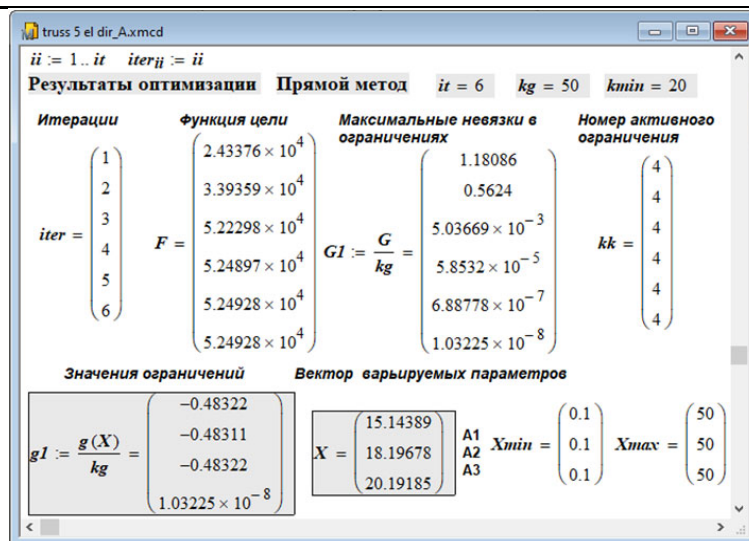


Рис. 10. Реализация прямого метода в MathCAD: результаты оптимизации

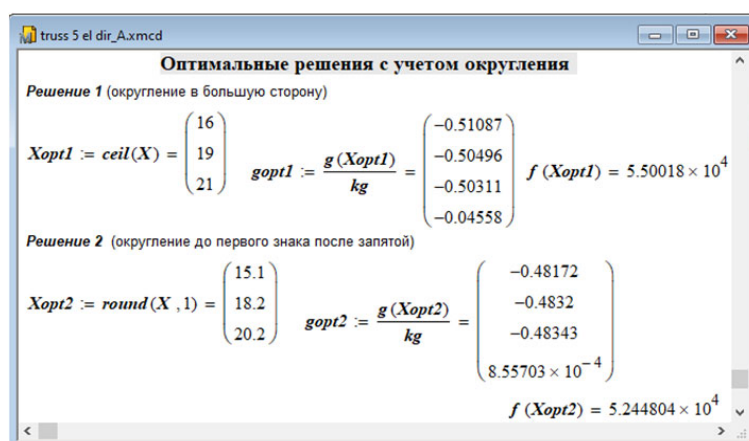


Рис. 11. Реализация прямого метода в MathCAD: оптимальные решения с учётом округления

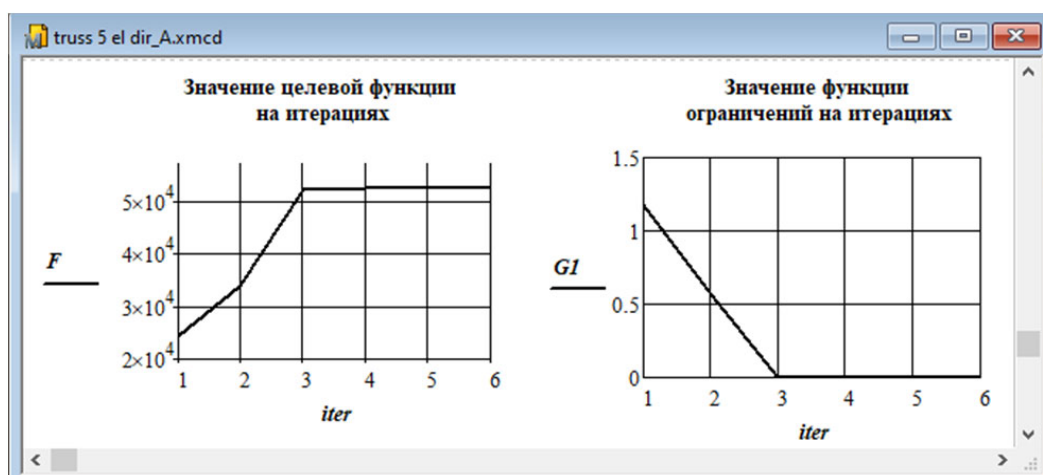


Рис. 12. Графики целевой функции и значения функции ограничений на всех итерациях

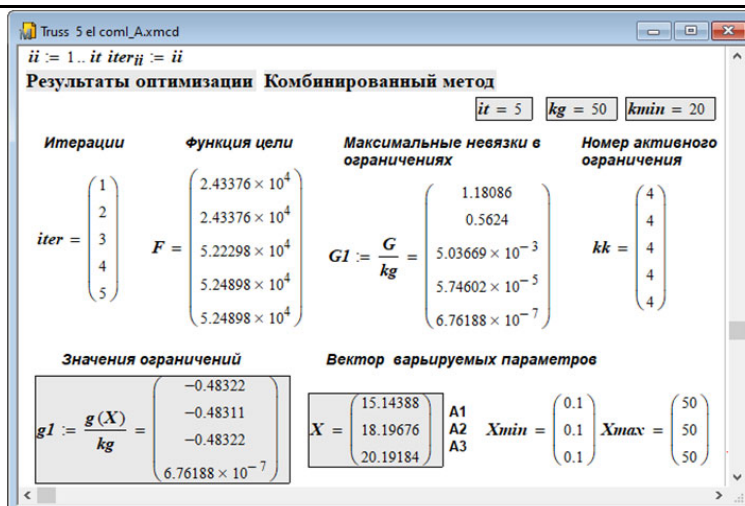


Рис. 13. Реализация комбинированного метода в MathCAD: результаты оптимизации

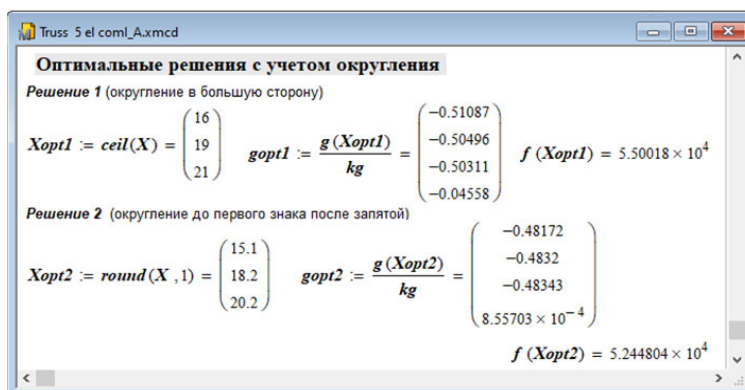


Рис. 14. Реализация комбинированного метода в MathCAD: оптимальные решения с учётом округления

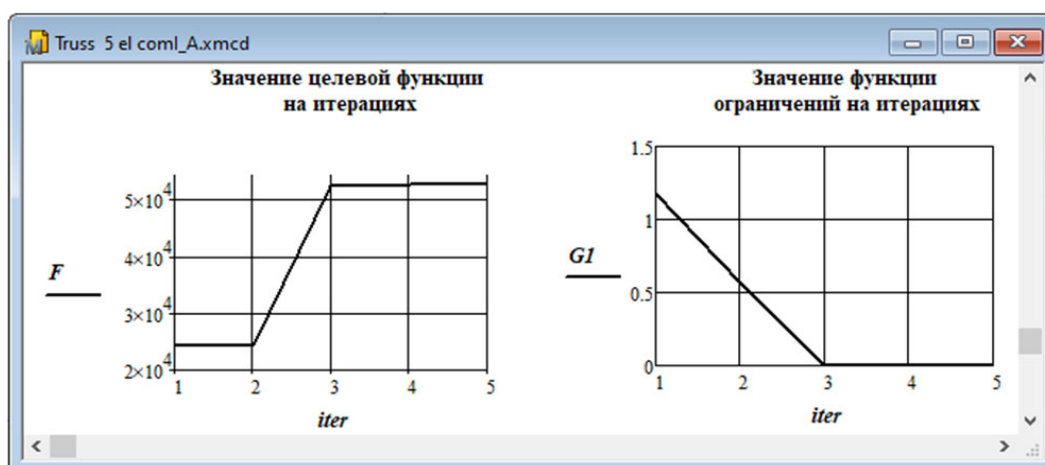


Рис. 15. Графики целевой функции и значения функции ограничений на всех итерациях

Исследование сходимости алгоритма

Модифицированные функции Лагранжа (4), (5) содержат некоторые параметры, влияющие на сходимость алгоритма.

Как уже указывалось, штрафные коэффициенты k_{ij} , k_f регулируют кривизну функции F_P , а k_g является коэффициентом нормировки функций ограничений.

Результаты проведённого анализа выявили серьёзную чувствительность скорости сходимости алгоритмов к вышеуказанным параметрам. При определённых их значениях сходимость отсутствует либо может приводить к различным локальным экстремумам.

Руководствуясь опытом решения примеров, можно связать влияние этих параметров на структуру модифицированных функций Лагранжа и прежде всего на функцию F_P . В допустимой области эта функция совпадает с целевой, а за пределами допустимых значений на её кривизну влияют параметры k_g и k_{\min} .

Выявлено, что алгоритм даёт наиболее устойчивую сходимость, если значение целевой функции имеет тот же порядок, что и штрафные добавки.

Заключение

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Решение тестовых задач оптимизации показало устойчивую сходимость прямого алгоритма решения условно-экстремальной задачи.
2. Алгоритм с применением комбинированного метода может иметь быструю сходимость при соответствующей настройке его параметров.
3. Преимуществом комбинированного метода является также то, что здесь не предъявляется требование точности к задаче минимизации по прямым переменным. Это важно при решении практических задач механики деформируемых твёрдых тел, когда на первых итерациях при некоторых начальных параметрах варьирования допустимое решение может отсутствовать.
4. Важным продолжением развития предложенной методики являются исследования в направлении автоматизированной настройки параметров, регулирующих сходимость алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nikolaos, V. Mixed-integer nonlinear programming 2018 / V. S. Nikolaos // Optimization and Engineering. – 2019. – Vol. 20. – P. 301-306.
2. Washington, I. A parallel structure exploiting nonlinear programming algorithm for multiperiod dynamic optimization / I. D. Washington, C. L. E. Swartz // Computers and Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 103. – P. 151-164. DOI: /10.1016/j.compchemeng.2017.03.021.
3. M. Fernanda, P. Firefly penalty-based algorithm for bound constrained mixed-integer nonlinear programming / M. Fernanda, P., A. C. Ana Maria, Rogério B. Francisco, M. G. Edite // Optimization. – 2016. – Vol. 65. – № 5. – P. 1085-1104. DOI:10.1080/02331934.2015.1135920.
4. Ali, M. N. A particle swarm BFGS algorithm for nonlinear programming problems / M. N. Ali, A. S. Roohollah, E. J. Abdolhamid // Computers & Operations Research. – 2013. – Vol. 40. – P. 963-972.
5. Huang, X. X. A sequential quadratic penalty method for nonlinear semidefinite programming / X. X. Huang, X. Q. Yang, K. L. Teo // Optimization. – 2003. – Vol. 52. – № 6. – P. 715-738.
6. Saeed, Gh. Generalized uniformly optimal methods for nonlinear programming / Gh. Saeed, L. Guanghui, H. Zhang // Journal of Scientific Computing. – 2019. – P. 1-28. DOI:10.1007/s10915-019-00915-4.
7. Arrow, C. Gradient methods for finding a conditional maximum with weakened sentences / C. J. Arrow, R. M. Solow. – New York. [80, chapter. 11, – P. 246-264].
8. Hestenes, M. Multiplier and gradient methods / M. R. Hestenes // Journal Optimum Theory Application. – 1969. – Vol. 4. № 5. – P. 303-320.
9. Powell, M. A method for nonlinear constraints in minimization problems / M. J. D. Powell // Optimization. – Vol 4. – 1969. – P. 283-298.
10. Гольштейн, Е. Модифицированные функции Лагранжа: Теория и методы оптимизации / Е. Г. Гольштейн, Н. В. Третьяков. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
11. Boris, H. An augmented Lagrangian based algorithm for distributed non convex optimization / H. Boris, J. Frasch, M. Diehl // SIAM Journal on Optimization. – 2016. – Vol. 26. – № 2. – P. 1101-1127.



12. Birgin, E. Augmented Lagrangians with possible infeasibility and finite termination for global nonlinear programming / E. G. Birgin, J. M. Martínez, L. F. Prudente // J. Glob. Optim. – 2014. – Vol. 58. – № 2. – P. 207-242.
13. Xiao, W. An augmented Lagrangian affine scaling method for nonlinear programming / W. Xiao, H. Zhang // Optimization Methods and Software. – 2015. – Vol. 30. № 5. – P. 934-964. DOI:/10.1080/10556788.2015.1004332.
14. Siti, Nor Habibah Binti Hassan. Augmented Lagrangian method with alternating constraints for nonlinear optimization problems / Siti Nor Habibah Binti Hassan, Tomohiro Niimi, Nobuo Yamashita // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2019. – Vol. 181. – P. 883-904. DOI:/10.1007/s10957-019-01488-w.
15. Frank, E. Adaptive augmented Lagrangian methods: algorithms and practical numerical experience / E. C. Frank, I. M. G. Nicholas, J. Hao, P. R. Daniel // Optimization Methods and Software. – 2016. – Vol. 31. № 1. – P. 157-186. DOI:/10.1080/10556788.2015.1071813.
16. Дмитриева, Т. Параметрическая оптимизация в проектировании конструкций, подверженных статическому и динамическому воздействию / Т. Л. Дмитриева. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. – 176 с.
17. Jeyakumar, V. Global optimality conditions for nonlinear programming problems with bounds via quadratic underestimators / V. Jeyakumar, N. Q. Huy // Optimization. – 2010. – Vol. 59. № 2. – P. 161-173. DOI:/10.1080/02331930801951199.
18. Mokhtar, S. Nonlinear programming. Theory and Algorithms / S. B. Mokhtar, H. D. Sherali, C.M. Shetty. – John Wiley and Sons, Inc., Publication, New York, 2006. – 779 p.

Черный С. П., Бузикаева А. В., Тимофеев А. К., Енин Э. Д., Шестаков М. И.
S. P. Cherny, A. V. Buzikaeva, A. K. Timofeev, E. D. Yenin, M. I. Shestakov

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С КОМБИНИРОВАННЫМ ВНУТРЕННИМ КАСКАДОМ**

**FEATURES OF FUZZY CONTROL SYSTEMS WITH COMBINED INTERNAL CASCADE
MODELING**

Черный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Sergey P. Cherny – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Бузикаева Алина Валерьевна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Alina V. Buzikaeva – a Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Тимофеев Антон Константинович – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Anton K. Timofeev – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Енин Эмиль Демьянович – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Emil D. Enin – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Шестаков Михаил Игоревич – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mikhail I. Shestakov – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. В работе представлен подход, позволяющий повысить интеллектуальные возможности системы путём применения технологии нечёткого многокаскадного управления. Такая методика позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы, а также приводит к повышению быстродействия и при этом не снижает динамическую точность интеллектуальной системы автоматического регулирования.

Summary. The paper presents an approach that allows to increase the intellectual capabilities of the system by applying the technology of fuzzy multi-stage control. This technique allows you to implement control laws of any complexity and obtain high-quality transients, and also leads to increased performance, and at the same time does not reduce the dynamic accuracy of the intelligent automatic control system.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, электропривод постоянного тока.

Key words: intelligent control system, fuzzy logic controller, DC electric drive.

УДК 681.5.01:658.5

Введение. На сегодняшний день в промышленности при управлении линейными системами интенсивно применяются последовательные ПИД-регуляторы, достоинствами которых являются простота, низкая стоимость и высокая эффективность. Но несмотря на это проблема синтеза мате-

математического описания модели остаётся важной и актуальной. Типовые наработанные подходы дают хорошие результаты там, где требуется реализация традиционных законов управления, но для сложных и слабоструктурированных объектов регулирования целесообразно применение методик, которые будут ориентированы на моделирование САУ с неполнотой исходной информации и противоречивостью при реализации математического описания.

Важной отличительной чертой применения технологии мягких вычислений является её направленность на повышение сложности процессов управления и математических моделей реальных систем, что позволяет решать задачи интеллектуального управления, подстраиваясь под достаточно существенные изменения условий внешней среды, и принимать решения по управлению, близкие к действиям эксперта или технолога [1].

Нечёткие логические регуляторы представляют собой интеллектуальные системы, имеющие в своей основе подходы, базирующиеся на экспертных оценках, именно поэтому алгоритмы синтеза таких систем трудно формализовать.

Настройка ПИД-регулятора

Объект управления представляет собой систему электропривода постоянного тока подчинённого регулирования, представленную на рис. 1.

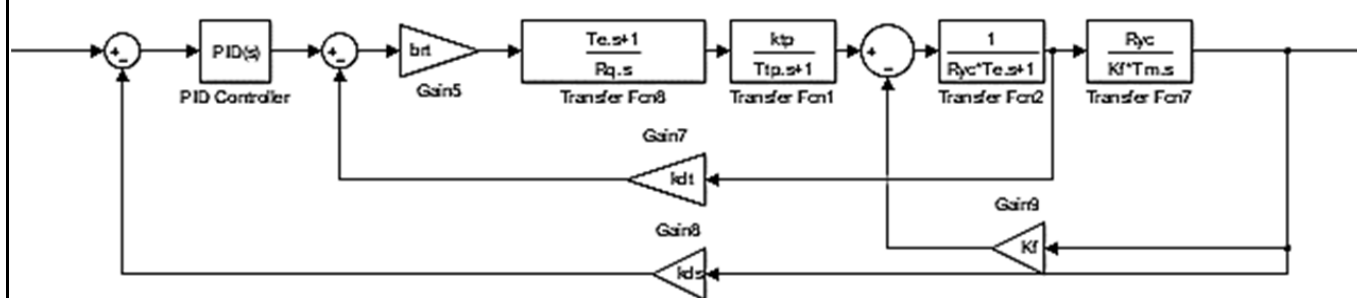


Рис. 1. Структурная схема электропривода постоянного тока

На рис. 2 представлен график переходного процесса в системе подчинённого регулирования при реакции на стандартный тестовый сигнал.

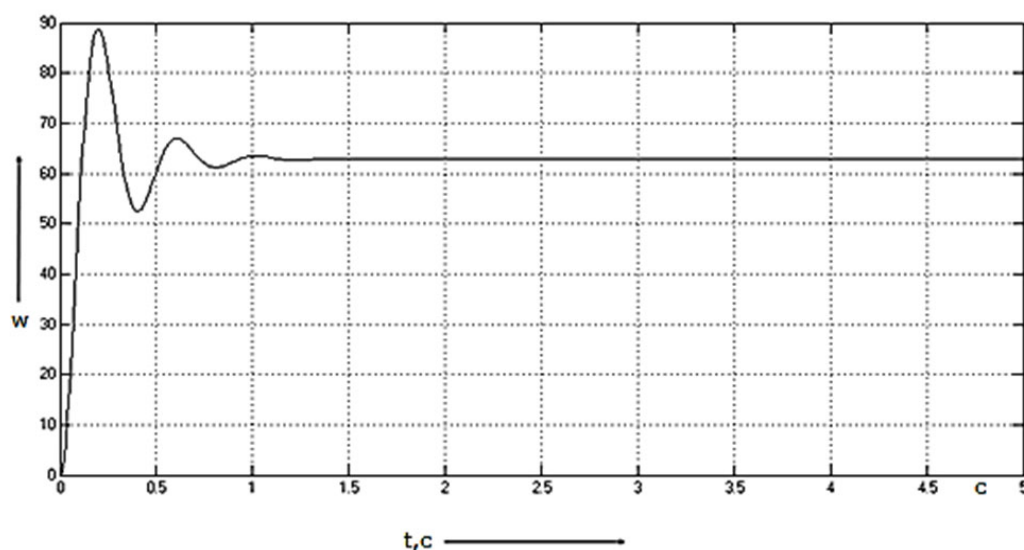


Рис. 2. График переходного процесса системы с классическим регулятором

Применение ПИД-закона управления в системе подчинённого регулирования электроприводом постоянного тока позволяет реализовать целый ряд характеристик систем с более высокими

показателями, например, по быстродействию и перерегулированию. Результаты моделирования при внедрении в заданную систему управления ПИД-регулятора представлены на рис. 3, из которого можно сделать вывод, что применение ПИД-закона позволяет сократить время переходного процесса с 0,65 до 0,15 с.

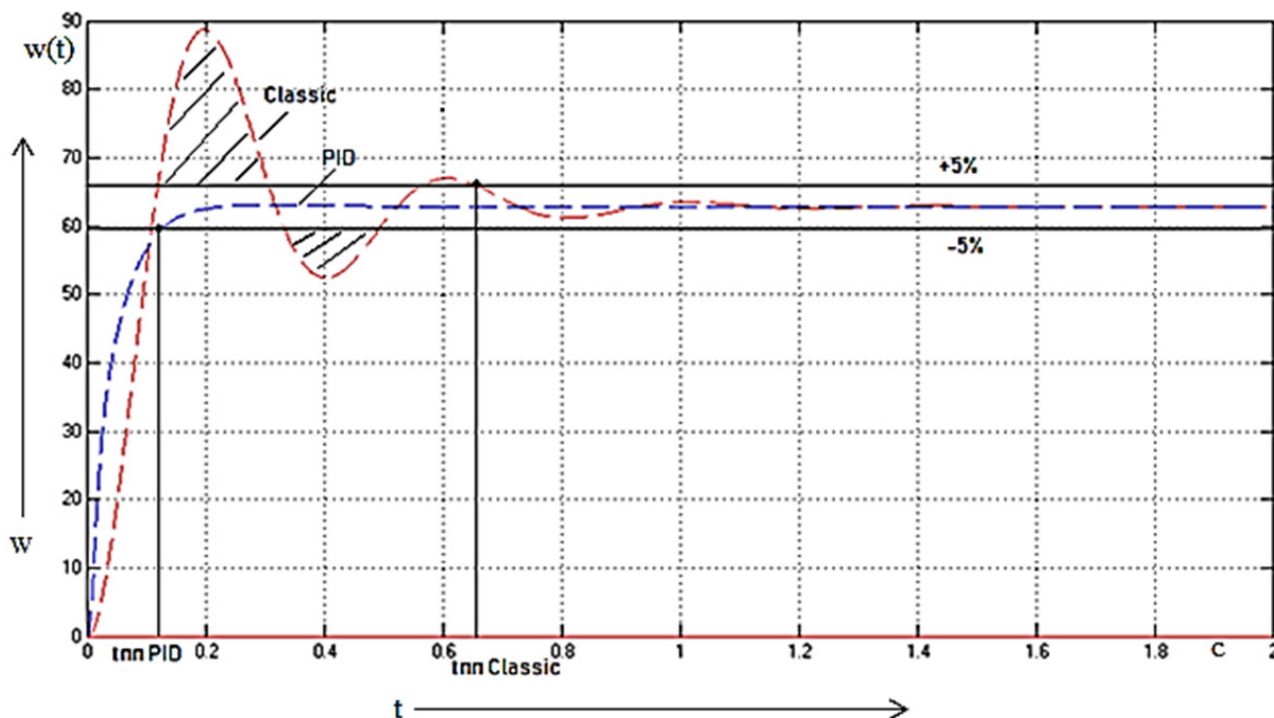


Рис. 3. График переходного процесса системы с классическим и ПИД-регулятором

Настройка нечёткого логического регулятора с использованием адаптивной нейронной сети

Для повышения основных свойств представленного ПИД-регулятора осуществим его синтез с применением адаптивной нейронной сети. Такой подход позволит повысить интеллектуальные, адаптивные и робастные свойства системы, а также позволит нивелировать нелинейности и нестационарности объекта управления.

Настроим НЛР системы управления электроприводом постоянного тока с использованием ANFIS — искусственной нейронной сети, реализованной на нечёткой системе вывода Такаги-Сугено. Такой подход объединяет преимущества аппарата нейронных сетей с достоинствами систем, основанных на нечёткой логике. Механизм вывода, реализуемый в такой системе, соответствует набору нечётких продукционных правил вида «условие — действие» с антецедент выводимой структурой [2].

Топология нейронной сети, реализующей настройку нечёткой системы управления, представляет собой сеть прямого распространения с тремя нейронами во входном слое, одним нейроном в выходном и двумя нейронами в скрытом слое. Вид и форма нейронной сети, использованной при настройке нечёткого ПИД-регулятора, представлена на рис. 4, функциональная схема нечёткого регулятора приведена на рис. 5.

Лингвистическая переменная $in1$ формализует понятие первого входного сигнала нечёткого регулятора — пропорциональная составляющая сигнала ошибки по скорости. Область определения представляет собой диапазон $[-0.03152; 10]$. Базовое терм-множество T лингвистической переменной состоит из следующих элементов: $T = \{in1cluster1, in1cluster2\}$, где $in1cluster1$ — малое значение; $in1cluster2$ — среднее значение; названия нечётких переменных лингвистической переменной $in1$. По области определения базового терм-множества лингвистической переменной $in1$ определены две функции принадлежности вида «gauss» (см. рис. 6).

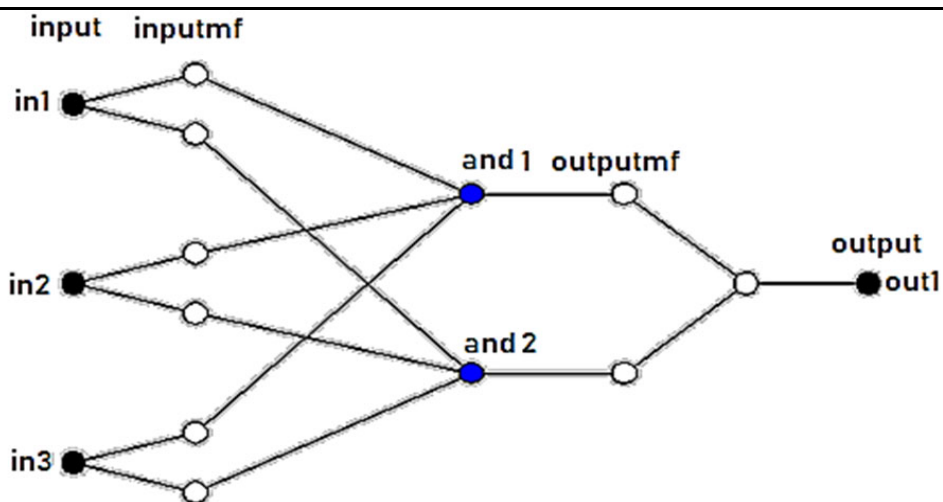


Рис. 4. Структура нейронной сети

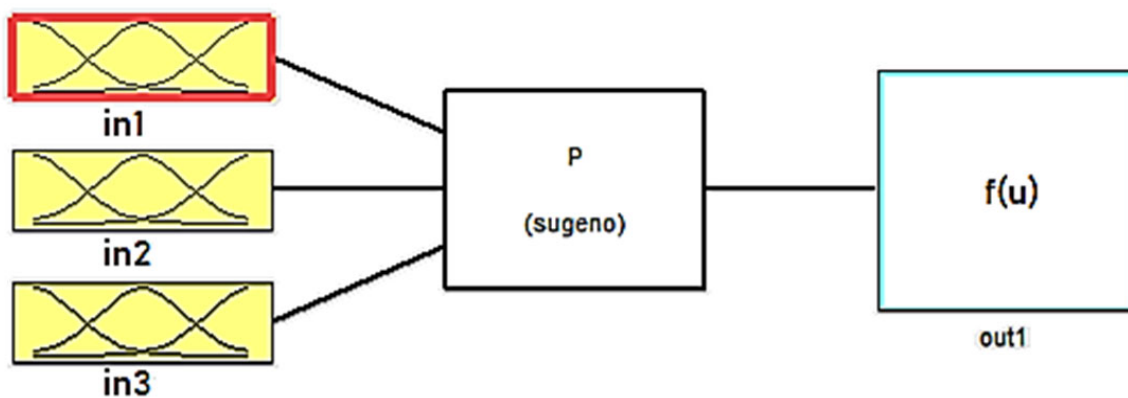


Рис. 5. Функциональная схема нечёткого регулятора

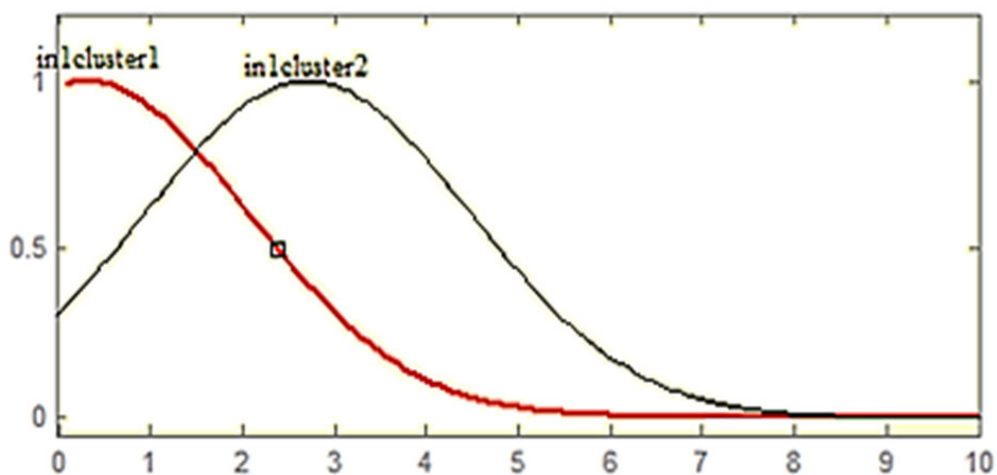


Рис. 6. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «пропорциональная составляющая сигнала ошибки по скорости»

Лингвистическая переменная $in2$ формализует понятия второго входного сигнала нечёткого регулятора – дифференциальная составляющая сигнала ошибки по скорости. Область определения представляет собой диапазон $[-248; 0.14]$. Базовое терм-множество T лингвистической переменной состоит из следующих элементов: $T = \{in2cluster1, in2cluster2\}$. В заданном диапазоне изменения регулируемой величины распределены две нечёткие переменные с функциями принадлежности в форме Гаусса (см. рис. 7).

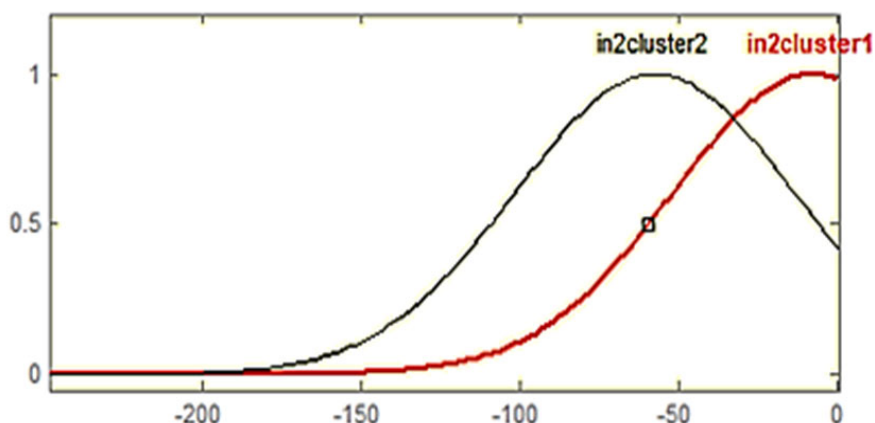


Рис. 7. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «дифференциальная составляющая сигнала ошибки по скорости»

Понятие «производная ошибки по скорости» описывается лингвистической переменной $in3$ и соответствует третьему входному сигналу нечёткого регулятора и соответствует интегральной составляющей ПИД-закона регулирования. Область определения представляет собой диапазон $[0; 0.4345]$. В базовом терм-мноестве приведённой лингвистической переменной аналогично представлены два нечётких термина: $T = \{in3cluster1, in3cluster2\}$. Вид и форма функций принадлежности представлены на рис. 8.

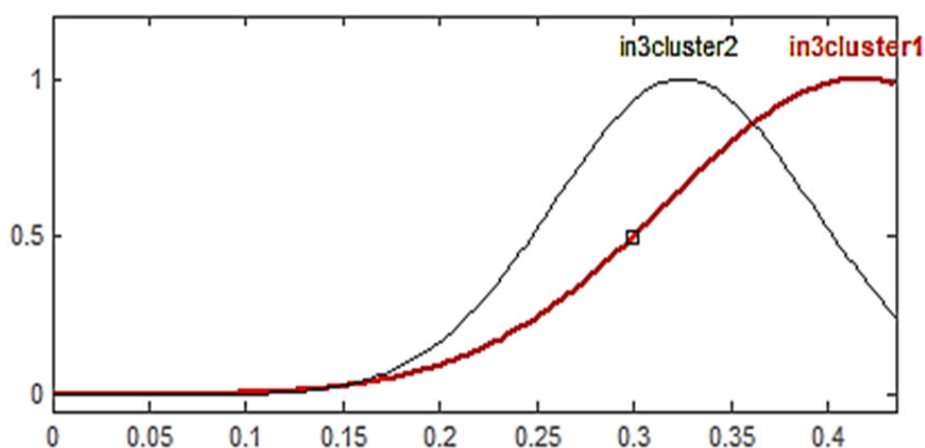


Рис. 8. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «интегральная составляющая сигнала ошибки по скорости»

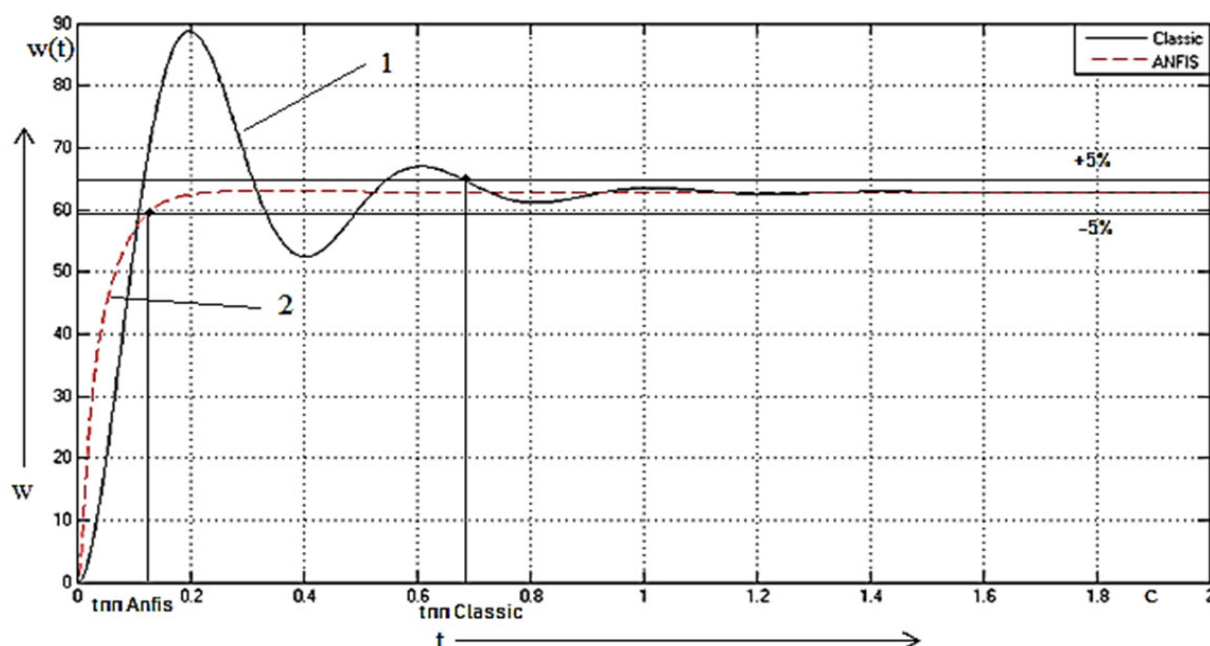
Выход нечёткого ПИД-регулятора формализуется лингвистической переменной $out1$ – сигнал управления по скорости. Состояния этой переменной описываются двумя полиномами в консеквентах нечётких продукционных правил Сугено: $out1cluster1 = \{7522, 275.4, 3.066e+04, -1.298e+04\}$; $out1cluster2 = \{1807, 26.7, 2.033e+04, -1.4e+04\}$.

Нечёткая продукционная база знаний регулятора представляет собой перечень из двух правил и имеет следующий вид:

1. Если «in1» есть «in1cluster1» и «in2» есть «in2cluster1» и «in3» есть «in3cluster1», то «out1» есть «out1cluster1».
2. Если «in1» есть «in1cluster2» и «in2» есть «in2cluster2» и «in3» есть «in3cluster2», то «out1» есть «out1cluster2».

Анализ работы системы с НЛР

Ниже приведён сравнительный анализ двух систем: с нечётким логическим регулятором, настроенным адаптивной нейронной сетью, и регулятором, построенным с использованием классических алгоритмов (см. рис. 9).



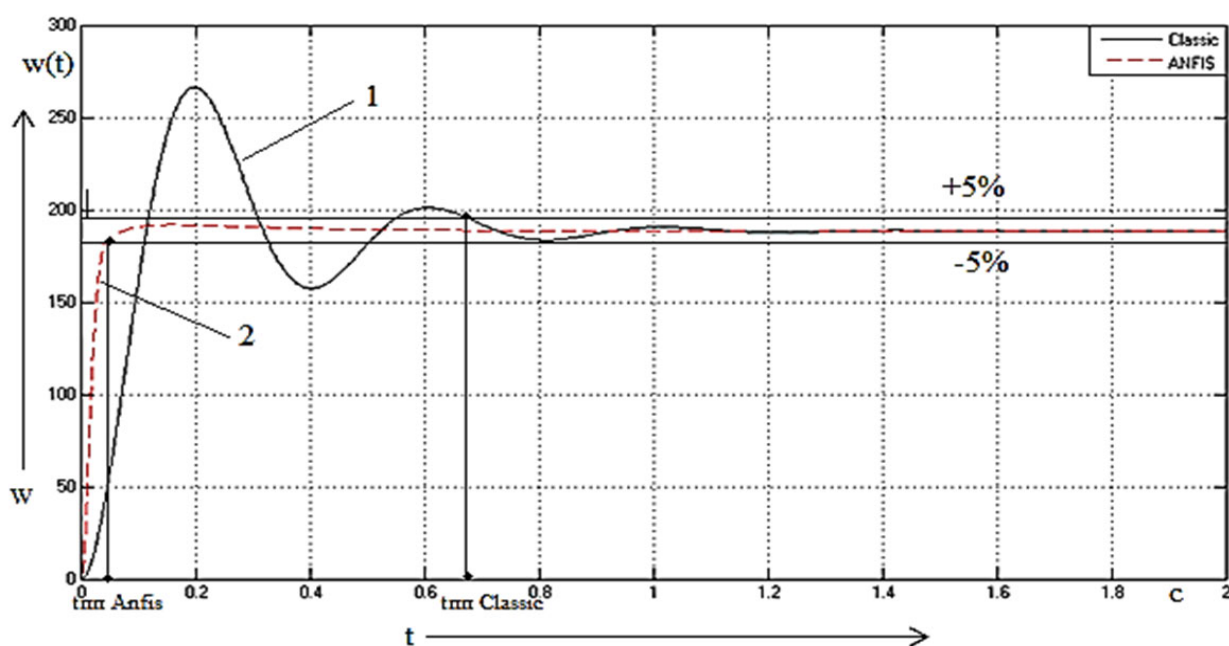
1 – система с классическим регулятором; 2 – система с НЛР

Рис. 9. График переходного процесса системы с классическим регулятором и НЛР настроенным с помощью адаптивной нейронной сети

График переходных процессов, представленный на рис. 9, иллюстрирует качество реализации законов управления по основным показателям. Полученная система обладает не худшими показателями, чем классическая система управления электроприводом постоянного тока. Кроме того, в статическом режиме обе системы имеют одинаковый заданный уровень при существенном снижении времени переходного процесса и перерегулирования [3].

В качестве эксперимента на обе системы был подан сигнал задания, превышающий номинальный в 3 раза (см. рис. 10).

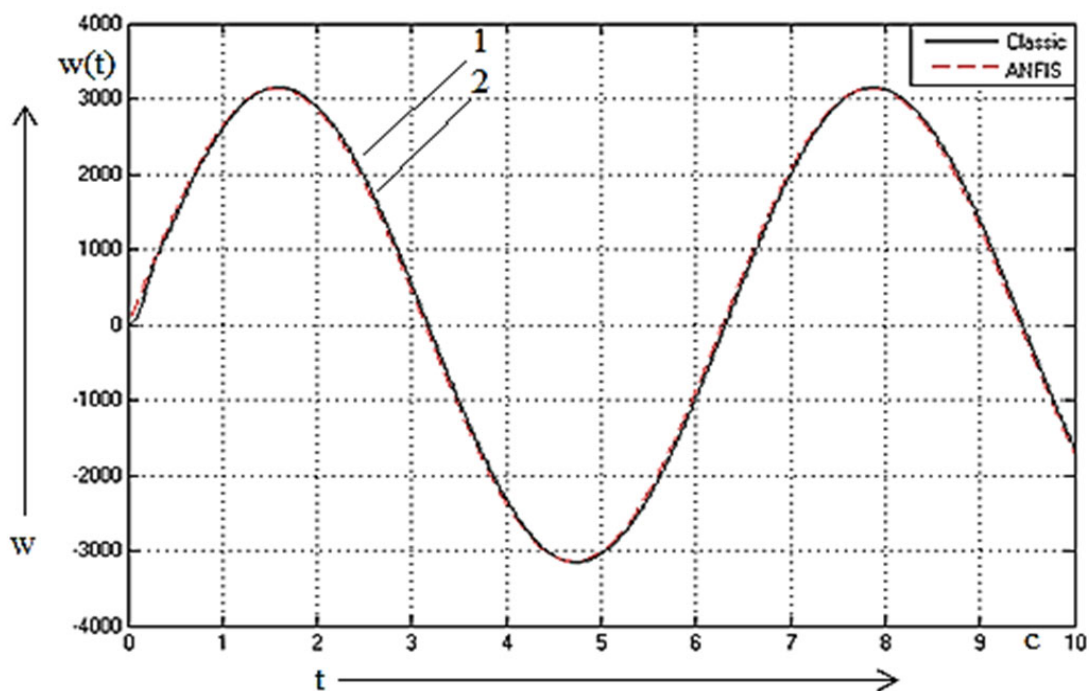
По приведённым переходным процессам (см. рис. 10) можно сделать вывод, что система, настроенная с применением теории мягких вычислений, имеет наибольшее быстродействие и минимальное перерегулирование и даже при больших значениях задающего воздействия выходит на установленные показатели качества [4].



1 – система с классическим регулятором; 2 – система с НЛР

Рис. 10. График переходного процесса системы с классическим регулятором и НЛР настроенным с помощью адаптивной нейронной сети при повышенном уровне сигнала задания

На рис. 11 представлена реакция интеллектуальной системы при замене входного тестового сигнала с единичного ступенчатого на синусоидальный.

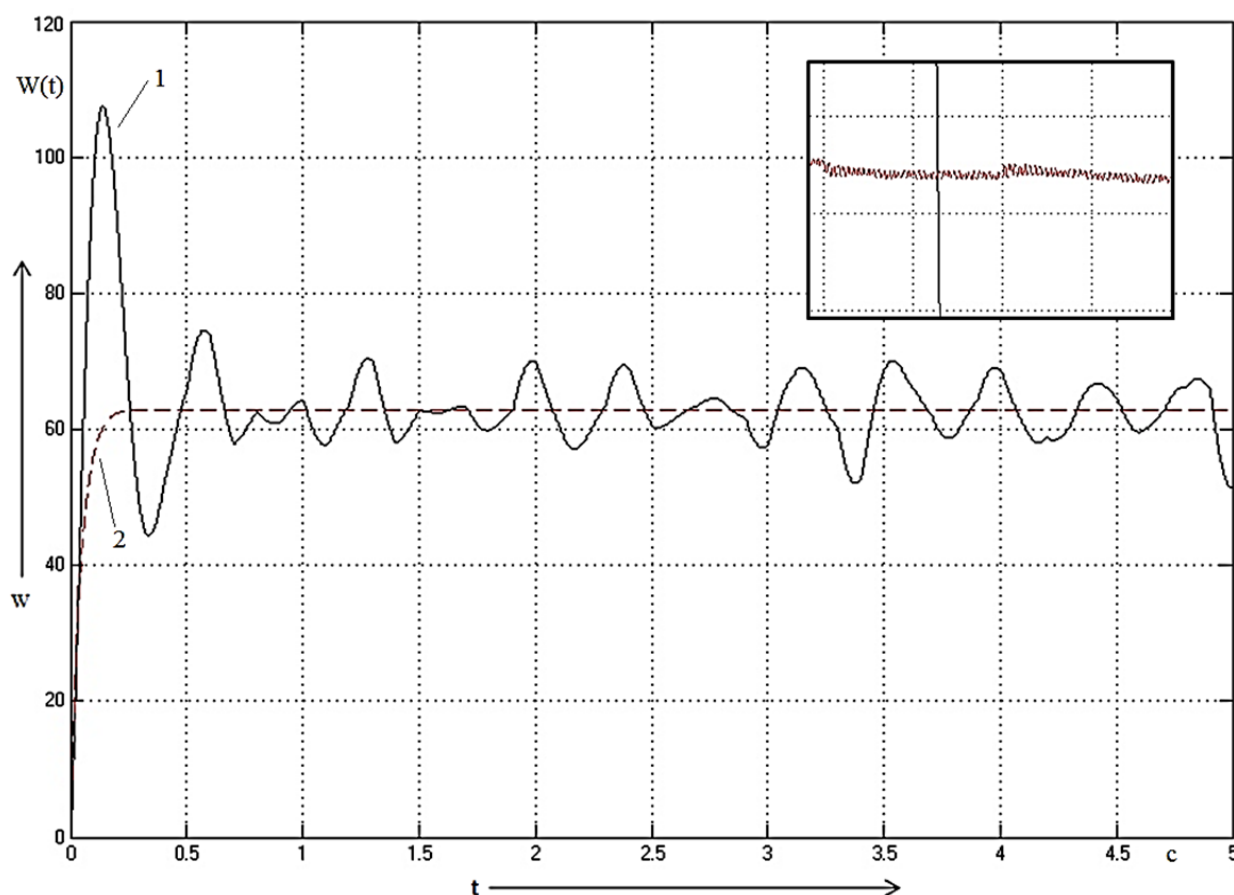


1 – система с классическим регулятором; 2 – система с НЛР

Рис. 11. График переходного процесса системы с классическим регулятором и НЛР настроенным с помощью адаптивной нейронной сети при подаче синусоидального сигнала

Анализ графиков переходных процессов (см. рис. 11) указывает на то, что система автоматического регулирования с НЛР максимально точно обрабатывает задающее воздействие, по сравнению с системой, использующей классические подходы по управлению с учётом значительного увеличения амплитуды синусоидального сигнала. Кроме того, по представленному графику можно сделать вывод, что нечёткая система управления в режиме слежения показывает минимальное значение ошибки [5].

На рис. 12 представлена реакция системы на возмущающее воздействие, реализуемое генератором случайных величин, наиболее характерная область для наглядности представлена с увеличенным масштабом. Переходные характеристики иллюстрируют качество адаптационных свойств интеллектуальной системы управления в целом и работу представленного нечёткого модуля в виде незначительных колебаний относительно установившегося режима в частности [6].

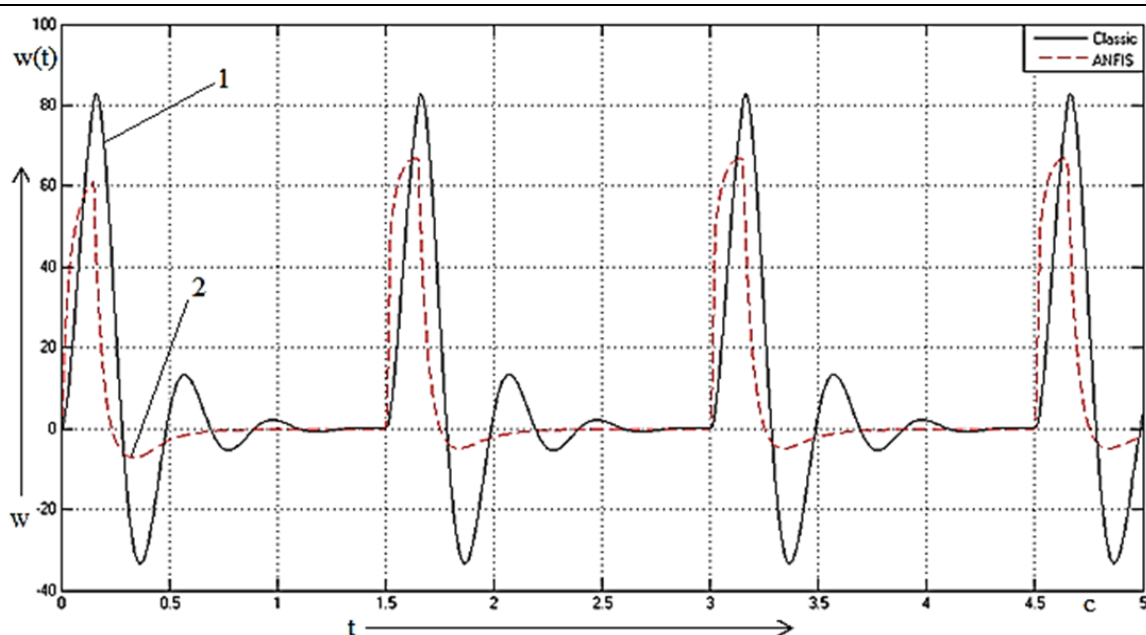


1 – система с классическим регулятором; 2 – система с НЛР

Рис. 12. График переходного процесса системы с классическим регулятором и НЛР настроенным с помощью адаптивной нейронной сети при подаче случайно генерируемых значений

По переходному процессу систем (см. рис. 13) видно, что система с НЛР имеет существенные ошибки в процессе аппроксимации. Неспособность интеллектуальной системы повторить сигнал такого вида обусловлена низким быстродействием, недостаточным количеством нечётких переменных в базовом терм-множестве, а также формой их функций принадлежности.

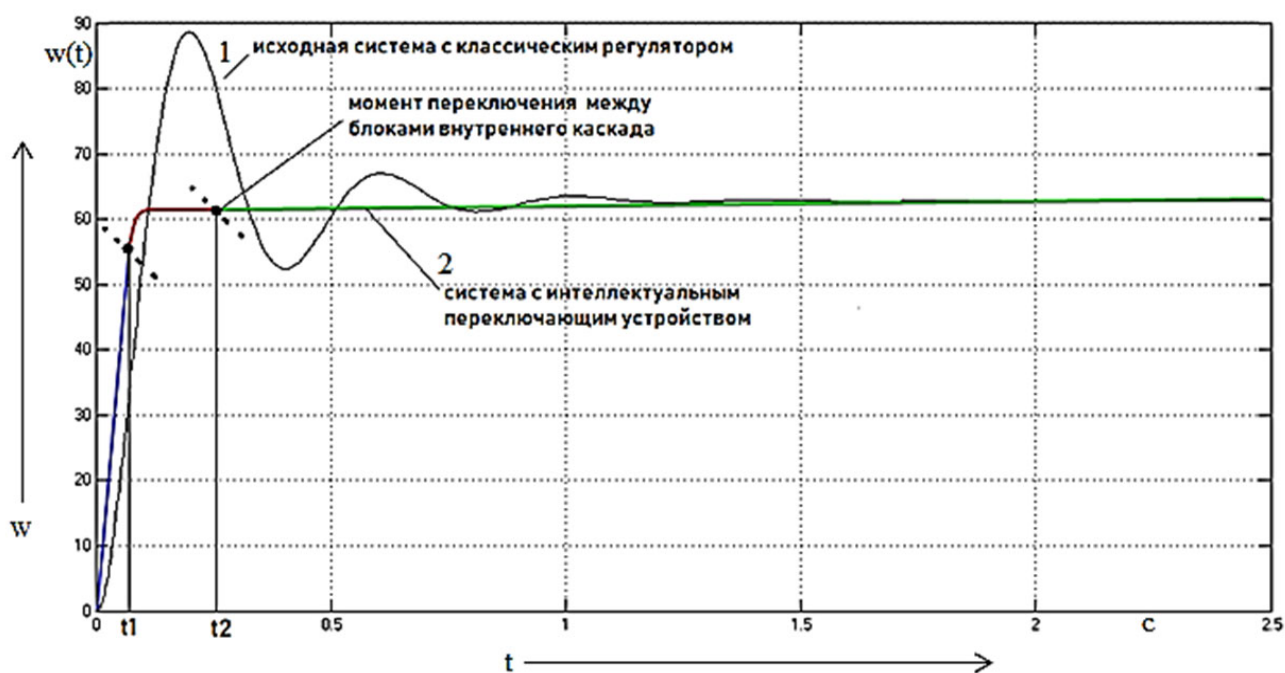
Кроме обозначенных выше недостатков, в модели нечёткого ПИД-регулятора, настроенного с использованием адаптивной нейронной сети, существует ряд подходов к их возможному устранению. Одним из таких подходов является повышение интеллектуальных возможностей системы путём применения технологии нечёткого многокаскадного управления. Такая методика позволит не увеличивать объём информационной базы НЛР при внедрении дополнительных входных лингвистических переменных [7].



1 – система с классическим регулятором; 2 – система с НЛР

Рис. 13. График переходного процесса системы с классическим регулятором и НЛР настроенным с помощью адаптивной нейронной сети при подаче сигнала вида «пульсация»

Повышение быстродействия системы может быть достигнуто путём сочетания во внутреннем каскаде как нечётких элементов, так и частей классических звеньев. Форма выходного управляющего воздействия будет формироваться за счёт соединения различных составляющих, которые выбираются из элементов внутреннего каскада внешним интеллектуальным модулем. На рис. 14 показан возможный вид переходного процесса в системе с учётом вышеописанного подхода [8].



1 – система с классическим регулятором;
2 – система с интеллектуальным переключательным устройством

Рис. 14. График переходного процесса



Такой подход позволит реализовывать развитые интеллектуальные системы управления, которые способны проводить выборочную коррекцию определённых участков траектории движения объекта регулирования. Кроме того, использование простейших элементарных звеньев наряду с нечёткими модулями во внутреннем каскаде приведёт к повышению быстродействия, при этом не снижая динамической точности интеллектуальной системы автоматического регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: Бином, Лаборатория знаний: Адаптивные и интеллектуальные системы, 2009. – 800 с.
2. Деменков, Н. П. Нечёткое управление в технических системах / Н. П. Деменков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.
3. Смирнова, В. И. Основы проектирования и расчёта следящих систем / В. И. Смирнова, Ю. А. Петров, В. И. Разинцев. – М.: Машиностроение, 1983. – 295 с.
4. Шекшня, В. Л. Следящие системы / В. Л. Шекшня, С. А. Хризолитова. – М.: МЭИ, 1966. – 140 с.
5. Леоненков, А. В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
6. Стельмашук, С. В. Согласованное управление устройством транспортировки ленты с модальными регуляторами / С. В. Стельмашук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1(38). – С. 28-40.
7. Cherniy S. P. Fuzzy Multi-Cascade AC Drive Control System / A. V. Buzikayeva, A. S. Gudim // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602930.
8. Susdorf V. I. Optimization of Series Motor Drive Dynamics / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344.

МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

Сарилов М. Ю., Палкин Д. А., Минаков М. В.
M. Yu. Sarilov, D. A. Palkin, M. V. Minakov

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

ON DAMAGE RESEARCH AT ALUMINUM AND TITANIUM ALLOY ELECTROEROSION PROCESSING

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Dr. Habil. of Engineering, Professor, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Палкин Денис Андреевич – магистр кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Denis A. Palkin – Master's Degree Student, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

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

Matvey V. Minakov – Master's Degree Student, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Приведены основные причины применения электроэрозионной обработки в современном машиностроении и в авиакосмической области в частности. Также сделан акцент на применение в данной области промышленности алюминиевых и титановых сплавов и на особенностях, выявленных при их обработке. Для теоретического интерпретирования полученных экспериментальных данных приведены механизм пробоя на алюминиевые и титановые сплавы с учётом процессов извлечения электронов с поверхности металла, а также выяснение особенностей инжестирования полученных зарядов в рабочую жидкость. Дано краткое описание возможных процессов взаимодействия нейтральных частиц и электронов, движущихся под действием внешнего магнитного поля. Процесс наглядно проиллюстрирован графическими изображениями с указанием траекторий движения как лёгких электронов, так и тяжёлых ионов, полученных в результате ионизации канала разряда. В итоге по результатам проведённого анализа процесса и физико-химических свойств базовых элементов исследуемых сплавов титана и алюминия было сделано предположение относительно возможного характера пробоя на данные виды материалов.

Summary. The main reasons for the use of electroerosion processing in modern machine building and in the aerospace field in particular are given. The emphasis is also placed on the application of aluminum and titanium alloys in this industry and on the features identified during their processing. For a theoretical interpretation of the obtained experimental data, the breakdown mechanism for aluminum and titanium alloys is given taking into account the processes of electron extraction from the metal surface, as well as clarification of the features of the injection of the resulting charges into the working fluid. A brief description of the possible processes of interaction of neutral particles and electrons moving under the influence of an external magnetic field is given. The process is clearly illustrated by graphic images indicating the trajectories of motion of both light electrons and heavy ions obtained as a result of ionization of the discharge channel. Based on the results of the analysis of the process and the physico-chemical properties of the basic elements of the titanium and aluminum alloys under study, an assumption was made regarding the possible nature of the breakdown for these types of materials.

Ключевые слова: электрическая эрозия, алюминий, титан, теплота, рабочая жидкость.

Key words: electric erosion, aluminum, titanium, heat, working fluid.

УДК 621.9.048.4

Введение

Активное развитие мирового и отечественного машиностроения привело к более широкому применению электроэрозионной обработки (ЭЭО). Об этом может свидетельствовать появление совершенно новых типов сплавов с высокой твёрдостью. Эти сплавы используются практически во всех конструкциях, где детали сложной формы и требуют наиболее эффективных методов обработки. С помощью специальных методов обработки можно повысить точность деталей и требования к физико-механическим свойствам поверхностного слоя. Перед машиностроительной промышленностью стоит неотложная задача ускорения производственных процессов, причём производимая продукция должна соответствовать повышенным требованиям к качеству, и как раз высокие точность, гибкость и технологичность методов ЭЭО помогут решить эти задачи. Опыт использования ЭЭО в машиностроении и приборостроении свидетельствует о рентабельности и конкурентоспособности по сравнению с механической резкой, что особенно заметно при обработке труднообрабатываемых электропроводных материалов, изготовлении сложных деталей, вставке соединительных каналов в детали кузова и т.д. ЭЭО на данный момент является, по существу, нелинейным стохастическим процессом и в то же время сложным физическим процессом, исследование эксперимента которого в значительной степени затруднено из-за сложности внедрения измерительных приборов в зону обработки. Процесс ЭЭО может быть представлен как набор отдельных процессов, ход которых подчиняется известным физическим законам, описанным математическими моделями.

Анализ пробоя жидкой диэлектрической среды при ЭЭО

Процесс распада, который составляет основу процесса ЭЭО, изучается очень фрагментарно, это не позволяет существенно повлиять на процесс в широком диапазоне. Изучение процессов, которые происходят во время распада жидкости, как основы всего процесса позволит владеть обработкой гораздо точнее и сделать её эффективней [1; 2].

Положения процесса ЭЭО основаны на фундаментальных исследованиях отечественных и зарубежных учёных [2; 3; 4]. На основе этих исследований учёным удалось создать широкий спектр технологических процессов, поддерживающихся высокопроизводительным оборудованием. Большое внимание уделяется точным характеристикам технологического процесса ЭЭО за счёт улучшения динамических характеристик оборудования, расширения спектра режимов, выбора состава, а также структуры электродных материалов, использования возможностей автоматизации технологического процесса.

Интересен тот факт, что представление процесса деструкции электрической прочности жидкости часто основано на законах, заимствованных из теории вакуума или газового разряда, которые в настоящее время считаются хорошо изученными. Развиваемая теория в данных разделах физики не может быть беспрекословно перемещена на разложение жидкости из-за яркой уникальности механизма этого явления. Основное различие между пробоем жидкости и пробоем газа состоит в различных значениях выхода электронов из катода. Это явление возникает из-за таких явлений, как изменение выходной операции из-за проникновения поля в металл, влияние катодной поверхности и пространственных зарядов под действием сил изображения с учётом нелинейной поляризации носителя.

Работа над нелинейными эффектами в жидких диэлектриках в сильнейших электрических полях показала, что перемена показателя преломления n в этих условиях может быть описана уравнением

$$n = n_0 + kE^2,$$

где n_0 – показатель преломления невозмущенной жидкости; $k = B \cdot \lambda$, здесь B – постоянная Керра; λ – длина волны света. Это позволяет применять его для учёта влияния нелинейной поляризации среды в наисильнейшем поле электрона и его электрического изображения на эмиссию из металла в жидкость. В сильных полях второй член формулы близок к n_0 , это запрашивает рассмотрения

нелинейной поляризации жидкости. Известно, что произведение выходного сигнала W из металла в жидкость с диэлектрической постоянной ε может быть записано как

$$W = W_0 \cdot \varepsilon^{-1},$$

где W_0 – работа выхода электронов из металла в вакуум; $\varepsilon = n^2$. Выражение для силы электрического изображения $F(x)$ запишем в виде

$$F = -\frac{e^2}{4x^2(n_0 + kE^2)^2}.$$

Приведём это уравнение к виду, удобному для дальнейших расчётов:

$$Z(1 + Z^2)^2 = -\frac{b}{x^2},$$

$$Z = \frac{F}{e} \cdot \sqrt{\frac{k}{n_0}}, \quad b = \frac{e}{4n_0^2} \sqrt{\frac{k}{n_0}}.$$

Анализ правой части этого уравнения при реальных значениях k, n, W_0 показывает, что $z < 1$. При этом можно приближённо записать в виде

$$Z \cong \sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{sh} \frac{1}{3} \left(\operatorname{arsh} 3 \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{b}{x^2} \right).$$

Работу выхода электронов из металла в жидкость с учётом нелинейной поляризации среды запишем как

$$W_1 = \int_{x_0}^{\infty} F \cdot dx = F \cdot x|_{x_0}^{\infty} - \int_{x_0}^{\infty} x \cdot dF,$$

$$x_0 = \frac{300 \cdot e^2}{4W_0},$$

тогда

$$W_1 = -F_0 x_0 + \sqrt{\frac{n_0}{k}} e^2 b \cdot \int_{z_0}^{\infty} \frac{d|z|}{\sqrt{|z|}(1 + |z|^2)}.$$

После интегрирования и с учётом предыдущих выражений выразим z_0 в виде

$$z_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \operatorname{sh} \frac{1}{3} \left[\operatorname{arsh} \cdot 3.4 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{k}{n_0}} \left(\frac{W_0}{n_0} \right)^2 \right].$$

Эта формула допускает вычисление выходной операции для конкретных металложидкостных диэлектрических систем. Результаты вычисления показывают, что снижаются работы выхода электронов из металла в жидкость в силу нелинейного изменения положения ε электронов в электронном поле.

Большое количество экспериментальных данных [5–9] установило образование в диэлектрике проводящей области вследствие ударной лавинной ионизации атомов среды за время порядка 10^{-7} с при наложении определённого напряжения $U_{пр}$. Напряжение пробоя, связанное с электрическим полем и величиной отношения МЭП,

$$U_{пр} = aE_{пр},$$

где a – расстояние между электродами. При прочих равных условиях величина $U_{пр}$ зависит от свойств жидкого диэлектрика.

Результатом является образование электронной лавины на катоде – стримера, который, двигаясь к аноду, растворяет, а также ионизирует жидкость на своём пути. К моменту достижения анода стример отделяется от окружающей среды парогазовой плазменной оболочкой. Далее подача электрической энергии в зону разряда происходит через плазменный канал, состоящий в основном из водородной плазмы, являющейся рабочим органом в процессе обработки.

Исследование плазменного канала и механизма теплообмена при электроэрозионной обработке

Газ получает особые электрофизические и физико-химические свойства, если ионизация приобретает высокую степень. Это даёт основание считать ионизированный газ четвёртым состоянием агрегации – плазмой. Газоразрядная плазма успешно используется в качестве активного фактора процесса, например, при электроимпульсной размерной обработке. В целом, можно предположить, что плазма представляет собой смесь трёх компонентов: свободных электронов, положительных ионов и нейтральных атомов.

Если рассматривать поведение плазмы в электрическом поле, то можно выделить следующие закономерности:

- под воздействием электрического поля в плазме возникают направленные потоки частиц, т.е. через плазму протекает электрический ток;
- когда ток проходит, ионы можно считать стационарными, ток создаётся потоком электронов;
- когда ток постоянен, наступает баланс между силой, с которой электрическое поле действует на электроны, и силой сопротивления из-за столкновений между электронами и ионами. Электрон испытывает столкновения в течение 1 секунды γ_{ei} , в связи с чем он теряет импульс $m_e u$, где u – направленная скорость электрона.

Поэтому сила торможения равна $m_e u \gamma_{ei}$ и условие торможения имеет вид $eE = m_e \gamma_{ei} u$. Плотность тока в плазме $j = ne u$. Это значит

$$j = \frac{ne^2 E}{m_e \gamma_{ei}} = \frac{ne^2 \tau_{ei} E}{m_e}.$$

Данное выражение является законом Ома для плазмы. Тогда электропроводность плазмы будет

$$\sigma_E = \frac{ne^2 \tau_{ei}}{m_e}.$$

В однородном магнитном поле заряженная частица обычно движется по спиральной линии, проекция траектории которой представляет собой плоскость, перпендикулярную вектору магнитной индукции B (круг с радиусом $\rho = \frac{mv_{\perp} c}{qB}$, в котором имеется поперечная составляющая скорости частицы v_{\perp}). Это так называемый круг Лармора. Вращение на этой окружности случается на частоте Лармора $\omega_B = \frac{qB}{mc}$. Вдоль силовых линий частица передвигается с одной константой – скоростью v_{\parallel} . Если рассматривать общий случай, то можно отметить, что движение заряженной частицы в неоднородном магнитном поле может быть представлено как суперпозиция следующих трёх движений: вращения вдоль окружности Лармора со скоростью v_{\perp} ; движения центра окружности Лармора вдоль линии силы со скоростью v_{\parallel} ; дрейфового движения центра окружности Лармора перпендикулярно B и $grad |B|$. Область распределения плазменного столба в направлении, перпендикулярном линиям магнитного поля, ограничена плоскостью, на которой уравновешены электродинамические силы, что происходит из-за того, что плазма в магнитном поле ведёт себя как диамагнит. Плазменный диамагнетизм определён тем, что ларморовские токи крутящихся заряженных частиц основывают магнитный момент в каждой единице объёма, который направлен противоположно действующему внешнему полю. По этой причине интенсивность магнитного поля

внутри плазмы снижается, а также формируется пондеромоторная сила, балансирующая разность давления внутри и на границе образования плазмы [10].

Для отделения электрона от атома (называемый процесс – ионизация атома) требуется явная энергия ионизации $W_{\text{и}}$, равная энергии связывания в атоме. Величина кинетической энергии ионизации при столкновении нейтральных частиц с массой M определяется по формуле

$$W = 1,5kT = \Delta K = 0,5Mv_n^2.$$

Данное условие $W \geq W_{\text{и}}$ выражает энергию процесса ионизации как эндотермический процесс. Процессу ионизации также предшествует эндотермический процесс диссоциации молекул многоатомного газа, который протекает с поглощением энергии диссоциации $W_{\text{д}}$. Эти процессы начинают происходить при $T > 2000...3000$ К. Электропроводность газа может быть увеличена одним из пяти возможных типов электронной эмиссии: термоэлектронная – от горячего катода; автоэлектронная или электростатическая – от холодного катода; фотоэлектронная; вторичная, которая была вызвана положительными ионами, и та, которая была вызвана метастабильными атомами.

Электромагнитное поле, которое было приложено, увеличивает энергию ионизированного газа за счёт ускорения заряженных частиц, особенно электронов, из-за их высокой подвижности. Увеличивающаяся кинетическая энергия электронов $\Delta K_{\text{е}}$ практически преобразуется в тепловую энергию, увеличивая энтальпию газа $W_{\text{э}}$ при нагревании до $10^3...10^4$ К и заставляя молекулы многоатомного газа диссоциировать с потреблением энергии [5; 6]. Вторая часть энергии электромагнитного поля накапливается в ионизированном газе $W_{\text{и}}$. Следовательно, общее потребление энергии от электромагнитного поля для генерации электрического разряда в газах составляет

$$W_{\Sigma} = W_{\text{э}} + W_{\text{д}} + w_{\text{и}}.$$

Наряду с процессом ионизации заряженные частицы в ионизированном газе нейтрализуются в процессе рекомбинации, который связан с превращением кванта энергии (эквивалентная $W_{\text{и}}$) в фотон. Излучение, генерируемое рекомбинацией, является одной из причин свечения форм электрического разряда. Нагрев катода для термической эмиссии является результатом рекомбинации бомбардирующих катодов с её положительным эффектом, а также теплопроводностью от ближайших слоёв газовой разрядной плазмы в дуговой колонне. Катодная область приблизительно равна по длине среднему свободному пути электронов и составляет около 10^{-5} см. В этой области эмиссия электронов ускоряется электрическим полем, увеличивая кинетическую энергию в зависимости $\Delta K_{\text{е}} = eU_{\text{к}}$ от падения напряжения в области разряда катодной дуги. Нейтральная частица $\Delta K_{\text{е}}$ межэлектродного промежутка также ускоряет положительные и отрицательные воздействия на катоды. Вблизи анода электронов дополнительная кинетическая энергия получается за счёт энергии полярных волн, характеризующихся падением напряжения в анодной области разряда $U_{\text{а}}$.

Ускоренные электроны на аноде вводятся в кристаллическую решётку материала, итогом этого служит процесс, в котором кинетическая энергия ускоренных электронов рассеивается в виде тепла в анодном пятне, что вызывает локальное повышение температуры анода. Вырабатываемое на аноде тепло расходуется на нагрев, плавление и необходимый перегрев жидкого металла, на излучение в окружающую среду и на потерю теплопроводности через тело анода и в окружающую среду.

Целью работы является определение механизма пробоя титановых и алюминиевых сплавов в жидком диэлектрике во время ЭЭО. Предложенный механизм распада включает в себя все основные этапы из классической теории распада в жидком диэлектрике. Для простоты описания мы вводим некоторые уточнения. Поэтому для простоты объяснения мы выбираем дистиллированную воду в качестве диэлектрика и прямую в качестве схемы обработки (электрод – катодный инструмент, а анод – электрод заготовки). Огромное количество физико-химических процессов начинается сразу после подачи соответствующего пробивного напряжения в межэлектродный зазор, т.е. в электромагнитное поле. После появления ЭДС возникают микротоки проводимости, которые обусловлены наличием свободных носителей заряда в диэлектрической жидкости (свободные лёгкие электроны и

тяжёлые жидкие ионы, постоянно существующие по ряду причин: тепловое контактирование молекул, солнечного излучения, радиации и т.д.). Хотя всё это не сильно влияет на общую картину пробоя, поскольку количество этих носителей крайне мало и развитие разрядного канала в результате их упорядоченного перемещения не происходит. Более важным с точки зрения пробоя является процесс выброса электронов с поверхности катода под воздействием внешнего поля.

Извлечение электрона из металла запрашивает некоторой энергии, минимальное количество которой называется работой выхода, зависящей от состояния поверхности, его частоты, шероховатости и т.д. [5]. Энергия связи электрона в металле $e\phi$ может рассматриваться как работа $\frac{e^2}{4a}$ против притягивающего изображения $\frac{e^2}{4r^2}$, которая должна потратить при удалении электрона на расстояние a порядка межатомного расстояния на бесконечность. Поскольку существует внешнее поле рисования E , полная сила действует на электрон:

$$F = \frac{e^2}{4r^2} - eE.$$

Начиная с расстояния $r_k = \left(\frac{e}{4E}\right)^{1/2}$, при котором $F = 0$, и далее внешняя сила тяги превышает силу притяжения к поверхности. Таким образом, чтобы выйти из тела, электрону нужно только преодолеть расстояние r_k и энергию притяжения:

$$\int_a^{r_k} F dr = \int_a^{r_k} \left(\frac{e^2}{4r^2} - eE \right) dr = \frac{e^2}{4a} - e^{3/2} E^{1/2}.$$

Работа вывода снижается по сравнению со случаем отсутствия поля на величину

$$e\Delta\phi = e^{3/2} E^{1/2}.$$

Это явление называется эффектом Шоттки.

Другое хорошее явление наблюдается при наличии оксидной плёнки на поверхности металла, это считается нормальным, учитывая высокую химическую активность этих металлов. Это присутствие заставляет свободные положительные ионы из жидкости «прилипнуть», формирует пространственный положительный заряд, создающий дополнительное электрическое поле, уменьшая работу выхода поверхности металла. К сожалению, не удалось получить физико-математическую интерпретацию этого явления в каждом отдельном случае (толщина оксидной плёнки, химический состав оксида, чистота рабочей жидкости и т.д.).

По количеству эмитированных электронов из металла катода можно судить о концентрации электронов в материале, напряжённости электрического поля и наличии оксидной плёнки на поверхности металла. Под действием электрического поля они начинают двигаться к аноду, сталкиваясь с окружающими их молекулами и передавая им часть кинетической энергии, получаемой из поля.

Дифференцируют 2 типа столкновений электронов с жидкими частицами: упругими и неупругими (ионизациями). Упругие столкновения характеризуются законом сохранения импульса. Таким образом, электрон, пересекая расстояние свободного пробега, передаёт импульс (или часть импульса), сохранённый из внешнего поля, в неподвижную молекулу. Молекула жидкости условно стационарна, потому что она $v_e \gg v_m$. Длина свободного пробега составляет

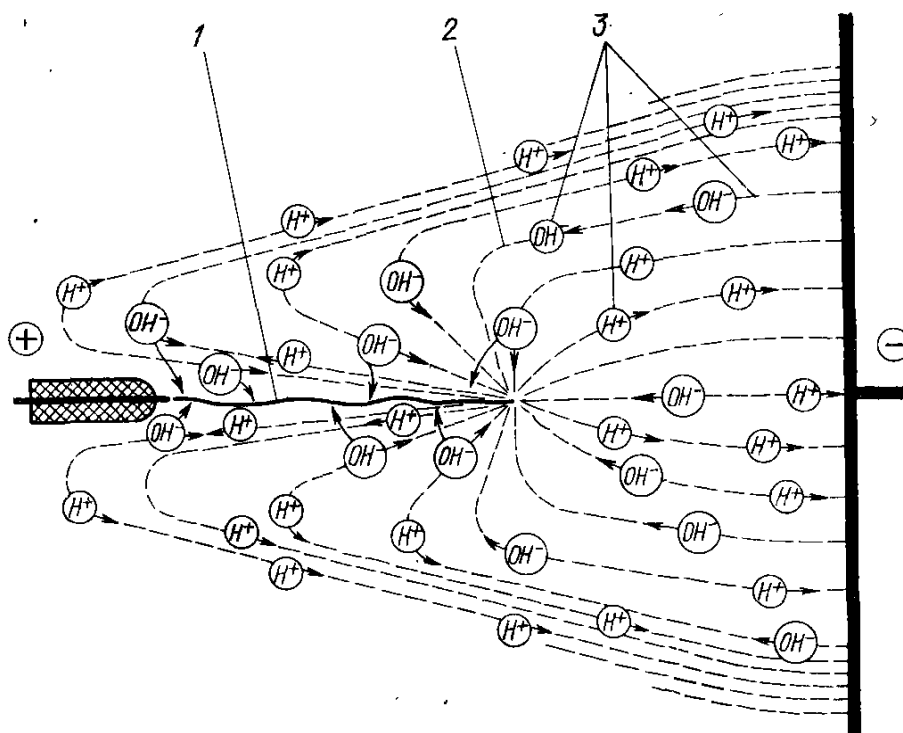
$$l = \frac{v}{\nu} = \frac{1}{N\sigma},$$

где v – скорость движения электрона (зависит от E); ν – частота столкновений; N – плотность жидкости; σ – площадь эффективного сечения молекулы (табличное значение).

В результате столкновения средняя скорость молекул в прикатодной области немного увеличивается. Упругие столкновения продолжаются до тех пор, пока электроны не будут ускорены до такой скорости, что они могут создавать неупругие столкновения с молекулами жидкости.

Неупругое столкновение электронов начинается, когда электрон набирает достаточный импульс во время свободного пробега l , чтобы ионизировать молекулу, встречающуюся на его пути. Затем, попадая в область эффективного сечения электрона, выдувает электрон молекулы, тем самым ионизируя молекулу. В результате этого столкновения образуются 2 электрона, которые снова ускоряются под действием внешнего поля, и один «тяжёлый» ион молекулы, который начинает двигаться в направлении, противоположном движению электронов, а также ускорение в электрическом поле. Не набирая достаточную массу, электроны будут немного увеличивать тепловую скорость других молекул или, набирая достаточный импульс, будут продолжать ионизировать молекулы жидкости, создавая тем самым развитие разрядного канала в виде стримера. Ион молекулы, полученный в результате столкновения, благодаря своей инерции (массе) не сможет набрать достаточный импульс для ионизации, повысит тепловую скорость движения жидких частиц. Однако в отличие от электронов масса иона значительно больше, поэтому его вклад в повышение температуры жидкости выше. Встречая молекулы жидкости на своём пути, ион увеличивает их скорость, тем самым повышая температуру жидкости. Благодаря локализации этого процесса в пространстве, в определённой области часть жидкости меняет своё агрегатное состояние с жидкого на газообразное. Этот факт подтверждается всеми экспериментами (обычно на поверхности катода образуются пузырьки газа).

Этот переход сильно влияет на дальнейшее развитие разряда, т.к. плотность газа значительно ниже плотности жидкости. Известно, что с уменьшением плотности длина пробега увеличивается, что при внешнем магнитном поле означает, что электрон будет набирать большую скорость и импульс на длине пробега и, следовательно, с большей вероятностью ионизировать другие молекулы жидкости, и процесс повторяется. Рис. 1 хорошо иллюстрирует движение электронов и ионов в воде [5].



1 – растущий стример, 2 – силовые линии поля, 3 – направление движения иона
 Рис. 1. Схематичное представление о развитии канала разряда

Как правило, стример переходит уже не столько в жидкость, сколько в газожидкостную среду. Скорость стримера чрезвычайно велика и иногда достигает 10^7 м/с. Развитие основного канала разряда происходит намного медленнее. Канал развивается вдоль пути стримера (в сла-

боионизованной плазме), который, пересекая межэлектродный промежуток (МЭП), рассеивается в прианодной области за счёт объёмного положительного заряда ионов.

Когда разрядный канал на аноде закрыт, в разрядном канале возникает низкотемпературная плазма, которая из-за приложенной разности потенциалов начинает расширяться, продолжая ионизировать окружающий слой. Температура и давление внутри канала увеличиваются на несколько порядков по мере его развития. Повышение давления и температуры вызывает ускоренное увеличение диаметра выпускного канала. При этом поверхность катода и анода нагревается от контакта с разрядным каналом. Высокая температура и давление расплавляют и испаряют небольшое количество металла за короткое время. Практически мгновенный нагрев сводит к минимуму количество тепла, отводимого от электрода заготовки посредством теплопроводности и излучения.

В тот момент, когда подача напряжения на МЭП прекращается, расширение канала постепенно замедляется, и через некоторое время начинается резкое сужение (так называемый «коллапс») под действием давления жидкости, окружающей канал. Некоторое количество расплавленного и испарённого металла из прикатодной и прианодной областей поглощается вакуумом, создаваемым в месте разрядного канала. В то же время этот объём металла охлаждается чрезвычайно быстро. В результате этого, а также высокой пластичности и химической активности металлические частицы окисляются и сливаются в так называемые оксидные усы [7; 8].

Как видно из графиков на рис. 2, температура алюминиевого сплава АК-4 и титанового сплава ОТ-4 значительно превышает температуру обработки при тех же режимах стали 45 (электроэрозионная обрабатываемость которых теоретически принята за 1). Однако если для титанового сплава это явление может быть объяснено более высокой плотностью, более низкой теплопроводностью, более высокой теплоёмкостью, что в совокупности приводит к концентрации тепловой энергии в области контакта материала заготовки с разрядным каналом, то для алюминиевого сплава это явление нельзя объяснить таким же образом. Алюминий обладает высокой теплопроводностью и низкой теплоёмкостью, что должно способствовать отводу тепла от зоны обработки. Но этого не происходит, что свидетельствует о существенных различиях в механизме разрушения алюминиевого сплава.

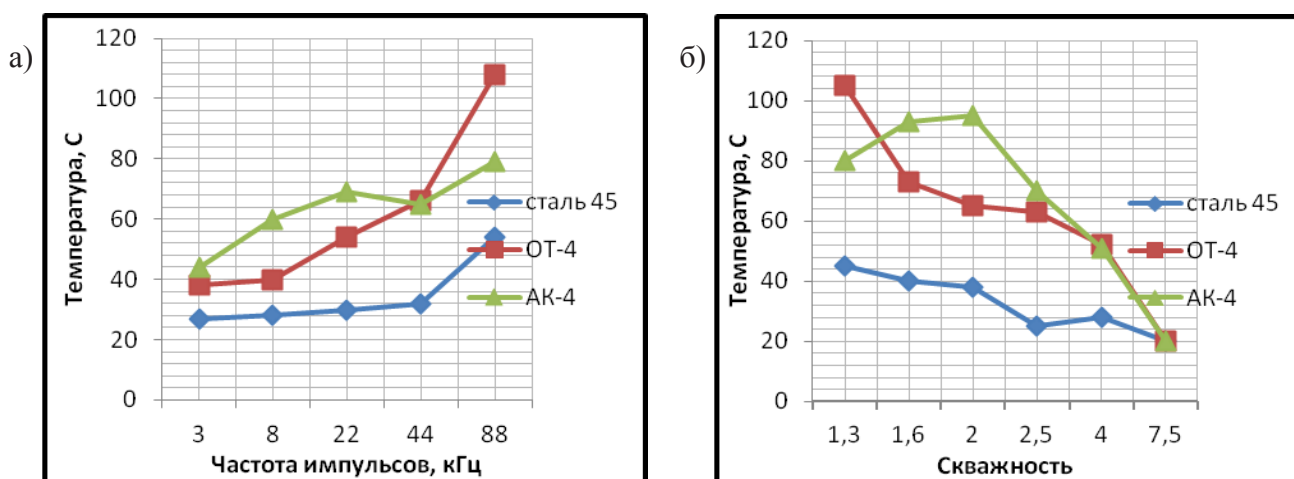


Рис. 2. Зависимость температуры от изменения частоты импульсов (а) и скажности (б)

Особенности электроэрозионной обработки титановых и алюминиевых сплавов

Обработка алюминиевых и титановых сплавов имеет свои яркие особенности. Ранее тепловые явления изучались при обработке трёх типов материалов: сталь 45, титановый сплав ОТ-4, алюминиевый сплав АК-4. По результатам исследований были сделаны выводы о факторах, влияющих на изменение температуры при электроэрозионной обработке [9].

По нашим данным было видно, что ситуация с концентрацией тепловой энергии в алюминиевом сплаве аналогична титановому сплаву, а в течение некоторого времени даже несколько

больше. Это очень парадоксальное явление с учётом того факта, что коэффициент теплопроводности алюминия на порядок выше, чем у титана, и почти в 3 раза больше, чем у стали. Кроме того, алюминиевый сплав имеет очень высокий коэффициент удельной теплоёмкости, который указывает количество тепловой энергии. Всё это свидетельствует о том, что сплавы алюминия и его процесс разрушения имеют свои особенности, обуславливающие концентрацию тепловой энергии в зоне обработки. Логично предположить, что это обусловлено влиянием материала электрода на процесс пробоя.

Наиболее вероятной причиной этой аномалии является искажение поля в зазоре «усами», образованными из оксидной плёнки, когда она разрывается во время разряда. Появление этих оксидных усов оправдано высокой химической активностью самого материала, а с учётом высокой температуры расплавленного металла в зоне скважины образование усов из оксида алюминия занимает чрезвычайно короткое время. Титан обладает аналогичной окислительной способностью, однако из-за высокого коэффициента удельной теплоёмкости и низкого коэффициента теплопередачи количество нагретого реакционноспособного титана меньше, а также размеры оксидной проволоки меньше. Соответственно, влияние этой связи на процесс разрушения меньше.

Анализ состояния электродов в процессе измерений показывает, что на алюминиевых и титановых электродах последующие разряды осуществляются, как правило, с краёв кратера, образовавшегося при первом пробое. Образование кратеров на электродах из других материалов не вызывает образования «усов», и практически каждый последующий образец происходит с новой части поверхности электрода. Это явление наблюдалось во всех экспериментах в однородных или слабо неоднородных полевых условиях.

Для подтверждения этого предположения были проведены экспериментальные исследования на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40-440М. В качестве материала электрода использовался медный электрод М1, а в качестве обработанных материалов – тот же титановый сплав ОТ-4 и алюминиевый сплав АК-4. Для получения максимального информационного значения при минимальном объёме экспериментальной работы использовался метод математического планирования эксперимента, в частности по методу полнофакторного эксперимента.

Из всего многообразия факторов, влияющих на технологические показатели обработки, можно выбрать следующие: X_1 – количество гребней в импульсе, X_2 – количество силовых транзисторов в схеме, X_3 – скважность, X_4 – частота следования импульса. Названная совокупность факторов удовлетворяет требованиям совместимости и отсутствия линейной корреляции. В качестве результирующих функций были приняты: Y_1 – производительность обработки, Y_2 – массовый износ электрода-инструмента, Y_3 – шероховатость обработанной поверхности.

Данные были обработаны по методике многофакторного эксперимента, в результате чего получены следующие уравнения:

- при обработке ОТ-4:

$$Y_1 = 101,75 + 11,125 \cdot X_1 + 44,5 \cdot X_2 - 39,25 \cdot X_3 + 74,5 \cdot X_4 + 22,625 \cdot X_1 \cdot X_2 - 7,375 \cdot X_1 \cdot X_3 + 8,875 \cdot X_1 \cdot X_4 - 14,5 \cdot X_2 \cdot X_3 + 34,25 \cdot X_2 \cdot X_4 - 37,0 \cdot X_3 \cdot X_4 - 21,375 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 19,875 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - 7,625 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 16,75 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 23,625 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4;$$

$$Y_2 = 8,25 - 1,125 \cdot X_1 + 0,25 \cdot X_2 + 1,25 \cdot X_3 + 0,375 \cdot X_4 + 0,375 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,375 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,5 \cdot X_1 \cdot X_4 - 1,25 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,875 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,125 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,375 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,0 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,625 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4;$$

$$Y_3 = 2,325 + 0,0125 \cdot X_1 + 0,025 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_3 + 0,6125 \cdot X_4 - 0,0125 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,1125 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,075 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,15 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,1125 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,1125 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,05 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,1125 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,075 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4;$$

- при обработке алюминиевого сплава АК-4:

$$Y_1 = 404,188 + 24,1875 \cdot X_1 + 21,6875 \cdot X_2 + 13,1875 \cdot X_3 + 140,938 \cdot X_4 + 18,9375 \cdot X_1 \cdot X_2 + 8,6875 \cdot X_1 \cdot X_3 - 14,3125 \cdot X_1 \cdot X_4 + 11,4375 \cdot X_2 \cdot X_3 - 7,5625 \cdot X_2 \cdot X_4 - 69,0625 \cdot X_3 \cdot X_4 - 11,3125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,5625 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 - 18,3125 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 8,3125 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 9,8125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4;$$

$$\begin{aligned} Y_2 = & 5,125 - 0,5 \cdot X_1 + 0,125 \cdot X_2 + 0,25 \cdot X_3 + 1,75 \cdot X_4 + 0,0 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,125 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ & - 0,625 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,25 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,25 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,125 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - \\ & - 0,125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0001 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,125 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4; \\ Y_3 = & 4,45625 + 0,01875 \cdot X_1 + 0,23125 \cdot X_2 + 0,24375 \cdot X_3 + 0,85625 \cdot X_4 + 0,06875 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,15625 \cdot X_1 \cdot X_3 - \\ & - 0,15625 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,31875 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,00625 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,13125 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ & - 0,04375 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,03125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,10625 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + 0,21875 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\ & + 0,08125 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \end{aligned}$$

Были определены коэффициенты регрессии.

Анализ разработанной нами линейной модели показал, что гипотеза адекватности может быть принята с уровнем достоверности 95 %, поскольку критерий Фишера не превышает табличного значения.

Заключение по результатам исследования

Проведённый анализ процессов, протекающих на катодной и анодной областях в процессе размерной электроэрозионной обработки, показал важную роль плазменного разрядного столба. Представленный плазменный полюс описан как объект регулирования, показаны энергетические и геометрические параметры, позволяющие на него воздействовать. Также определены причины, определяющие некую полярность ЭЭО. Химические реакции, возникающие при электрическом воздействии, происходят одновременно в жидкой и плазменной фазе. Химические процессы в плазменной и жидкой фазах существенно отличаются друг от друга: в жидкой фазе развивается цепной радикальный процесс, а в газовой фазе – плазмохимический процесс, характеризующийся начальной фрагментацией и последующей рекомбинацией образовавшихся фрагментов.

Кроме того, представленные исследования позволили выявить особенности электроэрозионной обработки титановых и алюминиевых сплавов, заключающиеся в особом механизме разрушения этих материалов ввиду высокой химической активности. Было обнаружено, что наиболее значимыми параметрами обработки, влияющими на производительность, шероховатость и износ электродного инструмента при электроэрозионной обработке, являются частота импульсов и рабочий цикл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 43 с.
2. Красюк, В. А. О физических процессах, лежащих в основе электрических методов обработки / В. А. Красюк // Электрические методы обработки. – М.: Машгиз, 1951. – С. 53-58.
3. Лазаренко, Б. Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко. – М.: АН СССР, 1958. – 300 с.
4. Сканава, Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г. И. Сканава. – М.: Физматгиз, 1958. – 907 с.
5. Сариллов, М. Ю. Исследование плазменного канала и механизма теплопередачи в процессе электроэрозионной обработки / М. Ю. Сариллов, А. М. Злыгостев // Вестник ТОГУ. – 2011. – № 2. – С. 43-50.
6. Сариллов, М. Ю. Исследования пробоя диэлектрической жидкости как источника совершенствования электроэрозионной обработки / М. Ю. Сариллов, А. С. Линева // Известия самарского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 570-574.
7. Сариллов, М. Ю. Исследование процессов электроэрозионной обработки / М. Ю. Сариллов, В. В. Мельников // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – Вып. 6. – С. 893-898.
8. Сариллов, М. Ю. Исследование процессов в межэлектродном промежутке при электроэрозионной обработке алюминиевых и титановых сплавов / М. Ю. Сариллов, У. Е. Решетник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2019. – № III-1(39). – С. 101-108.
9. Линева, А. С. Влияние процесса электроискрового разряда на эффективность электроэрозионной обработки алюминиевых и титановых сплавов / А. С. Линева, М. Ю. Сариллов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2015. – № II-1(22). – С. 57-65.
10. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда: учеб. рук. для вузов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
11. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 258 с.

Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Буравицын Д. А.

E. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. E. Schelkunova, D. A. Buravitsyn

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОМПОНОВОК МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ

TRANSFORMATION OF LAYOUTS OF PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS IN RECONFIGURATION PROCESS

Щелкунов Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ktm@knastu.ru.

Mr. Evgeny B. Shchelkunov – PhD in Engineering, Associate Professor, Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ktm@knastu.ru.

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681000, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Кирова, д. 17, корп. 2. E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Mr. Sergey V. Vinogradov – PhD in Engineering, Associate Professor, Information Security, Information Systems and Physics Department, Amur State Humanitarian Pedagogical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681000, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, ul. Kirova, d. 17, bild. 2. E-mail: sergwin72@rambler.ru.

Щелкунова Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Ms. Marina E. Shchelkunova – PhD in Engineering, Associate Professor, Mathematical Software and Computer Applications Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Буравицын Дмитрий Александрович – студент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Dmitry A. Buravitsyn – Student, Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave.

Аннотация. В данной работе на примере механизма параллельной структуры типа гексапод рассмотрены этапы изменения его компоновки в процессе реконфигурирования. При исследовании использован расчётный метод Якоби. Применена классификация компоновок механизмов параллельной структуры по типам размещения приводных штанг в механизме.

Summary. In this paper, the stages of changing its layout during reconfiguration are considered on the example of a parallel structure mechanism of a hexapod type. In the study, the Jacobi calculation method was used. The classification of layouts of mechanisms of a parallel structure by the types of placement of the drive rods in the mechanism is applied.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, штанга, компоновка, реконфигурирование.

Key words: parallel structure mechanism, rod, layout, reconfiguration.

УДК 621.01

Введение

Одной из тенденций современного машиностроения является облегчение конструкций исполнительных механизмов, в которых рабочий орган мог бы выполнять максимум рабочих и вспомогательных движений. Такими механизмами являются разнообразные рычажно-шарнирные механизмы параллельной структуры (МПС).

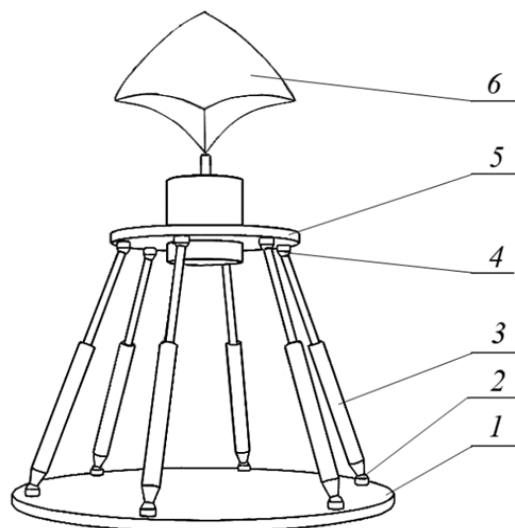


Рис. 1. Схема гексапода

При различных вариантах размещения приводных штанг и направляющих в МПС могут образовываться различные компоновки.

В работах [1; 2; 4] предложена классификация компоновок МПС по типам размещения приводных штанг в механизме. По этой классификации размещение приводных штанг может быть:

- равномерным;
- попарно-параллельным;
- ферменным;
- другим симметричным;
- зеркально-симметричным;
- асимметричным.

На рис. 1 показана схема наиболее распространённого МПС типа гексапод. Механизм состоит из неподвижного основания 1, подвижной платформы 5 с рабочим органом и соединяющих их с помощью шарниров 2 и 4 приводных штанг 3. Подвижная платформа с рабочим органом совершает рабочие и вспомогательные перемещения внутри области 6, являющейся рабочим пространством механизма.

Разновидностью данных механизмов являются МПС с возможностью реконфигурирования [1; 2], т.е. изменения компоновочных параметров механизма.

На рис. 2 показан пример МПС с возможностью реконфигурирования станка на базе механизма гексапод. Реконфигурирование выполняется смещением шарниров приводных штанг, установленных на каретках 2 по направляющим 1 на основании. Смещение шарниров по направляющим изменяет радиус основания и, соответственно, размеры рабочего пространства [3].

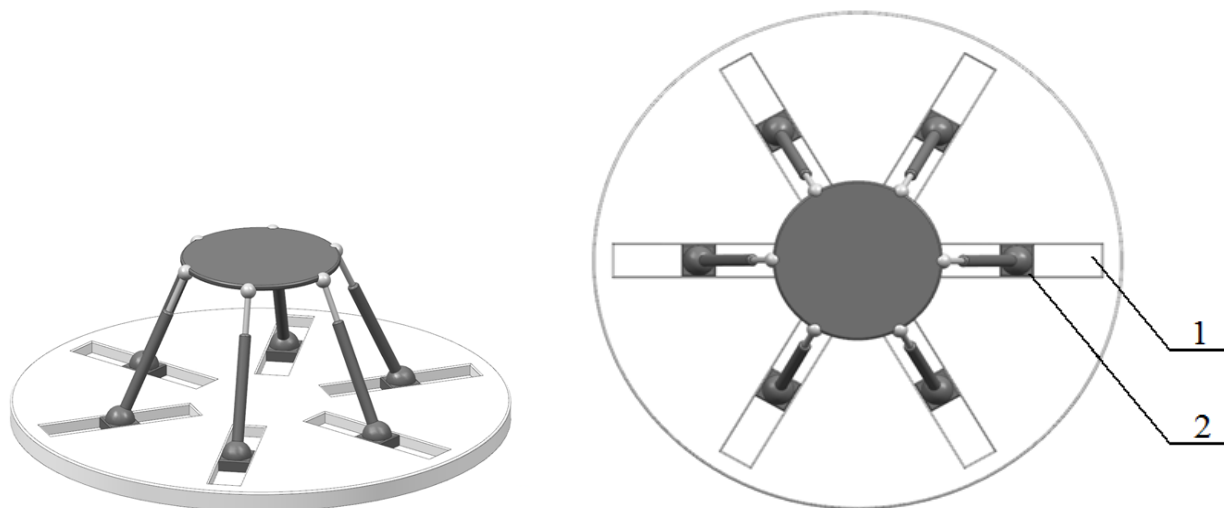


Рис. 2. МПС с возможностью реконфигурирования

Тип компоновки определяется углами размещения шарниров приводных штанг на основании и подвижной платформе. В МПС с возможностью реконфигурирования при перемещении шарниров основания по направляющим происходит изменение углов их расположения и расстояний между ними, что может привести к изменению типа компоновки МПС.

Данная работа посвящена изучению этапов преобразования компоновок МПС в процессе реконфигурирования.

Методика исследования

Для исследования выбран МПС типа гексапод с возможностью реконфигурирования. Расположение направляющих выбрано таким образом, чтобы при перемещении по ним шарниров приводных штанг тип компоновки менялся несколько раз.

На рис. 3 и 4 представлены геометрические параметры основания МПС с направляющими и подвижной платформы.

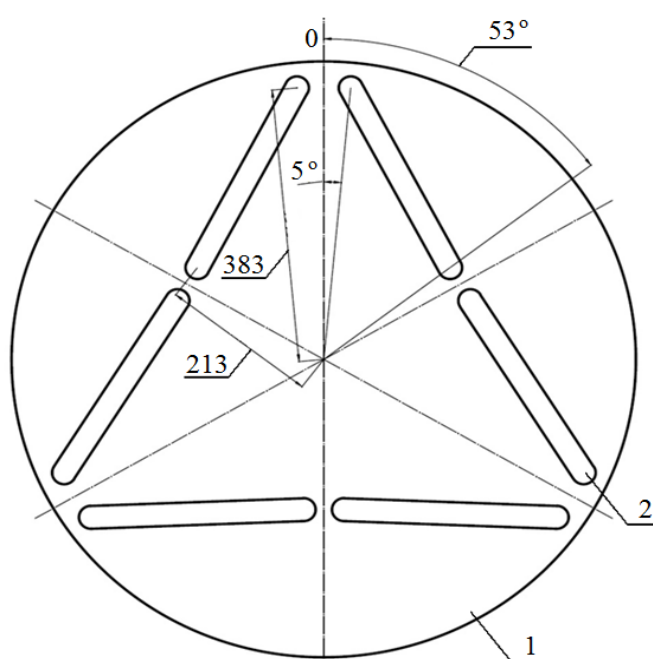


Рис. 3. Параметры основания

В основании 1 (см. рис. 3) симметрично расположены направляющие 2, по которым могут перемещаться шарниры приводных штанг. Расположение направляющих обеспечивает изменение радиуса основания в пределах 170 мм, изменение углов размещения шарниров – в пределах 48° .

Параметры подвижной платформы (см. рис. 4) постоянны. Радиус платформы 85 мм, шарниры расположены парами.

Приводные штанги имеют длину $L_{\min} = 500$ мм и $L_{\max} = 750$ мм.

Исследование проводилось расчётным методом, изложенным в работе [5] с помощью оригинальной программы [6].

В ходе расчёта для каждой из множества рассматриваемых компоновок МПС определялся объём рабочего пространства.

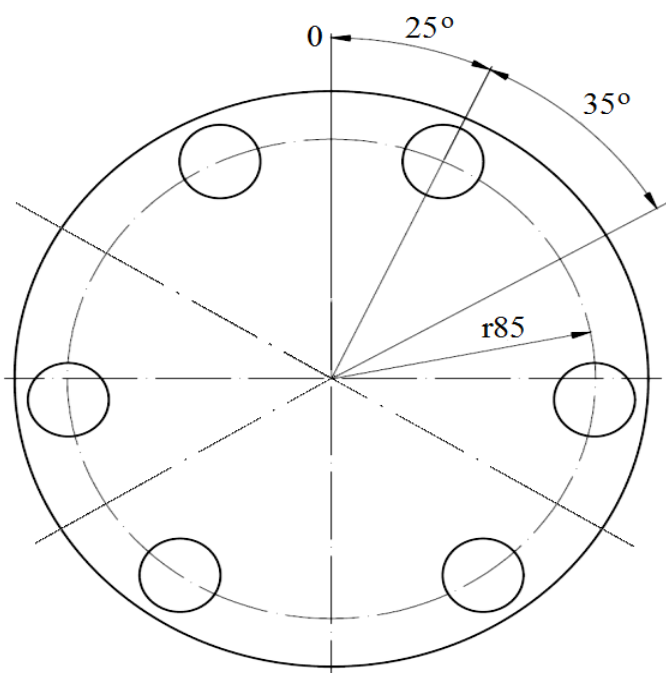


Рис. 4. Геометрические параметры платформы

Результаты исследования

В табл. 1 представлены параметры компоновок и результаты расчёта объёма рабочего пространства.

Таблица 1

Результаты расчёта

Тип компоновки	Радиус основания, мм	Расстояние между основанием и платформой, мм	Параметры рабочего пространства		
			Высота рабочего пространства, мм	Объём рабочего пространства, мм ³	Максимальная площадь сечения, мм ²
Ферменная 1	213	483	252	70 772 399	532 869
Ферменная 3	216	483	252	74 251 041	553 099
Симметричная 1	217	482	252	74 672 227	555 595
Симметричная 2	381	403	281	26 276 126	225 877
Попарно-параллельная	383	402	281	26 043 891	225 417

Результаты исследования показывают, что перемещение шарниров основания по направляющим приводит к изменению формы и размеров рабочего пространства механизма. Ранее было установлено [7], что форма рабочего пространства МПС зависит от типа его компоновки.

У выбранной компоновки МПС с возможностью реконфигурирования перемещение шарниров основания по направляющим приводит к последовательному изменению типа компоновки в следующем порядке:

1. ферменная (см. рис. 5, а);
2. симметричная (см. рис. 5, б, в, г);
3. попарно-параллельная (рис. 5, д).

«Ферменной» (первоначальной) компоновке соответствуют компоновки с радиусами основания от 213 до 216 мм (см. рис. 5, а).

Компоновке с симметричным размещением приводных штанг (см. рис. 5, б, в, г) принадлежит наибольшее количество вариантов: компоновки с радиусами основания от 217 до 381 мм.

При радиусе основания равном 383 мм образуется компоновка с попарно-параллельным размещением приводных штанг (см. рис. 5, д).

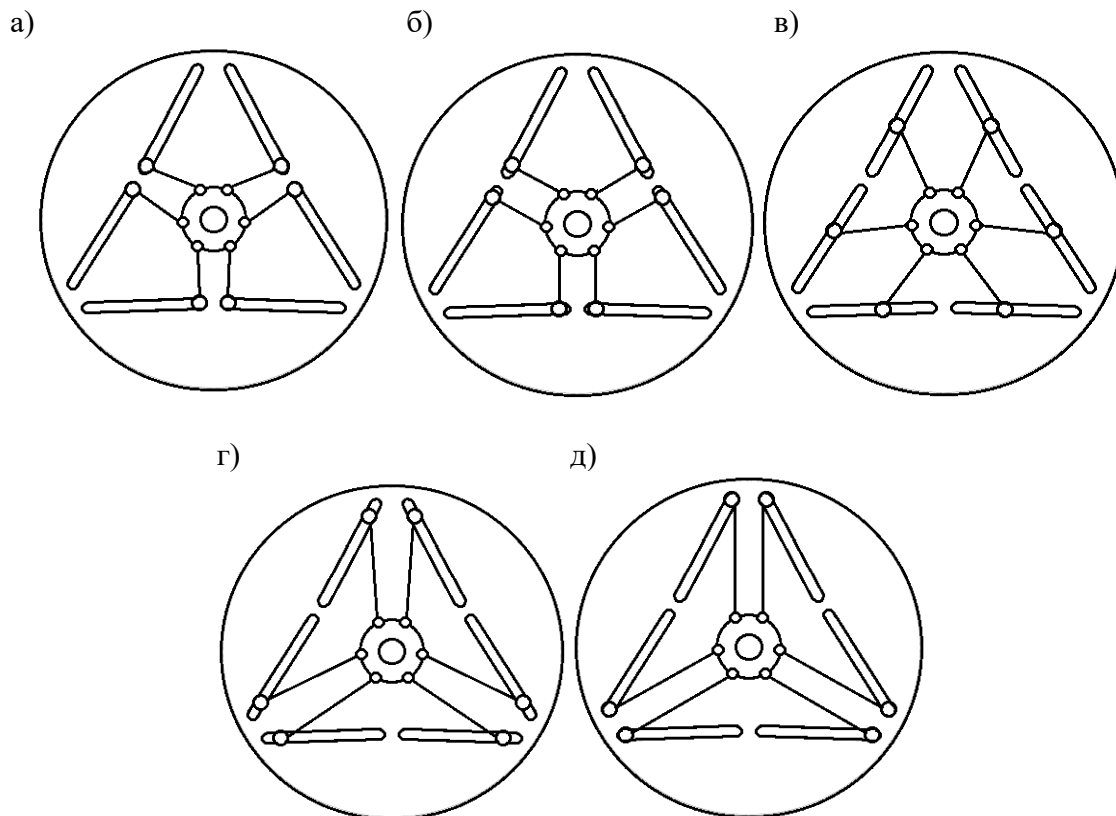


Рис. 5. Этапы преобразования компоновки

Исследование параметров рабочего пространства показывает, что его размеры увеличиваются от ферменной компоновки 1 к симметричной 1, у которой непарные приводные штанги расположены параллельно. Увеличение размеров рабочего пространства объясняется тем, что при данных геометрических параметрах МПС компоновка симметричная 1 обладает наибольшей подвижностью шарниров.

При дальнейшем возрастании радиуса основания увеличивается и угол расхождения приводных штанг, возможные углы наклона их и, как следствие, увеличение высоты рабочего пространства. Длина, ширина и объём рабочего пространства при этом уменьшаются.

Общая высота рабочего пространства механизма составляет 334 мм. Изменение радиуса основания позволило увеличить высоту рабочего пространства механизма на 82 мм, что составляет 33 % от первоначального размера, соответствующего компоновке ферменная 1.

Заключение

В данной работе на примере гексапода рассмотрены этапы преобразования компоновок МПС в процессе реконфигурирования.

При заданных параметрах МПС перемещение шарниров основания по направляющим обеспечило последовательное изменение типа компоновки в следующем порядке: ферменная – симметричная – попарно-параллельная. Смена компоновки вначале вызывает возрастание объёма рабочего пространства, а затем его постепенное уменьшение.

При реконфигурировании увеличение радиуса основания на 80 % обеспечило увеличение высоты рабочего пространства на 33 % от первоначального размера.



ЛИТЕРАТУРА

1. Применение шаблонов вычислений при проектировании механизмов параллельной структуры / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, А. И. Пронин, М. Е. Щелкунова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 9. – С. 427-431.
2. Формализация расчётов при определении компоновочных параметров механизмов параллельной структуры / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, А. И. Пронин // Вестник машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 30-35.
3. Буравицын, Д. А. Применение механизмов параллельной структуры с возможностью реконфигурирования в металлообрабатывающих станках / Д. А. Буравицын, Е. Б. Щелкунов // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г.: в 4 ч. / редкол.: Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ, 2019. – Ч. 1. – С. 53-55.
4. Автоматизация проектирования механизмов параллельной структуры со штангами переменной длины / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, Д. Г. Посаженников // Технология машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 51-55.
5. Янг, Д. Исследование кинематики манипуляторов платформенного типа / Д. Янг, Т. Ли // Конструирование. – 1984. – № 2. – С. 264-272.
6. Программа для проектирования механизмов параллельной структуры / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, А. И. Пронин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2015. – № IV-1(24). – С. 46-49.
7. Рабочее пространство механизма параллельной структуры типа гексапод / Е. Б. Щелкунов, С. В. Виноградов, М. Е. Щелкунова, А. И. Пронин, Т. В. Мурыгин, Д. О. Семенов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1(34). – С. 69-74.

Самар Е. В.
E. V. Samar

ВЛИЯНИЕ СМАЗКИ НА КОНТАКТНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

INFLUENCE OF LUBRICATION ON CONTACT DEFORMATION PROCESSES IN THE CUTTING AREA

Самар Елизавета Владимировна – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: esamar@inbox.ru.

Elizaveta V. Samar – Post-graduate Student, Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: esamar@inbox.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния смазки на контактно-деформационные процессы в зоне резания. Исследовалась структура приповерхностного слоя стали 45. В работе показано, что смазочно-охлаждающая технологическая среда (СОТС) оказывает значительное влияние на контактные процессы резания, изменяя структуру и свойства тонких приповерхностных слоёв. Рассмотрены основные механизмы влияния СОТС на деформационные процессы в зоне резания.

Summary. The article presents the results of a study of the effect of lubricant on contact-deformation processes in the cutting area. The structure of the surface layer of steel 45 was studied. It is shown that the lubricating-cooling process medium (COTS) has a significant effect on contact cutting processes, changing the structure and properties of thin surface layers. The basic mechanisms of the influence of SOTS on deformation processes in the cutting zone are considered.

Ключевые слова: процесс резания, пластическая деформация, смазочно-охлаждающая технологическая среда, вторичные структуры, микротвёрдость.

Key words: cutting process, plastic deformation, cutting fluid, secondary structures, microhardness.

УДК 621.9.026

Введение. Поверхностные слои инструментального и обрабатываемого материала в процессе резания постоянно взаимодействуют с окружающей их средой, которая может оказывать значительное влияние на контактные процессы стружкообразования, изменять структуру и свойства тонких приповерхностных слоёв.

Смазочно-охлаждающая технологическая среда (СОТС) влияет на протекание процесса резания как за счёт охлаждения инструмента и заготовки, так и за счёт уменьшения трения между контактирующими поверхностями, что в конечном итоге приводит к повышению качества обработанной поверхности. Влияние СОТС на процесс резания с позиции уменьшения коэффициента трения следует рассматривать как совокупное действие следующих явлений: образования на границе раздела смазочных плёнок и модификации рабочих поверхностей инструмента компонентами СОТС. Образование смазочных плёнок происходит в результате химической реакции между атомами, ионами и радикалами, образующимися при разрушении молекул СОТС, и металлическими поверхностями в зоне контактного взаимодействия. Модификация рабочих поверхностей инструментального материала происходит в результате диффузии компонентов СОТС через ювелирные поверхности инструментального материала. В результате изменения физико-механических характеристик поверхностных слоёв металла происходит изменение условий контактного взаимодействия. В работе [1] отмечается, что в результате диффузионных процессов в приповерхностных слоях наблюдается образование новых фаз, которые оказывают непосредственное влияние на трибологические процессы в зоне контактного взаимодействия.

Пластическая деформация контактных поверхностей приводит к повышению плотности дефектов кристаллического строения. Дефекты кристаллического строения рассматриваются как потенциальные очаги образования адгезионных связей. Возникающие первичные связи становятся активными каналами массопереноса и способствуют образованию химических и других соединений, приводящих в конечном итоге к повышению сил адгезии [2].

Снижение активности адгезионных центров происходит за счёт взаимодействия поверхностных дефектов кристаллического строения с продуктами разложения СОТС, в состав которых входят поверхностно-активные вещества, антифрикционные присадки и различные соли, повышающие теплофизические свойства масляной или водной основы.

Продукты разложения СОТС, осаждаясь на участках поверхности с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения, изменяют условия контактно-фрикционного взаимодействия и тем самым оказывают влияние на качество обработанной поверхности. В процессе резания возможно образование вторичных структур, которые представляет собой слой островковых наростов, покрытых адсорбционными плёнками. Под наростами располагается подповерхностный слой материала с изменённой структурой, модифицированной в результате пластической деформации и температурного воздействия [3; 4].

Рассмотрим влияние СОТС на контактно-деформационные процессы в зоне контактного взаимодействия.

Методика исследования. Исследованию подвергалась поверхность обрабатываемого материала из стали 45, полученная при точении в сухую и с использованием следующих технологических сред: вода, масло рапсовое, масло промышленное И-20. Режимы резания при точении стали 45: $v = 50$ м/мин, $s = 0,2$ мм/об, $t = 1$ мм. Подача масляных СОЖ осуществлялась в зону резания в распылённом виде в соответствии с технологией минимального смазывания (ТМС).

Для исследования структурного состояния обрабатываемого материала применялись методы металлографического и металлофизического анализов.

Изготовление шлифов, предназначенных для металлографических исследований, осуществлялось на станке модели Buehler EcoMet 250 Pro. Для предотвращения искажений исследуемых структур во время травления протравленные шлифы промывались свободным погружением в этиловый спирт с последующей просушкой на воздухе.

Микротвёрдость обработанной поверхности определялась на микротвёрдомере НМВ-2 SHIMADZU.

Результаты исследования. Глубина поверхностного слоя обрабатываемого материала, подвергнутого пластической деформации, является одним из основных параметров, характеризующих интенсивность адгезионных процессов между рабочими поверхностями инструмента и обработанной поверхностью. На рис. 1 представлены фотографии микроструктуры приповерхностных слоёв обработанной поверхности с использованием различных видов смазок при точении со скоростью 50 м/мин.

На представленном рисунке видно, что зона пластически деформированного металла, характеризующаяся изменением ориентации зёрен, расположена в приповерхностном слое. Изменение ориентации зёрен происходит вследствие процессов, происходящих в зоне первичных пластических деформаций и зонах контактного взаимодействия. При этом решающее влияние на качество обработанной поверхности оказывают процессы, происходящие в зоне контактного взаимодействия по задней поверхности режущего инструмента (РИ).

На основе микроструктур, представленных на рис. 1, были построены графики изменения глубины зоны пластически деформируемого металла и степени деформации приповерхностного слоя заготовки от вида используемой смазки (см. рис. 2, 3). Степень деформации текстуры характеризует величину касательных напряжений в зоне контактного взаимодействия. Оценить степень деформации можно по котангенсу угла наклона текстуры. С увеличением котангенса угла касательные напряжения в зоне резания возрастают.

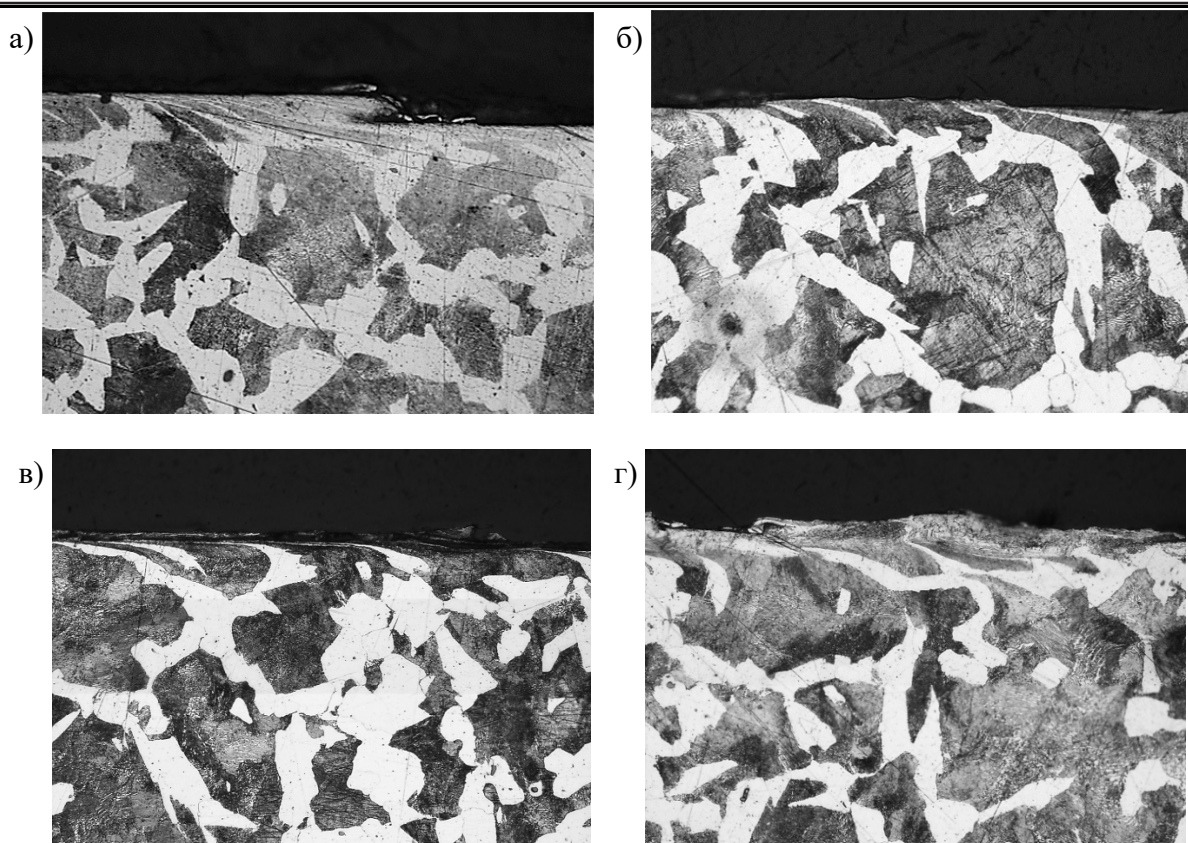


Рис. 1. Фотографии обработанной поверхности со скоростью 50 м/мин с использованием следующих видов смазок: а – всухую; б – вода; в – рапсовое масло; г – И-20

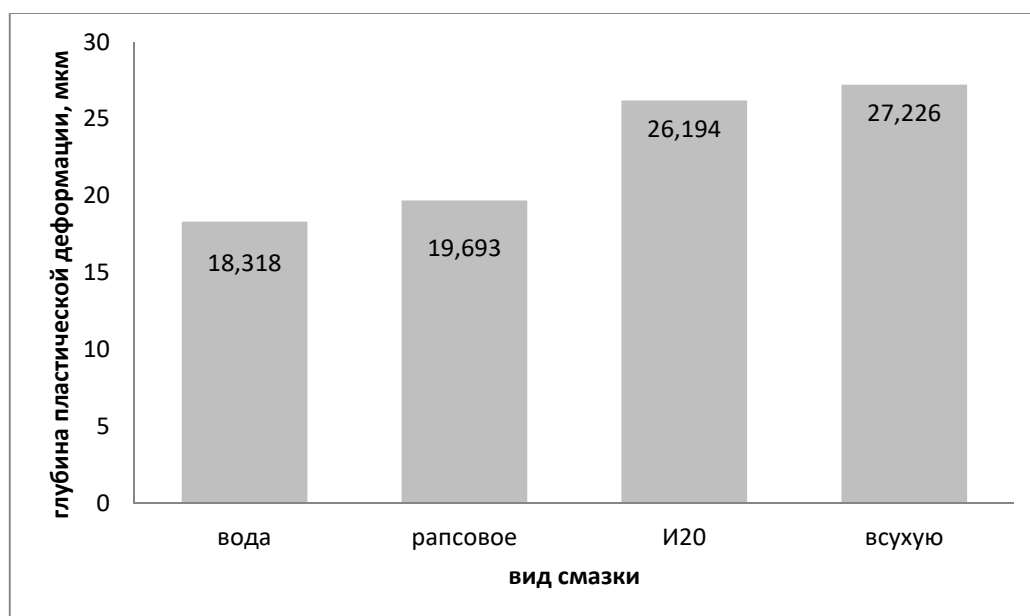


Рис. 2. Изменение глубины пластически деформированного слоя от вида используемой смазки со скоростью резания 50 м/мин

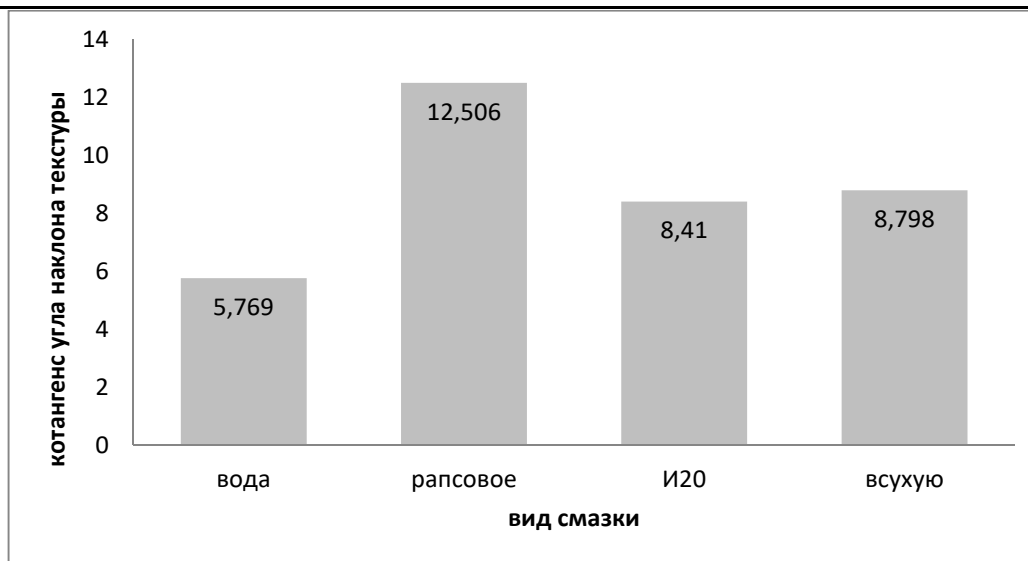
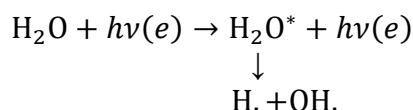


Рис. 3. Изменение угла наклона текстуры в приповерхностном слое обрабатываемого металла от вида используемой смазки со скоростью резания 50 м/мин

Глубина залегания деформированного объёма материала зависит от вида применяемой смазки. Наибольшая глубина пластически деформированного металла образуется при точении стали 45 всухую. Процесс резания всухую характеризуется высоким коэффициентом трения в зонах контактного взаимодействия. При резании всухую происходит торможение сходящей стружки по передней поверхности РИ из-за образования адгезионных связей в области контакта, объём пластически деформированного металла возрастает. Вследствие скольжения задней поверхности РИ по обработанной поверхности заготовки происходит дополнительное деформирование зёрен в направлении вектора скорости резания.

Основной эффект от использования в качестве СОТС воды заключается в охлаждении зоны резания. При этом глубина и степень деформации приповерхностных слоёв обрабатываемого металла принимает минимальное значение в сравнении с остальными смазками. Это можно объяснить образованием окисных плёнок, снижающих активность адгезионных центров. Под действием высоких температур при взаимодействии воды с ювенильно-чистой поверхностью обрабатываемого материала происходит образование перекисных радикалов по следующей реакции [1]:



где $h\nu(e)$ – энергия (электрон), эмитируемая ювенильной поверхностью; H_2O^* – возбуждённые молекулы воды; $\text{H} \cdot$, $\text{OH} \cdot$ – химические радикалы.

При взаимодействии радикалов образуется перекись водорода, способная выделять активный кислород. При взаимодействии атомов кислорода с металлом происходит образование окисных плёнок, которые экранируют контакт химически активных ювенильных поверхностей инструментального и обрабатываемого материала.

При использовании рапсового растительного масла объём пластически деформированного металла приповерхностного слоя принимает одно из минимальных значений, но при этом возрастает степень деформации приповерхностного слоя.

При подаче масляных СОЖ в зону резания в распылённом виде поверхностно-активные вещества (ПАВ) из масел быстрее проникают в зону резания по сравнению с подачей СОЖ путём полива, что способствует снижению коэффициента трения и ослаблению выделения теплоты в зоне контактного взаимодействия.

Характер распределения пластически деформированного объёма обрабатываемого металла при использовании смазки на основе масла можно объяснить эффектом Ребиндера, согласно которому ПАВ, проникая в микротрещины и поры на поверхности металла, понижают поверхностную энергию металла, способствуя зарождению пластических сдвигов и развитию дефектов при значительно меньших напряжениях.

Использование в качестве смазки рапсового масла, по сравнению с И-20, обеспечивает лучший смазывающий эффект. Преимущество применения масла на растительной основе в сравнении с минеральным заключается в строении его молекул. Минеральное масло состоит углеродно-водородных веществ с короткой и длинной цепочкой. Углеродно-водородные молекулы с короткой цепочкой являются легколетучими и быстро испаряются с поверхности контакта. Масло на растительной основе состоит из полярных молекул и обладает более низкими потерями при испарении (не менее 30 % по сравнению с минеральными), что обеспечивает лучшие вязкостные и трибологические свойства [5].

При резании всухую и использовании в качестве смазки индустриального масла И-20 наблюдается примерно одинаковый объём пластически деформированного металла приповерхностного слоя и степень его деформации.

На рис. 4 представлены графики изменения микротвёрдости обрабатываемого материала по мере удаления вглубь от поверхности.

Для определения градиента распределения микротвёрдости по глубине приповерхностного слоя была использована линейная аппроксимация полученных данных.

Анализируя полученные графики и уравнения, можно заметить, что поверхностные слои обработанной поверхности заготовки имеют различную величину твёрдости. Наибольшей степени пластической деформации подвергаются наружные, приповерхностные слои металла, где микротвёрдость имеет максимальное значение. Под обработанной поверхностью, в глубине металла, степень пластической деформации и соответствующая ей микротвёрдость убывают.

Наибольшая степень микротвёрдости поверхностного слоя и градиент её изменения были получены при охлаждении поверхности заготовки струёй воды. Вода, подаваемая в зону резания, приводит к увеличению градиента температур на заготовке вглубь от её поверхности, происходит закалка поверхностных слоёв заготовки, в результате чего они характеризуются наибольшей твёрдостью.

При использовании в качестве смазки рапсового масла приповерхностный слой характеризуется минимальной твёрдостью и градиентом её распределения, что обусловлено эффектом Ребиндера.

При резании всухую и с использованием масла И-20 значение микротвёрдости по глубине слоя примерно одинаковое.

Можно предположить, что при использовании масла И-20 и при резании всухую снижение трения происходит вследствие образования вторичных структур в зоне контактного взаимодействия. На поверхности контакта происходит образование островковых наростов из продуктов диспергирования инструментального, обрабатываемого материалов и компонентов СОТС. Островковые наросты уменьшают поверхностную энергию и тем самым снижают активность адгезионных центров [6].

Выводы

Вид применяемой смазки оказывает непосредственное влияние на контактно-деформационные процессы стружкообразования, изменяя структуру и свойства тонких приповерхностных слоёв. При использовании того или иного вида смазки реализуются свои каналы проникновения СОТС в зону резания.

Установлено, что при использовании рапсового масла продукты разложения СОТС, оседая на участках с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения, облегчают деформацию приповерхностного слоя обрабатываемого металла согласно эффекту Ребиндера.

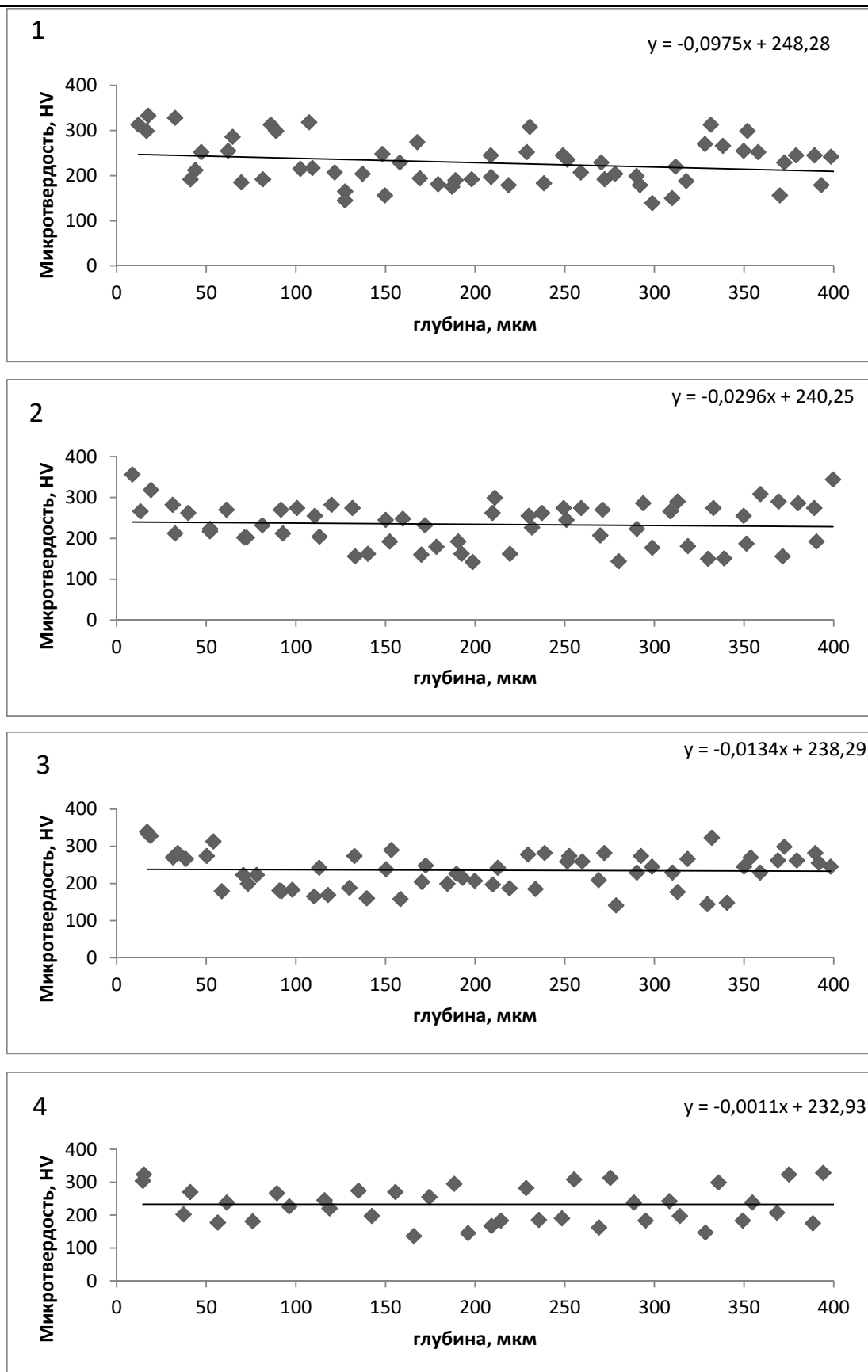


Рис. 4. Изменение микротвёрдости по глубине приповерхностного слоя при использовании следующих видов смазок: 1 – вода; 2 – резание всухую; 3 – рапсовое масло; 4 – масло И-20

При резании с использованием воды напряжения, возникающие в поверхностном слое, минимальны вследствие образования окисных плёнок на поверхностях контакта.

При использовании масла И-20 и при резании всухую можно предположить, что основную роль в снижении адгезионной активности оказывает образование вторичных структур в зоне контактного взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие теории радикально-цепного механизма действия СОТС при резании металлов / А. Г. Наумов, В. Н. Латышев, В. С. Раднюк, О. А. Наумова // Металлообработка. – 2016. – № 4(94). – С. 26-33.
2. Дерягин, Б. В. Адгезия твёрдых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Кротова, В. П. Смилга. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
3. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании металлов / В. А. Ким, Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1(33). – С. 66-75.
4. Ким, В. А. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов / В. А. Ким, Ч. Ф. Якубов // Машиностроение и машиноведение. Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22 – № 12. – С. 35.
5. Акмолаев, Э. С. Анализ влияния СОЖ на контактные процессы при механической обработке металлов / Э. С. Акмолаев // Таврический научный обозреватель. – 2016. – № 5(10). – С. 258.
6. Ким, В. А. Диссипативные структуры контактного взаимодействия при резании металлов / В. А. Ким, Е. В. Самар, Ч. Ф. Якубов // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы Всерос. науч.-техн. конф.; Уфимский гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2018. – С. 15.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ METALLURGY AND MATERIALS

Башков О. В., Кхун Хан Хту Аунг
O. V. Bashkov, Khun Han Htoo Aung

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И ВНУТРИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

STUDIES OF ACOUSTIC EMISSION WAVES EXCITED ON THE SURFACE AND INSIDE ALUMINUM PLATE

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Oleg V. Bashkov – Doctor of Technical Sciences, Head of Materials Science and Technology of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Кхун Хан Хту Аунг – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Khun Han Htoo Aung – Postgraduate Student, Materials Science and Technology of New Materials Department Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Данное исследование посвящено моделированию волн акустической эмиссии (АЭ), распространяющихся в пластине, при образовании и распространении трещин. Волны, моделирующие развитие трещин при зарождении и развитии микро- и макродефектов, возбуждались единичным источником Су-Нильсена при изломе грифеля карандаша в различных местах пластины. По результатам вейвлет-анализа сигналов АЭ показано, что форма регистрируемых волн АЭ зависит от видов источников, расстояния и геометрии контролируемого объекта. Исследовано также влияние глубины источника и расстояния распространения на регистрируемые АЭ-волны.

Summary. This study is devoted to the predictive modeling of acoustic emission waves due to the energy released during the local restructuring of the structure and the increment of crack propagation in the plate. The waves were excited by a single Hsu-Nielsen source to simulate a growing crack and the waves were recorded at various locations. As a result of processing of acoustic emission signals, it is shown that the shape of the recorded AE waves depends on the types of sources, distance and geometry of the controlled object. The influence of the source depth and propagation distance on the registered AE waves is also studied.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, волны Лэмба, источник Су-Нильсена, вейвлет-преобразование.

Key words: acoustic emission, Lamb waves, source Hsu-Nielsen, wavelet transform.

УДК 621.9:519.8

Введение

Благодаря развитию в области физики твёрдого тела, математики, технологий распознавания, сбора и обработки сигналов появилась возможность изучать физико-механические свойства материала без разрушения его структуры. Однако это требует проведения исследований, позволяющих устанавливать связь между структурными изменениями, наблюдаемыми в материале *in situ* и параметрами физических величин, регистрируемых дополнительно в процессе изменений, происходящих в структуре. При возрастающих требованиях к изготовлению различных промышленно опасных объектов, таких как трубопроводы, газовые и нефтехранилища, объекты авиастроения и другие объекты транспорта, актуальным вопросом становится применение современных методов неразрушающего контроля для прогнозирования ресурса не только в процессе эксплуатации, но и на этапе производства с целью снижения стоимости и оценки достаточного уровня качества. Поэтому в последние десятилетия внимание учёных и практиков было обращено на развитие кон-

цепции мониторинга технического состояния (Structural Health Monitoring (SHM)), которая основана на регистрации физических параметров с различных датчиков, установленных на конструкциях, и анализе данных параметров для выявления повреждений и деградации структуры материала. Одним из эффективных методов является метод акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия – явление возникновения и распространения упругих волн за счёт энергии, выделяемой при локальной перестройке структуры материала [1]. Энергия, выделяемая при локальном повреждении материала, обусловлена распространением различных мод колебаний в пластине в виде групповой волны, имеющей различную скорость в зависимости от толщины пластины и частоты волны [2]. Волны Лэмба, определяющие различные моды распространения упругих волн в пластине, применяются в задачах контроля и мониторинга состояния объекта благодаря их малому коэффициенту затухания, что позволяет контролировать не только металлические, но и композиционные материалы. В последнее время можно встретить всё больше работ, посвящённых исследованию волн Лэмба, в том числе теоретических и содержащих численный анализ волн Лэмба при зарождении и распространении трещин [3; 4]. В работах [5; 6] при моделировании распространения волны Лэмба в пластине сигналы АЭ возбуждались единичным источником, имеющим форму Гаусса с различным временем нарастания. В работе [7] выполнены дефектоскопия ударных повреждений в композиционных материалах и анализ механических характеристик металлических материалов при статическом и циклическом нагружениях на основе волн Лэмба [8]. Анализ оптимального размещения пьезоэлектрических преобразователей выполнен в [9; 10]. Однако из-за сложной дисперсии свойств волн Лэмба, необходимо учитывать множество факторов: стабильность толщины клеевого слоя и деградации его свойств [11], амплитудно-частотную характеристику и геометрию датчиков [12], виды источников и их расположение [13]. Таким образом, вид источника и геометрические характеристики канала распространения волны определяют форму волны на определённом расстоянии её регистрации.

Зарегистрированные сигналы АЭ содержат значительный объём информации об источнике формирования, среде распространения упругой волны и местоположении источника. В данной работе проведены исследования по установлению связи между параметрами регистрируемых волн Лэмба и параметрами разрушения структуры материала при возбуждении локальным единичным источником АЭ.

Материалы и методика исследования

Для проведения испытания были подготовлены пластины алюминиевого сплава Д16 размером 500×600 мм толщиной 1,8 и 7 мм. С целью моделирования развития трещин различного происхождения в различных местах пластины, волны АЭ возбуждались источником Су-Нильсена (излом грифеля карандаша диаметром 0,5 мм). Источник Су-Нильсена является стандартным инструментом, используемым в экспериментах как источник АЭ, и применяется для проверки характеристик датчиков и определения пороговых значений обнаружения сигналов АЭ [14; 15]. В работах [16; 17] представлена информация о важности понимания того, как различия в механических свойствах грифеля карандаша и его диаметре могут влиять на характер регистрируемых тестовых сигналов. Схема проведения испытания, расположения датчика и источников Су-Нильсена показана на рис. 1.

Источник Су-Нильсена, обозначенный красным треугольником, был расположен либо на поверхности пластины на расстоянии 130 мм от края пластины, либо в торце среднего сечения пластины, либо на глубине 3,5 мм на фрезерованной поверхности площадки у края образца (данная фрезерованная поверхность на рисунке не показана). Преобразователь АЭ, являющийся приёмником АЭ-сигналов, поочередно устанавливался в точках, расположенных на расстоянии 90, 150 и 200 мм от края пластины и, соответственно, от источника. Источник Су-Нильсена возбуждался путём излома грифеля карандаша твёрдостью 2Н в указанных выше местах. Сигналы АЭ регистрировались специализированной АЭ-системой, разработанной в ЦКП «Новые материалы и технологии “КНАГУ”».

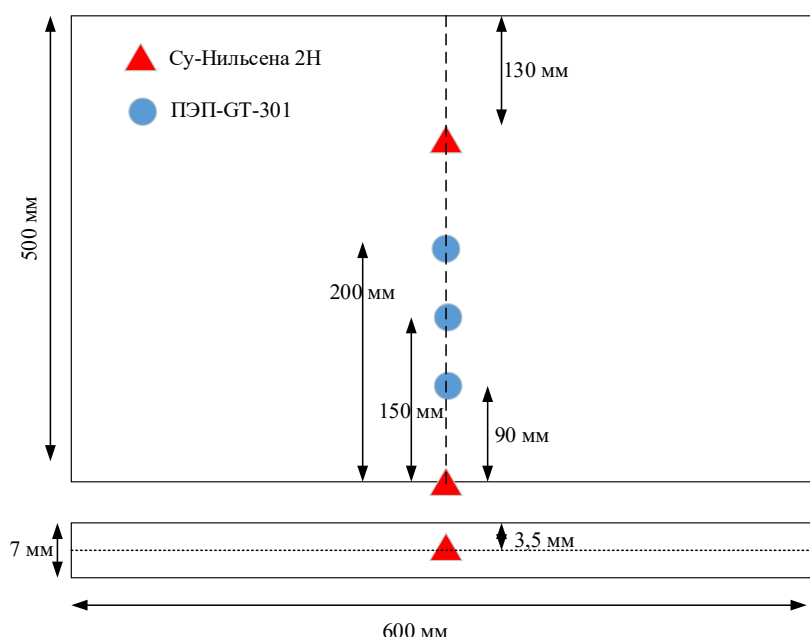


Рис. 1. Схема расположения датчика и источников Су-Нильсена в пластине Д16

Для регистрации волны АЭ использовалась 4-канальная система АЭ на основе высокочастотного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 МГц. Пьезоэлектрический датчик (GT-301), который является специализированным широкополосным датчиком в диапазоне 50–550 кГц, был установлен на поверхности пластины и подключён к АЭ-системе через предварительный усилитель с коэффициентом усиления 40 дБ.

Результаты обработки АЭ-сигналов

Энергия, высвобождаемая при образовании трещин, может быть проанализирована по потенциалам возбуждения (импульс Су-Нильсена), которые регистрируются в виде распространяющихся в пластинах волн Лэмба. Различные моды волн Лэмба, распространяющейся в пластине групповой волны, имеют различную скорость в зависимости от толщины пластины и частоты волны [18]. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на различных расстояниях между датчиком и источником АЭ при возбуждении на поверхности, на краю и на глубине 3,5 мм от края пластины толщиной 7 мм, показаны на рис. 2–4.

В результате качественного анализа вейвлет-спектрограмм было обнаружено, что выбранные моды зарегистрированных волн, которые обозначены в виде кривых красного цвета на рис. 2–4, характеризуются как антисимметричные волны A_0 и симметричные волны S_0 . При анализе работ других авторов также известно, что когда сигнал АЭ генерируется монополем (излом грифеля 2Н) на поверхности пластины, антисимметричная волна A_0 имеет большую амплитуду частотной компоненты вейвлет-декомпозиции в сравнении с симметричной волной S_0 . При аналогичном возбуждении источника, расположенного на глубине 3,5 мм от края поверхности, наоборот, наибольшую амплитуду частотной компоненты вейвлет-декомпозиции имеет симметричная волна S_0 в сравнении с антисимметричной волной A_0 . Это и наблюдается на вейвлет-спектрограммах и спектрах Фурье-сигналов, зарегистрированных на трёх различных расстояниях (90, 150 и 200 мм) от источника (см. рис. 2–4). Различие в сигналах АЭ, зарегистрированных на разных по отношению к глубине расположения источника местах пластины, заключается в форме зарегистрированных сигналов. Для сигналов, где источник АЭ располагается на краю пластины, а точнее в торце пластины, регистрируются компоненты высоких частот более 200 кГц.

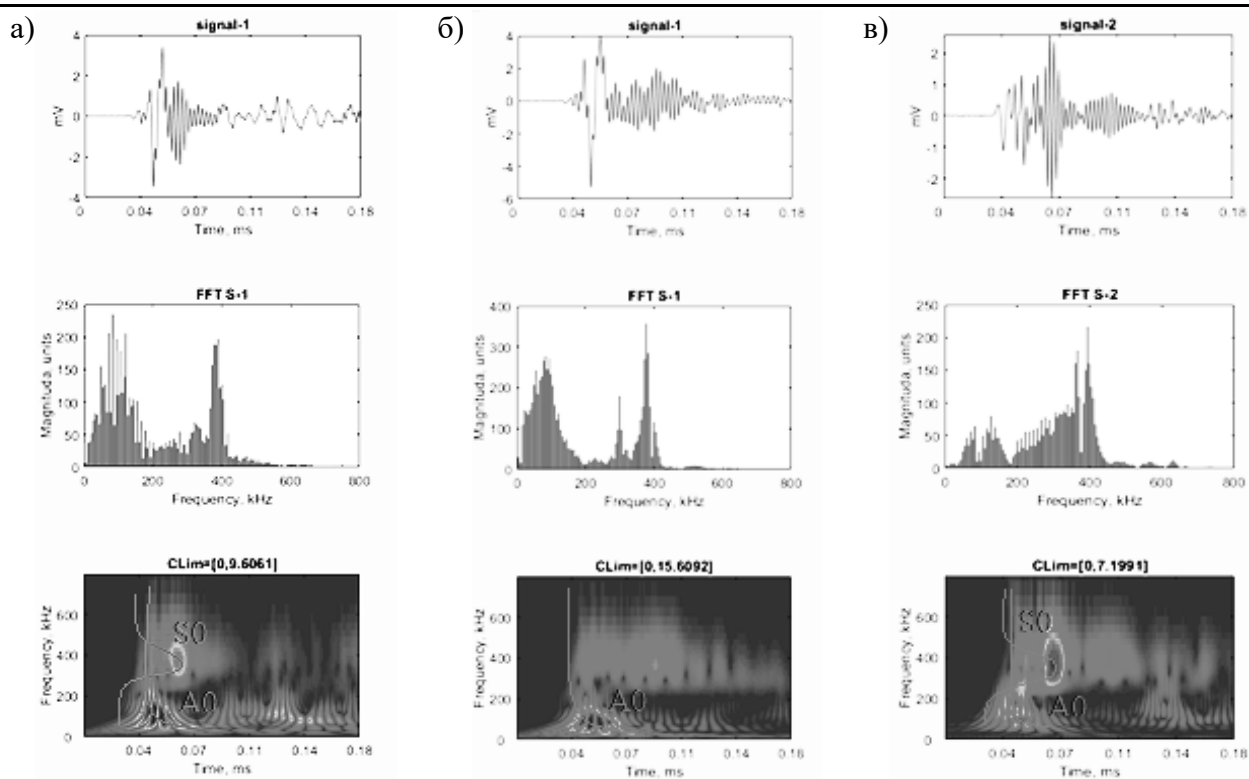


Рис. 2. Результаты обработки сигналов на расстоянии 90 мм на разных местах источников АЭ, зарегистрированных в пластине толщиной 7 мм:
а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

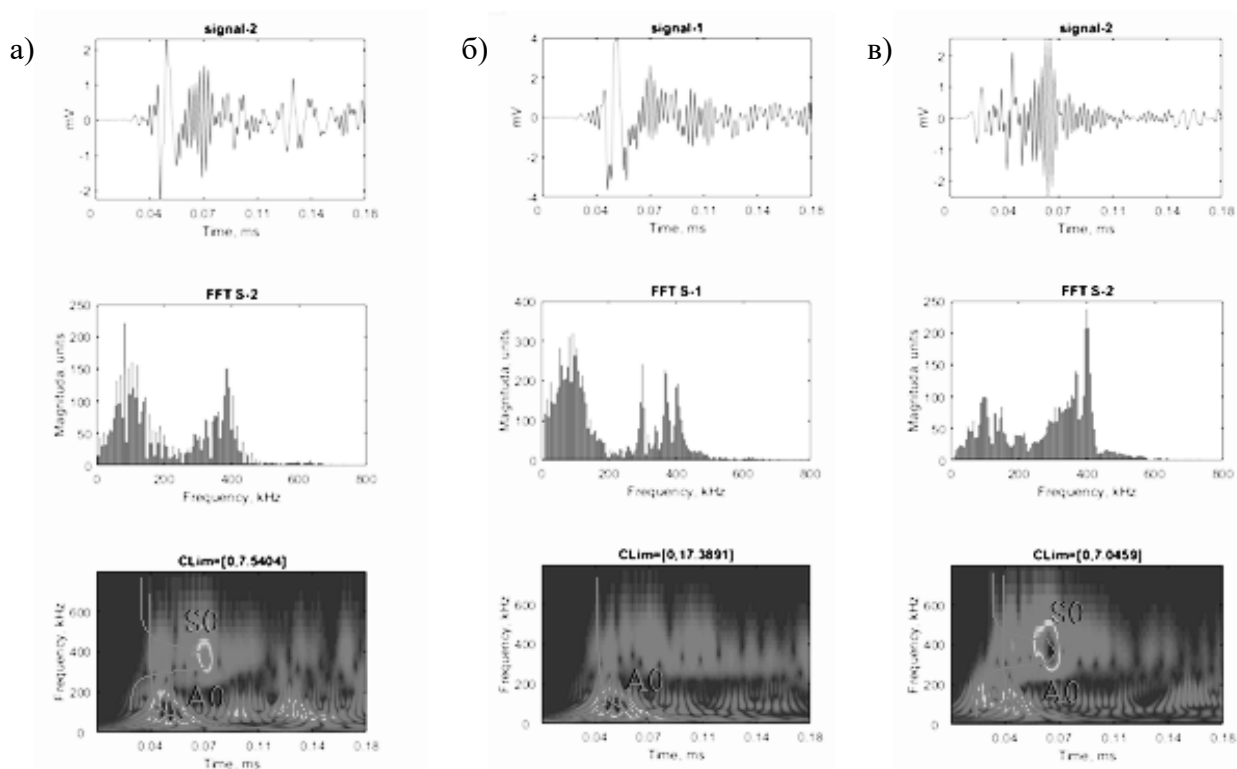


Рис. 3. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 150 мм от приёмника в пластине толщиной 7 мм, при расположении приемника:
а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

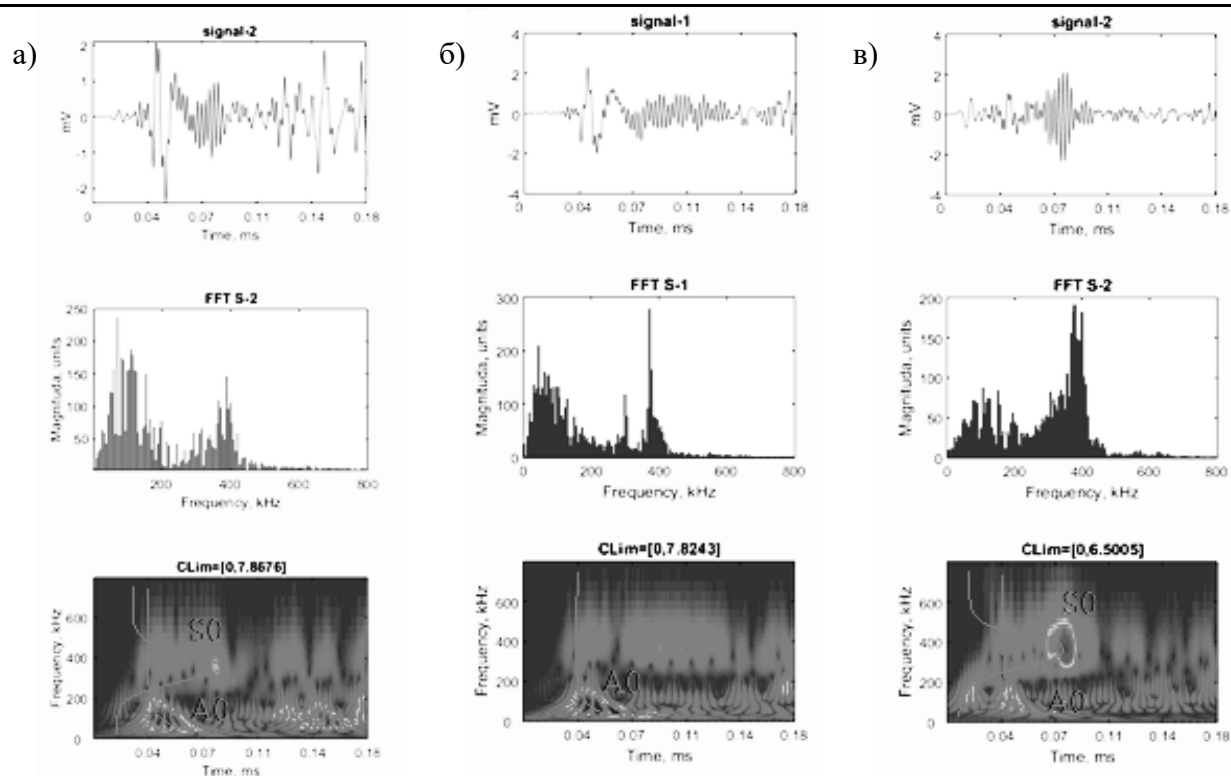


Рис. 4. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных на расстоянии 200 мм от приёмника в пластине толщиной 7 мм, при расположении приемника:
а – на поверхности; б – на краю; в – на глубине 3,5 мм от края

Сигнал имеет несколько повторных осцилляций с длительным высокочастотным «послезвучанием» на частоте близкой к 400 кГц, как видно по вейвлет-спектрограммам, например, в диапазоне времени от 0,06 до 0,11 мс (см. рис. 2, б). На Фурье-спектре видно, что пики осцилляций наблюдаются в частотах 300 и 380 кГц (см. рис. 2, б и 4, б), на расстоянии 150 мм от источника отмечено также на частоте 410 кГц (см. рис. 3, б). В результате на основании анализа компонент вейвлет-декомпозиции на частотах 300 и 380 кГц на частотно-временной спектрограмме можно определить источник АЭ, определяющий различную форму зарегистрированных сигналов и выполнить классификацию источников АЭ. На вейвлет-спектрограммах, соответствующих расположению источника на поверхности (см. рис. 2–4, а) и на глубине 3,5 мм от края поверхности (см. рис. 2–4, в), наблюдается увеличение временной задержки между амплитудой антисимметричной и симметричной волн в виде смещения вправо яркого пятна на частоте 380 кГц с ростом расстояния между излучателем и приёмником.

В связи с тем что при толщине пластины 1,8 мм оказалось затруднительным подготовить площадку, расположенную на глубине, равной половине толщины, анализировались только сигналы АЭ, зарегистрированные при возбуждении волны на поверхности пластины. Для сигналов, зарегистрированных в пластине толщиной 1,8 мм (см. рис. 5), отмечено отличие Фурье-спектров и вейвлет-спектрограмм от сигналов в пластине толщиной 7 мм. Устойчивый максимум магнитуды на частоте 350 кГц наблюдается для различных расстояний установки источника относительно приёмника. На вейвлет-спектрограмме отчётливо наблюдается форма нелинейной зависимости, по форме схожей с формой дисперсионной кривой скорости антисимметричной волны А0.

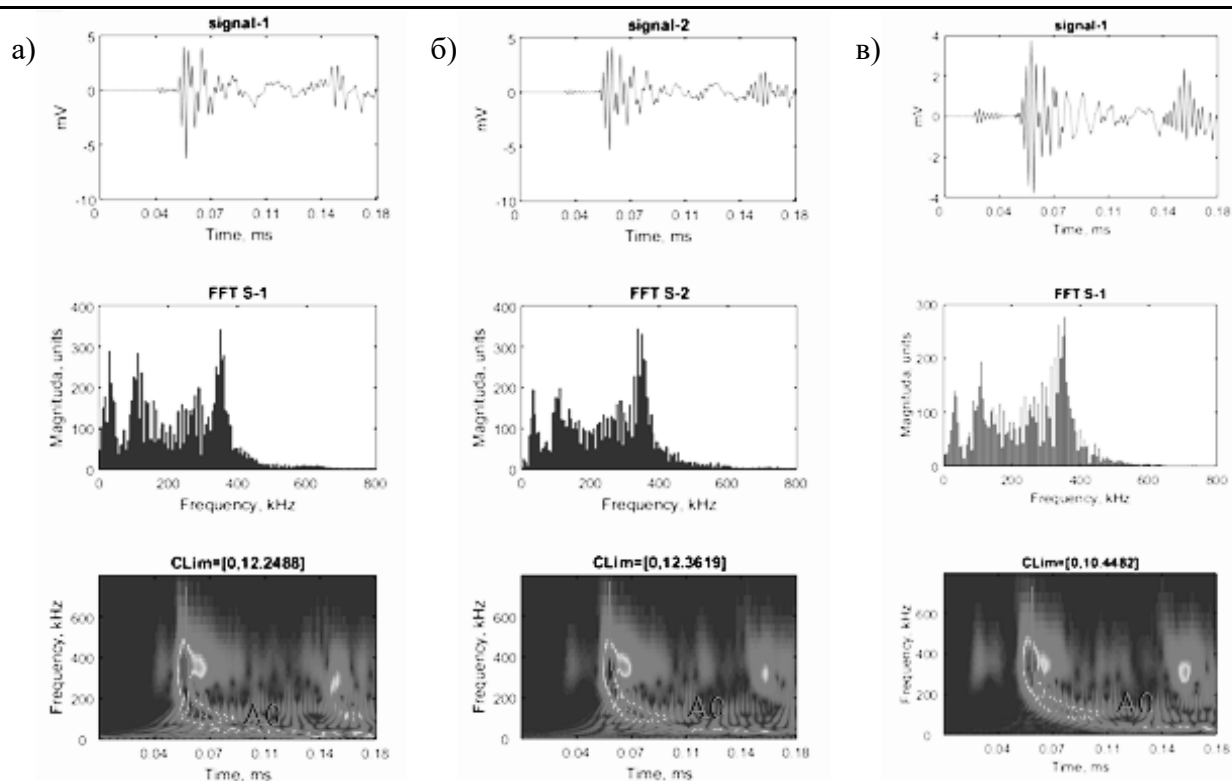


Рис. 5. Результаты обработки сигналов АЭ, зарегистрированных в пластине толщиной 1,8 мм при расположении источника от приёмника на расстоянии:
а – 90 мм; б – 150 мм; в – 200 мм

Заключение

В результате качественного и количественного анализа видно, что вид источника и геометрические характеристики канала распространения волны определяют форму волны на определённом расстоянии регистрации от её источника. В работе исследованы особенности АЭ-сигналов, зарегистрированных при распространении ультразвуковых волн в листовом металле с использованием пьезоэлектрических датчиков, отмечено отличие спектральных составляющих сигналов АЭ от места расположения источника по глубине возбуждения. Результаты анализа можно использовать для дефектоскопии, идентификации и классификации дефектов на основе особенностей регистрируемой волны Лэмба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стадийность деформации поликристаллических материалов. Исследование акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами / О. В. Башков, С. В. Панин, П. С. Любутич, А. В. Бяков, С. Рамасуббу. – Томск: Изд-во национального исследовательского Томского политехнического университета, 2014. – 301 с.
2. Zhongqing Su and Lin Ye, Identification of Damage using Lamb Waves, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol. 48. 2009. P. 346.
3. M. F. Haider, V. Giurgiutiu, B. Lin, Yu. L, Simulation of lamb wave propagation using excitation potentials, Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference. V.6A. № PVP2017 – 66074. P.7.
4. M. F. Haider, V. Giurgiutiu, A Helmholtz Potential Approach to the Analysis of Guided Wave Generation during Acoustic Emission Events, Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 1(2), 021002.
5. Кхун, Х. Х. Моделирование акустических волн в пластинах при возбуждении источниками с различной длительностью фронта волны / Х. Х. Кхун, Ф. Бао, О. В. Башков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 75-78.



6. Khon H., Bashkov O. V., Zolotareva S. V., Solovev D. B. Modeling the propagation of elastic ultrasonic waves in isotropic and anisotropic materials when excited by various sources // Materials Science Forum. – 2018. – V. 945. – P. 926-931.
7. G. R Markus Sause, In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites, Springer Series in Materials Science 242. Springer, 2016.
8. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для контроля состояния образцов алюминиевого сплава в96ц3т12 / М. В. Бурков, А. В. Еремин, П. С. Любутин, А. В. Бяков, С. В. Панин // Дефектоскопия. – 2017. – № 12. – С. 3-15.
9. Lee B. C., Staszewski W. J. Sensor location studies for damage detection with Lamb waves. – Smart Materials and Structures, 2007, V. 16, Iss. 2, P. 399-408.
10. A. M. Zelenyak, M. A. Hamstad, G. R Markus Sause. Finite Element Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation with Various Shaped Waveguides. 31st Conference of the European Working Group on Acoustics Emission (EWGAE). – 2018.
11. M. G. R. Sause, S. Horn. Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens. J. Nondestruct Eval. – V. 29. 2010. P. 123-142.
12. Kanji Ono. Rayleigh Wave Calibration of Acoustic Emission Sensors and Ultrasonic Transducers. Sensor. – No. 19. 3129. 2019.
13. E. Ahn, H. Kim, S. H. Sim, S. W. Shin, J. S. Popovics, M. Shin, Surface-wave based model for estimation of discontinuity depth in concrete. Sensors 2018, 18, 2793.
14. Nielsen, Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking, The Danish Welding Institute Publication: Copenhagen, Danmark. 1980. P. 15-18.
15. Sause, M. G. R., & Hamstad, M. A. (2018). Numerical modeling of existing acoustic emission sensor absolute calibration approaches. Sensors and Actuators A: Physical, 269, 294-307.
16. G. R Markus Sause, Investigation of Pencil-lead Breaks as Acoustic Emission Source, J. Acoustic Emission. V. 29. 2011. P. 184-196.
17. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии / С. В. Панин, А. В. Бяков, В. В. Гренке, И. В. Шакиров, О. В. Башков // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 115-128.
18. H. Lamb. On Waves in an Elastic Plate. Proceedings of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 93. 1917. P. 114-128.

Шакирова О. Г.

НОВЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗА(II) С ТРИС(ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТАНОМ И КАЛИКС[4]АРЕНАМИ/РЕЗОРЦИНАРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СПИН-КРОССОВЕР И ТЕРМОХРОМИЗМ

Шакирова О. Г.

O. G. Shakirova

НОВЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗА(II) С ТРИС(ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТАНОМ И КАЛИКС[4]АРЕНАМИ/РЕЗОРЦИНАРЕНАМИ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СПИН-КРОССОВЕР И ТЕРМОХРОМИЗМ

NEW COORDINATION COMPOUNDS OF IRON(II) WITH TRIS(PYRAZOL-1-YL)METHANE AND CALIX[4]ARENES/RESORCINOLES: SYNTHESIS, STRUCTURES, HIGH-TEMPERATURE SPIN-CROSSOVER AND THERMOCHROMISM

Шакирова Ольга Григорьевна – доктор химических наук, доцент, заведующая кафедрой «Технология переработки нефти и полимеров» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shakirova_Olga@mail.ru.

Olga G. Shakirova – Dr. Sci. Chem., Associate Professor, Head of Oil and Polymer Processing Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: Shakirova_Olga@mail.ru.

Аннотация. Представлен краткий обзор достижений в химии координационных соединений железа(II) с трис(пиразол-1-ил)метаном и каликс[4]аренами. Показаны возможности электронной (спектры диффузного отражения), инфракрасной и мёссбауэровской спектроскопии в детектировании спинового состояния железа(II) в комплексах. Методом рентгеноструктурного анализа доказано включение комплексного катиона $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ в циклофановые полости анионов каликс[4]аренов/резорцинаренов. Магнетохимическое исследование статической магнитной восприимчивости в интервале температур 78...500 К показало, что в соединениях проявляется высокотемпературный спин-кроссовер (спиновый переход), который сопровождается термохромизмом (переходом цвета от пурпурного до белого для каликс[4]арен-аниона или от коричневого до бежевого для каликс[4]резорцинарен-аниона). Синтезированные соединения включения демонстрируют повышенную термостабильность. Они могут быть перспективны в качестве материалов для молекулярных сенсоров и термодатчиков.

Abstract. A brief review of the achievements in the field of iron(II) complex chemistry with tris(pyrazol-1-yl)methane and calix[4]arenes is presented. The possibilities of electron (diffuse reflection spectra), infrared and Mössbauer spectroscopy in detecting the spin state of iron(II) in complexes are shown. Using X-ray diffraction analysis, the inclusion of the complex cation $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ in the cyclophane cavities of calix[4]arenes/resorcinarenes anions was proved. The magnetochemical study of the static magnetic susceptibility within the temperature range 78...500 K showed that the compounds exhibit a high-temperature spin-crossover (spin transition), which is accompanied by thermochromism (color changes from purple to white for calix[4]arene anion or from brown to beige for calix[4]resorcinol anion). The synthesized inclusion compounds exhibit enhanced thermal stability. They can be promising as materials for molecular sensors and thermal sensors.

Ключевые слова: синтез, комплекс, железо(II), трис(пиразол-1-ил)метан, каликс[4]арены/резорцинарены, кристаллическая структура, спин-кроссовер, термохромизм.

Key words: synthesis, complex, iron(II), tris(pyrazol-1-yl)methane, calix[4]arenes/resorcinols, crystal structure, spin-crossover, thermochromism.

УДК 537.622:541.49:543.42:548.736

Для железа(II) можно предвидеть два крайних случая размещения шести d-электронов на t_{2g} - и e_g -орбиталях. Если отталкивание электронов (энергия спаривания) велико по сравнению с параметром расщепления орбиталей (Δ), то электроны распределяются на пяти d-орбиталях в соответствии с правилом Хунда. Это приводит к парамагнитному (высокоспиновому) основному состоянию. Если же Δ больше по сравнению с энергией отталкивания электронов, то шесть d-электронов

будут спарены на t_{2g} -орбиталях, что приведёт к диамагнитному основному состоянию с низким спином. В окружении лигандов состояние железа(II) с низким спином (HC , $S = 0$, 1A_1) более стабильно относительно состояния с высоким спином (BC , $S = 2$, 5T_2), поэтому HC становится основным электронным состоянием при всех температурах. Но когда комплекс переходит из состояния с низким спином в состояние с высоким спином, длина связи металл-лиганд резко меняется, и также резко изменяется величина Δ . Поэтому BC сохраняет термодинамически стабильное состояние при высоких температурах. Существуют диапазоны напряжённости соответствующих полей лиганда, для которых можно ожидать явления спин-кроссовера (СКО, спинового перехода, $^1A_1 \leftrightarrow ^5T_2$).

Комплексы железа(II), в которых происходит переход из состояния с низким спином в состояние с высоким спином, изучены достаточно широко. Изменение кратности спина может происходить в октаэдрических или псевдо-октаэдрических комплексах с ядром FeN_6 под действием температуры, давления или облучения светом определённой длины волны [1–5]. Исследования температурно-индуцированного СКО в комплексах железа(II) сильно возросли, что связано с многообещающими перспективами развития молекулярной электроники [6; 7]. Во многих случаях СКО сопровождается термохромизмом.

Трис(пиразол-1-ил)метан ($HC(pz)_3$) и его производные являются перспективными полиазотсодержащими лигандами для синтеза бистабильных комплексов железа(II) со спин-кроссовером. Этот лиганд, имеющий три атома азота в циклах, способен координироваться тридентатно-циклически (симметрия C_3), что способствует образованию координационного полиэдра FeN_6 (см. рис. 1). Кроме того, соединения металлов первого переходного ряда с замещённым пиразолом имеют собственный практический интерес в связи с их биологической активностью. Пиразол и его комплексы с металлами обладают антиоксидантной, фунгицидной и гербицидной активностью, также в некоторых случаях они могут быть стимуляторами роста.



Рис. 1. Структура молекулы лиганда $HC(pz)_3$ (a) и его комплекса $[Fe\{HC(pz)_3\}_2]^{2+}$ (б)

Ранее были описаны синтез и исследование различных мооядерных комплексов железа(II) с трис(пиразол-1-ил)метаном [8; 9]. Комплексы имеют высокотемпературный спин-кроссовер в пределах 310...470 K, который сопровождается термохромизмом. Необходимо отметить, что в некоторых случаях в области высоких температур начинается разложение комплекса, и это не позволяет нам достичь плато на кривой $\mu_{эфф}(T)$.

В продолжение работы были исследованы новые сульфonatoкаликс[4]арены/резорцинарены в качестве противоионов внешней сферы с целью установления влияния заместителей циклофановой структуры на магнитные свойства и термическую стабильность комплекса железа(II) с трис(пиразол-1-ил)метаном. Основная особенность этих анионов состоит в наличии гидрофобной полости, украшенной четырьмя/восемью группами $-OH$ и четырьмя $-SO_3^-$ с высоким сродством к положительно заряженным комплексам металлов (см. рис. 2).

Исследование явлений включения в соединениях комплексов железа (II) с трис(пиразол-1-ил)метаном с производными каликс[4]аренов целесообразно с целью достижения идеальных характеристик СКО: полноты, резкости, достижения диапазона комнатной температуры.

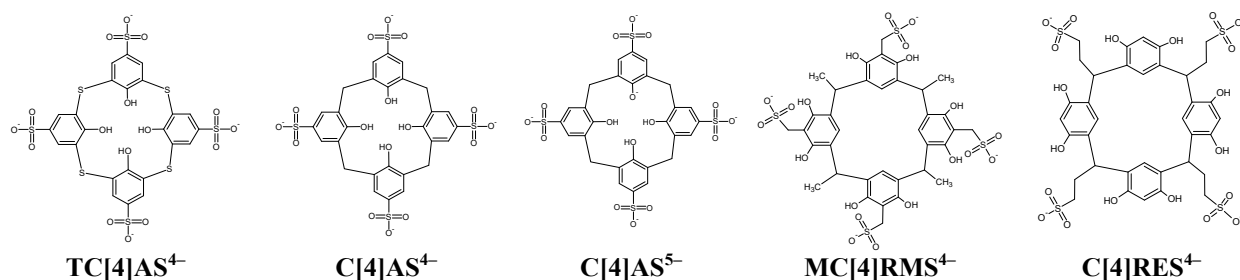


Рис. 2. Структуры внешнесферных противоионов

Были синтезированы и разносторонне исследованы новые мооядерные комплексы железа(II) с трис(пиразол-1-ил)метаном $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ с упомянутыми противоионами следующего состава: $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{TC[4]AS})$, $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{C[4]AS}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_5(\text{C[4]AS})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($n = 0, 16, 62$), $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{MC[4]RMS}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_3(\text{C[4]RES})_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Комплексные соединения выделяли из водно-спиртового раствора, подкисленного аскорбиновой кислотой (для предотвращения окисления Fe^{2+}). Большинство из них образовались в результате реакции обмена в растворе между сульфатным или нитратным комплексом и раствором анионной соли. Комплексы ограниченно растворимы в этаноле, изопропанол, ацетоне, воде, нерастворимы в бензоле, толуоле, гексане. На присутствие воды в структуре координационного соединения указывают данные элементного анализа и ИК-спектроскопии. Количество молекул кристаллизационной воды было найдено по термогравиметрическим данным.

Наиболее значительные обратимые изменения зарегистрированных инфракрасных спектров наблюдаются в спектральной области $850 \dots 870 \text{ см}^{-1}$, где нагрев образцов вызывает резкий рост полосы при 850 см^{-1} и уменьшение интенсивности полосы при 865 см^{-1} (см. рис. 3).

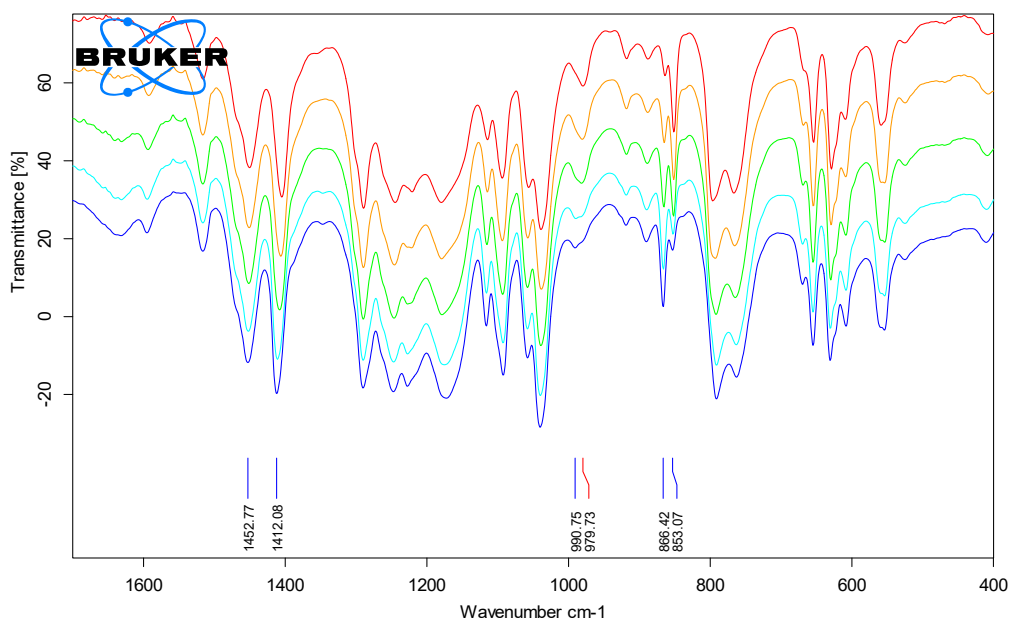


Рис. 3. ИК-спектры комплекса $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_5(\text{C[4]AS})_2 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ в зависимости от температуры (снизу вверх 25, 50, 90, 120, 160 °C)

Согласно расчётам, эти полосы следует отнести к внеплоскостным колебаниям С-Н пиразолильного кольца. Полоса около 1000 см^{-1} , связанная в основном с изгибом пиразолильного кольца, сдвигается до 990 см^{-1} и становится существенно сильнее. Полосы растяжения СС и СN менее чувствительны к температуре: полоса 1515 см^{-1} умеренно растёт, а интенсивность полос

1450 и 1410 cm^{-1} уменьшается. Практически все полосы проходят смещение в область низких частот на 5...10 cm^{-1} при нагревании образцов. Вышеупомянутые тенденции воспроизводятся с помощью расчётов B3LYP для изолированного катиона $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{Pz})_3\}_2]^{2+}$, что позволяет предположить, что эти эффекты скорее являются внутримолекулярными, чем межмолекулярными.

Спектр диффузного отражения каждого комплекса при комнатной температуре в области 500...550 нм содержит одну широкую полосу, которую можно отнести к d – d-переходу $^1\text{A}_1 \rightarrow ^1\text{T}_1$ в сильноном искажённом октаэдрическом поле лигандов с узлом FeN_6 .

Данные по интенсивности рентгеновской дифракции кристаллов получены на автоматическом четырёхкружном дифрактометре Bruker Nonius X8Apex, оборудованном двумерным CCD-детектором, при 150(2) К (MoK α -излучение, $\lambda = 0,71073 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор). По данным рентгеноструктурного анализа, синтезированные координационные соединения железа(II) с трис(пиразол-1-ил)метаном имеют слабо-искажённую октаэдрическую структуру координационного узла FeN_6 . Комплексные катионы $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ располагаются в соответствии с плотнейшей кубической упаковкой. Экспериментально наблюдалось включение одного из $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ в циклофановую полость. Таким образом, в элементарной ячейке есть как погружённые, так и свободные катионы и анион, имеющий конфигурацию «гнездо/чаша». Также в структуре существуют внутримолекулярные водородные связи между O из сульфonato-групп каликс[4]арена и СН-группами пиразольных колец $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$. Обращает внимание, что в случае каликс[4]арен-анионов наблюдается явление включения комплексного катиона $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ в полость с соотношением 1:1 (см. рис. 4, а и б). В случае каликс[4]резорцинарен-аниона явление включения имеет соотношение катион/анион = 1:2 (см. рис. 4, в).

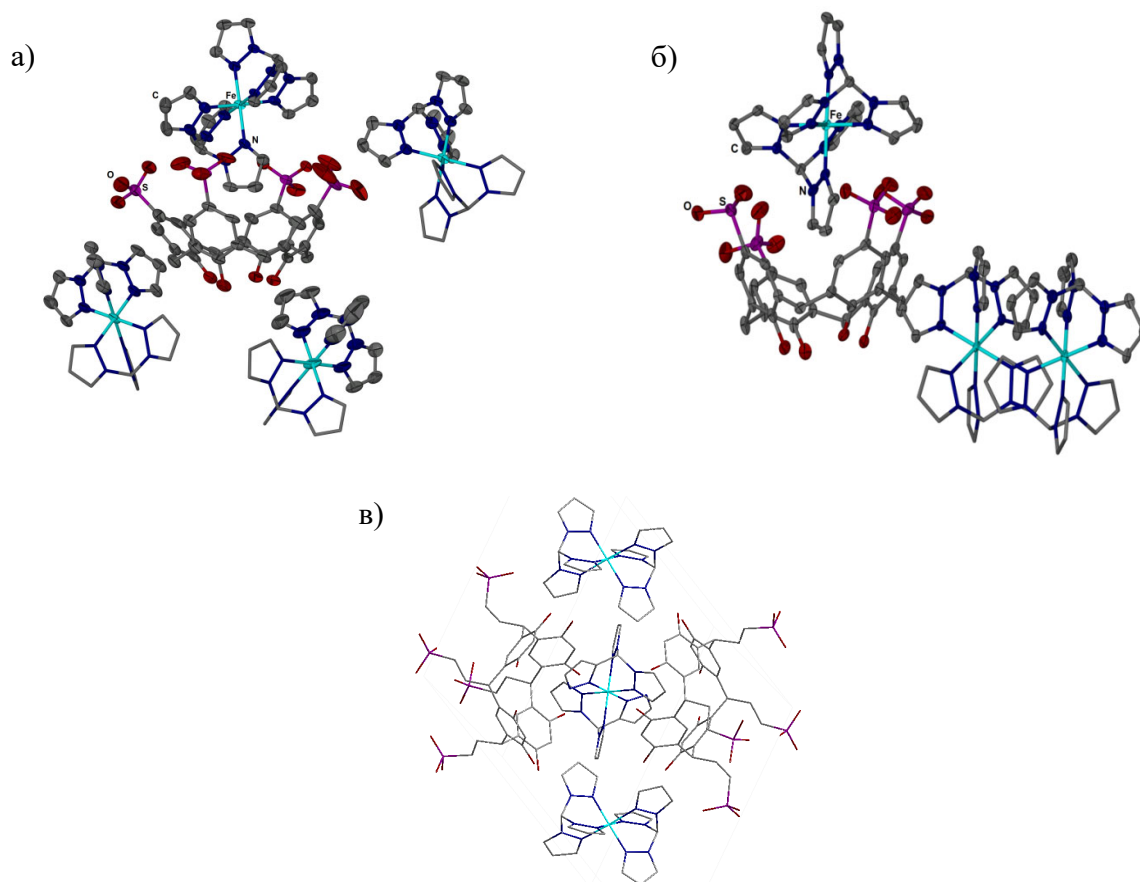


Рис. 4. Кристаллическая структура $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_5(\text{C}[4]\text{AS})_2 \cdot 62\text{H}_2\text{O}$ (а), $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{C}[4]\text{AS})_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ (б), $\text{Na}_2[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_3(\text{C}[4]\text{RES})_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (в).

Атомы H, ионы Na^+ и молекулы кристаллизационного растворителя опущены для наглядности

Статическая магнитная восприимчивость поликристаллических образцов (предварительно дегидратированных) измерялась методом Фарадея в интервале температур 78...500 К при напряжённости внешнего магнитного поля до 5 кЭ. Эффективный магнитный момент рассчитывался по формуле $\mu_{\text{эфф}} = (8\chi'_m T)^{1/2}$, где χ'_m – молярная магнитная восприимчивость с поправкой на диамагнетизм. Скорость нагрева (охлаждения) в области СКО была равна 0,5 К/мин. Температуры прямого ($T_{c\uparrow}$) и обратного ($T_{c\downarrow}$) переходов находились из условия $d^2(\mu_{\text{эфф}})/dT^2 = 0$.

Магнетохимическое исследование комплексов показало, что большинство из них обладают постепенным высокотемпературным СКО с гистерезисом на графике $\mu_{\text{эфф}}(T)$. Включение $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]^{2+}$ в полость п-сульфонатотикаликс[4]арена (TC[4]AS) привело к уменьшению резкости перехода $^1A_1 \leftrightarrow ^5T_2$ и повышению температуры СКО на 10 К по сравнению с $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2](\text{ns})_2$, здесь ns = 2-нафталинсульфонат $\text{C}_{10}\text{H}_7\text{SO}_3^-$ [10]. В то же время использование р-сульфонатотикаликс[4]арен-аниона позволило повысить термостабильность на 20 К (с 460 до 480 К) по сравнению с нафталинсульфонатным аналогом [11]. Образование комплекса включения бис(трис(пиразол-1-ил)метан)железа(II) с *n*-сульфонатокаликс[4]арен-анионом ($\text{C}[4]\text{AS}^{5-}$) также приводит к термостабилизации и снижению температуры СКО (см. рис. 5). Его значения температуры СКО для нагрева ($T_{c\uparrow}$) и охлаждения ($T_{c\downarrow}$) равны 390 К и 380 К соответственно [12]. Несмотря на то что образование комплексов включения комплекса бис(трис(пиразол-1-ил)метан)железа(II) с взятыми сульфonatoкаликс[4]резорцинарен-анионами не привело к термостабилизации, их СКО стал намного более полным (см. рис. 6). Значения температуры СКО $T_{c\uparrow} = 387$ К и $T_{c\downarrow} = 383$ К для комплекса с $\text{C}[4]\text{RES}$ -анионом, и $T_{c\uparrow} = T_{c\downarrow} = 294$ К для комплекса с $\text{MC}[4]\text{RMS}$ -анионом.

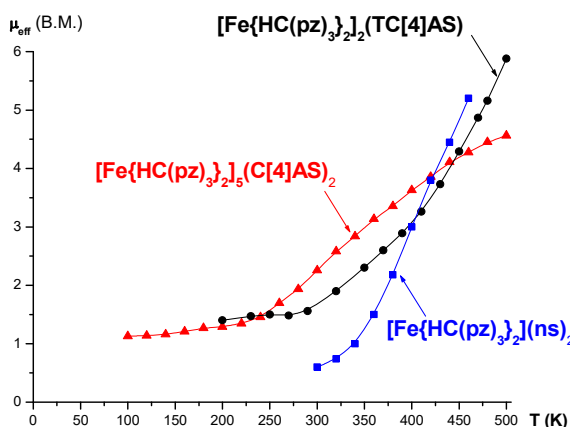


Рис. 5. Зависимость $\mu_{\text{эфф}}(T)$ для $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_5(\text{C}[4]\text{AS})_2$, $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{TC}[4]\text{AS})$ и $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2](\text{ns})_2$

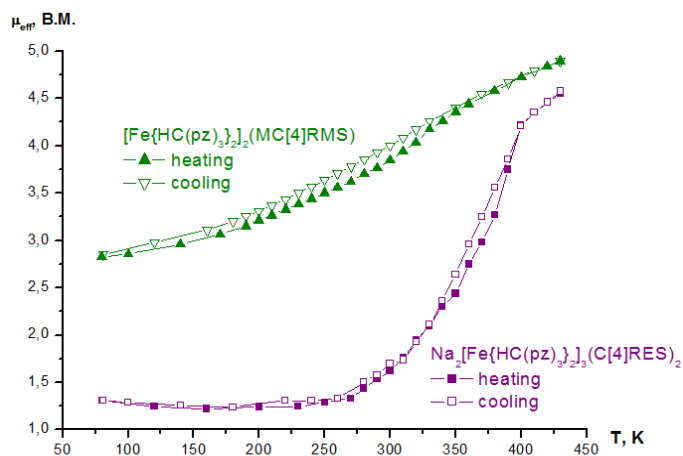


Рис. 6. Зависимость $\mu_{\text{эфф}}(T)$ для $\text{Na}_2[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_3(\text{C}[4]\text{RES})_2$ и $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{MC}[4]\text{RMS})$

Мессбауэровские спектры комплексов, полученные при 295 К на спектрометре NP-610 с источником ^{57}Co (Rh), подтверждают, что комплекс $\text{Na}_2[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_3(\text{C}[4]\text{RES})_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ находится в низкоспиновом состоянии 1A_1 , в то время как только 77 % $[\text{Fe}\{\text{HC}(\text{pz})_3\}_2]_2(\text{MC}[4]\text{RMS}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ соответствует низкоспиновому (НС) состоянию 1A_1 , а еще 23 % высокоспиновому (ВС) состоянию 5T_2 . В результате обработки спектров были рассчитаны изомерный сдвиг δ (относительно $\alpha\text{-Fe}$), величина квадрупольного расщепления ε и ширина линии дублета $\Gamma_{1,2}$ (см. рис. 7).

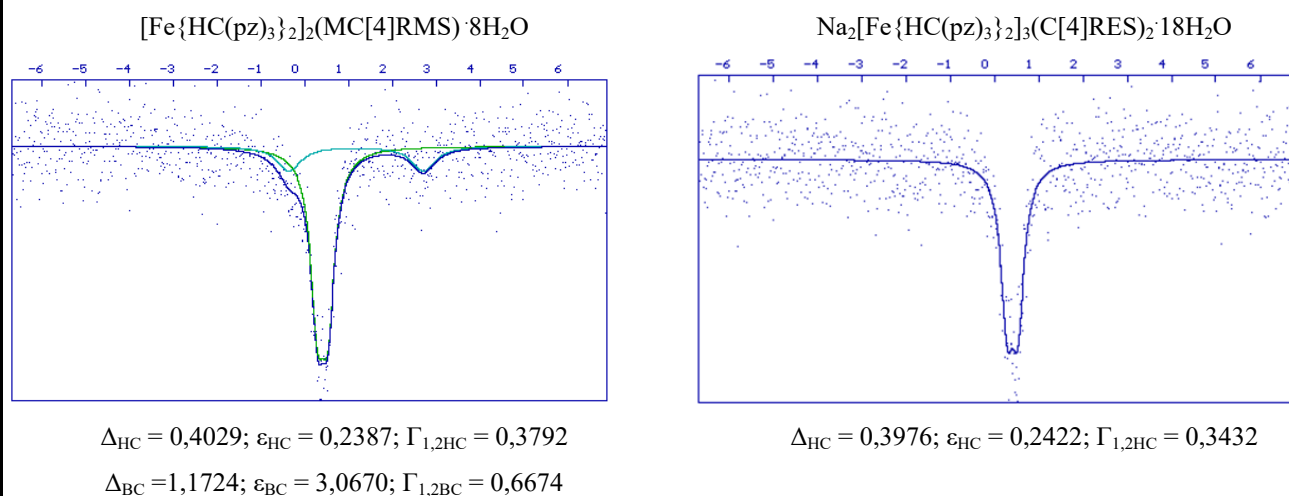


Рис. 7. Мессбауэровские спектры при 295 К

СКО во всех комплексах сопровождается термохромизмом с изменением цвета от пурпурного до белого (в случае каликс[4]арен-аниона) или от коричневого до бежевого (в случае каликс[4]резорцинарен-аниона). Проведённое исследование позволило нам достичь более предпочтительных характеристик СКО для соединений, которые можно использовать в качестве перспективных материалов для молекулярных сенсоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Gülich, H. Goodwin, Spin Crossover in Transition Metal Compounds I-III, Topic in Curr. Chem. Berlin. Springer-Verlag, 233-235 (2004).
2. M.A. Halcrow, Spin-Crossover Materials Properties and Applications, J. Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, 2013.
3. M. Shatruk, H. Phan, B.A. Chrisostomo, A. Suleimenova, Coord. Chem. Rev. 289 (2015) 62-73.
4. S. Brooker, Chem. Soc. Rev. 44 (2015) 2880-2892.
5. L.G. Lavrenova, O.G. Shakirova, Eur. J. Inorg. Chem. 5-6 (2013) 670-682.
6. O. Kahn, J. Kröber, C. Jay, Adv. Mater. 4 (1992) 718-728.
7. P. Gamez, J.S. Costa, M. Quesada, G. Aromi, J. Chem. Soc. Dalton Trans. (2009) 7845-7853.
8. O.G. Shakirova, L.G. Lavrenova, N.V. Kuratieva, D.Yu. Naumov, V.A. Daletskii, L.A. Sheludyakova, V.A. Logvinenko, S.F. Vasilevskii, Russ. J. Coord. Chem. 36 (2010) 275-283.
9. O.G. Shakirova, V.A. Daletsky, L.G. Lavrenova, N.V. Kuratieva, E.A. Shusharina, L.A. Sheludyakova, S.F. Vasilevskii, Russ. J. Coord. Chem. 37 (2011) 511-516.
10. O.G. Shakirova, N.V. Kuratieva, E.V. Korotaev, L.G. Lavrenova, Solid State Phenomena. 233-234 (2015) 534-537.
11. O.G. Shakirova, L.G. Lavrenova, V.A. Daletsky, E.A. Shusharina, T.P. Griaznova, S.A. Katsyuba, V.V. Syakaev, V.V. Skripacheva, A.R. Mustafina and S.E. Solovieva, Inorg. Chim. Acta, 363 (2010), 4059-4064.
12. O.G. Shakirova, N.V. Kuratieva, E.V. Korotaev, L.G. Lavrenova, A. Ovsyannikov, I.S. Antipin and S.E. Solovieva, Inorg. Chim. Acta, 476 (2018), 129-135.

Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Дзюба Г. С., Щекин А. В.
ЗАВИСИМОСТЬ ТВЁРДОСТИ И МИКРОТВЁРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ
ОТ ВЕЛИЧИНЫ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК (Cu-Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B)

Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Дзюба Г. С., Щекин А. В.
Ri Hosen, E. H. Ri, A. S. Zhivetev, G. S. Dzyuba, A. V. Shchekin

**ЗАВИСИМОСТЬ ТВЁРДОСТИ И МИКРОТВЁРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ МОДИФИЦИРУЮЩИХ
ДОБАВОК (Cu-Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B)**

**DEPENDENCE OF THE HARDNESS AND MICROHARDNESS OF THE STRUCTURAL
COMPONENTS OF TIN BRONZE ON THE VALUE OF MODIFYING ADDITIVES
(Cu-Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B)**

Ри Хосен – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Ri Hosen – Doctor in Engineering, Professor, «Foundry and Metal Technology» Department, Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

Ри Эрнст Хосенович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Ernst H. Ri – Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department «Foundry and Metal Technology», Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

Живетьев Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Andrei S. Zhivetev – PhD, Assistant Professor of the Department «Foundry and Metal Technology», Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

Дзюба Геннадий Саввич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Gennadi S. Dzyuba – PhD, Assistant Professor of the Department «Foundry and Metal Technology», Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

Щекин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Andrei. V. Shchekin – PhD, Assistant Professor of the Department «Foundry and Metal Technology», Pacific National University (Russia, Khabarovsk).

Аннотация. В статье приведены результаты исследования влияния добавок различных модификаторов (Cu-Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B) на механические свойства (микротвёрдость и твёрдость) синтетической оловянной бронзы (Cu + 6,0 мас.% Sn), а также установлена закономерность изменения этих свойств в зависимости от величины модифицирующей добавки.

Summary. The article presents the results of a study of the effect of additives of various modifiers (Cu-Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B) on the mechanical properties (microhardness and hardness) of synthetic tin bronze (Cu + 6.0 wt.% Sn), as well as the regularity of changes in these properties depending on the value of the modifying additive.

Ключевые слова: медные сплавы; модифицирование; твёрдость; кальций; кадмий; титан; цирконий; микротвёрдость; твёрдый раствор.

Key words: copper alloys; modification; hardness; calcium; cadmium; titanium; zirconium; microhardness; solid solution.

УДК 669.2:620.178

Введение. Одним из основных способов улучшения литой структуры в современной металлургии является модифицирование. При небольшом расходе модифицирующих добавок можно в значительной степени улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства литого ме-

талла. Ранние исследования показали, что добавки Cu-Sn, Cd, Zr и Al-Ti-B оказывают существенное влияние на распределение элементов в α -твёрдом растворе и эвтектоиде сплавов системы Cu-Sn, а также на измельчение структурных составляющих литого образца [1].

Методики исследования. В качестве исходного материала использована оловянная бронза (Cu + 6,0 мас.% Sn), изготовленная на основе меди марки М00 и олова 01.

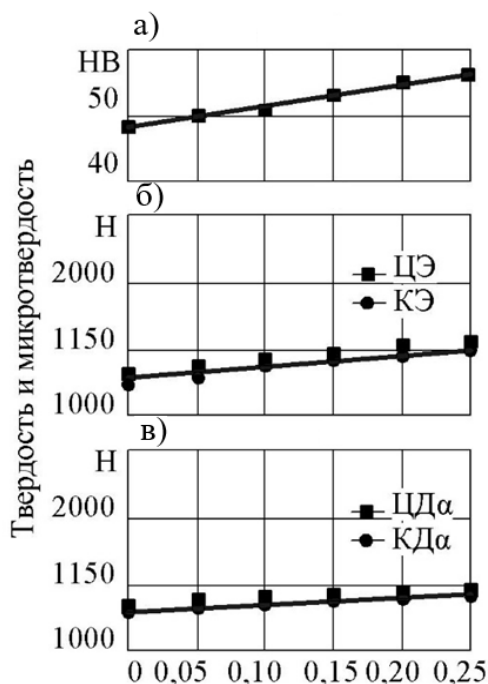
Расплав перегревали до 1350 °С, после выдержки в течение 5 мин вводили в расплав модифицирующие добавки в количестве 0,05; 0,10; 0,15; 0,2 и 0,25 мас.%. Затем расплав охлаждали со скоростью 20 °С/мин до температуры 400 °С с последующим охлаждением на спокойном воздухе.

Обоснование выбора температуры перегрева 1350 °С, несмотря на более низкие температуры на практике 1100...1150 °С, связано с тем, что при этой температуре формируется статистически более гомогенная (равновесная) структура расплава на основе меди.

В качестве модифицирующих добавок применялись: чистый титан; чистый цирконий; сплав Al-Ti(5 мас.%)-B(1,0 мас.%); сплав Cu-Sn (35 мас.%); чистый кадмий.

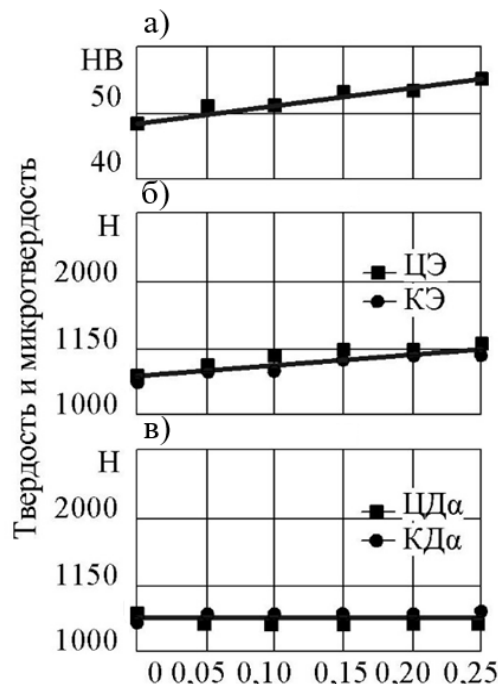
Результаты исследования. На рис. 1–4 приведены зависимости твёрдости оловянной бронзы и микротвёрдости её структурных составляющих: α -твёрдого раствора и эвтектоида (α + δ -фаза). Измерение микротвёрдости осуществлено в центре (ЦД α) и краях (КД α) дендритов α -твёрдого раствора и в центре (ЦЭ) и краях (КЭ) эвтектоидных зёрен.

Кальций. Из рис. 1, а следует, что с увеличением добавки лигатуры Cu-Sn твёрдость оловянной бронзы возрастает до 0,25 мас.%. Для выявления причины повышения твёрдости оловянной бронзы определяли микротвёрдость её структурных составляющих. Как видно, микротвёрдость эвтектоида в центре и крае зерна (см. рис. 1, б) и микротвёрдость α -твёрдого раствора (см. рис. 1, в) повышаются с увеличением добавки кальция.



Величина добавки модификаторов, мас. %

Рис. 1. Зависимость твёрдости, микротвёрдости и относительной износостойкости оловянной бронзы (Cu+6 мас.% Sn) от величины добавки модификатора Cu-Sn, мас. %

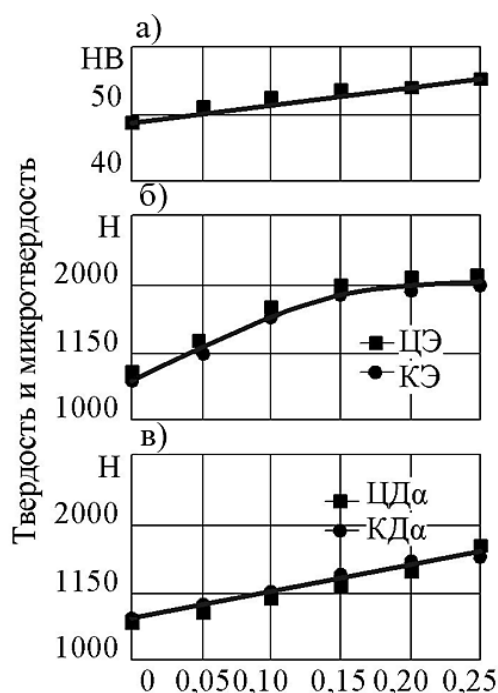


Величина добавки модификаторов, мас. %

Рис. 2. Зависимость твёрдости, микротвёрдости и относительной износостойкости оловянной бронзы (Cu+6 мас.% Sn) от величины добавки модификатора Cd, мас. %

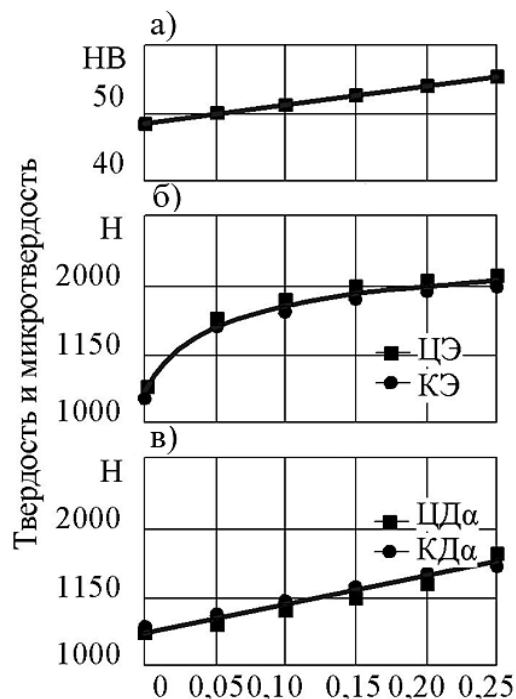
По-видимому, изменение твёрдости и микротвёрдости структурных составляющих оловянной бронзы связано со следующими обстоятельствами:

- уменьшение содержания олова в α -твёрдом растворе должно снижать его микротвёрдость вследствие меньшего искажения кристаллической решётки;
- увеличение содержания олова в эвтектоидном зерне (SnЭ) должно повышать его микротвёрдость, т.к. сопровождается искажением кристаллической решётки эвтектоидного α -твёрдого раствора;
- увеличение количественной доли электронного соединения типа $\text{Cu}_3\text{Sn}_x\text{Ca}_y$ должно повышать микротвёрдость эвтектоида и твёрдость оловянной бронзы;
- уменьшение доли субмикроскопических оксидных включений в сплаве должно способствовать снижению твёрдости сплава [2].



Величина добавки модификаторов, мас.%

Рис. 3. Зависимость твёрдости, микротвёрдости и относительной износостойкости оловянной бронзы (Cu+6 мас.% Sn) от величины добавки модификатора Zr, мас.%



Величина добавки модификаторов, мас.%

Рис. 4. Зависимость твёрдости, микротвёрдости и относительной износостойкости оловянной бронзы (Cu+6 мас.% Sn) от величины добавки модификатора Al-Ti-B, мас.%

Кадмий. Кадмий, как и кальций, способствует повышению твёрдости оловянной бронзы (см. рис. 2, а). Основными причинами её повышения являются рост микротвёрдости эвтектоидных составляющих (см. рис. 2, б) и увеличение доли эвтектоида.

Цирконий. Цирконий также способствует повышению твёрдости оловянной бронзы (см. рис. 3, а). Как видно из рис. 3, б и в, рост величины добавки циркония повышает микротвёрдость α -твёрдого раствора и эвтектоида. С другой стороны, повышение растворимости олова в структурных составляющих оловянной бронзы должно уменьшать доли кристаллизующейся электронной фазы δ переменного состава. По этой причине твёрдость сплава нивелируется на уровне твёрдости модифицированных кальцием и кадмием сплавов, несмотря на повышение микротвёрдости структурных составляющих в циркониевых сплавах.

Лигатура Al-Ti-B (см. рис. 4, а). С повышением величины добавки лигатуры твёрдость сплава увеличивается до уровня сплавов, модифицированных Ca, Cd и Zr. Микротвёрдость эвтектоида (см. рис. 4, б) повышается по мере увеличения доли лигатуры до 0,25 мас.% при возрастаю-

щей микротвёрдости α -твёрдого раствора. Следовательно, можно предположить, что основной причиной повышения микротвёрдости структурных составляющих сплавов, модифицированных лигатурой Al-Ti-B, является легирование электронных соединений бором, кислородом и алюминием, несмотря на уменьшение доли комплексно-легированных электронных соединений типа $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_x\text{Al}_y\text{B}_z\text{O}$.

Выводы. Модифицирование оловянной бронзы добавками Ca, Cd, Zr, Al-Ti-B повлекло за собой изменение содержания элементов в структурных составляющих оловянной бронзы, что способствовало увеличению микротвёрдости α -твёрдого раствора и эвтектоида, а также измельчению структуры литого металла. Эти факторы привели к тому, что с увеличением количества всех используемых модифицирующих добавок возросла твёрдость оловянной бронзы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние модифицирования на строение жидкой фазы, кристаллические параметры и на характер распределения компонентов в различных структурных составляющих оловянной бронзы / Э. А. Дмитриев, А. С. Живетьев, Э. Х. Ри, Р. Хосен // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2016. – № III-1 (27). – С. 57-64.
2. Влияние введения малых добавок компонентов на характер их распределения в структурных составляющих сплавов системы Cu-Sn / Э. Х. Ри, Х. Ри, А. С. Живетьев, Р. К. Мысик, А. В. Сулицин // Литейщик России. – 2014. – № 1. – С. 28-31.

Содержание

Управление, вычислительная техника и информатика

Жарикова Е. П., Трещев И. А., Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	4
Степьмашук С. В. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ СОГЛАСОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ С УЧЁТОМ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	9
Челухин В. А., Кружаев М. А., Пьей Зон Аунг, Абрамсон Е. В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР ДЕНЬ-НОЧЬ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	18
Ким К. И., Ким К. К., Вешкин В. В. ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ	25
Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МОЩНОСТИ В СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ.....	37
Зайченко И. В., Гордин С. А., Егорова Ю. Г. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЭРГОНОМИЧНОСТИ	45
Дерюжкова Н. Е., Купова А. В., Соловьёв В. А. НЕЧЁТКИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ	51
Дмитриева Т. Л., Уламбаяр Х. РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ УСЛОВНО ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ	59
Черный С. П., Бузикаева А. В., Тимофеев А. К., Енин Э. Д., Шестаков М. И. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВНУТРЕННИМ КАСКАДОМ.....	73

Машиностроение

Сарилов М. Ю., Палкин Д. А., Минаков М. В. К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	83
Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Буравицын Д. А. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОМПОНОВОК МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ	93
Самар Е. В. ВЛИЯНИЕ СМАЗКИ НА КОНТАКТНО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ	99

Металлургия и материаловедение

Башков О. В., Кхун Хан Хту Аунг ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ И ВНУТРИ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ	106
Шакирова О. Г. НОВЫЕ КООРДИНАЦИОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗА(II) С ТРИС(ПИРАЗОЛ-1-ИЛ)МЕТАНОМ И КАЛИКС[4]АРЕНАМИ/РЕЗОРЦИНАРЕНАМИ:- СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СПИН-КРОССОВЕР И ТЕРМОХРОМИЗМ	113
Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Дзюба Г. С., Щекин А. В. ЗАВИСИМОСТЬ ТВЁРДОСТИ И МИКРОТВЁРДОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК (CU-CA, CD, ZR, AL-TI-B)	69

Научное издание

Учёные записки КнАГТУ
2020 № 1-1(41)
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор
С. Н. Иванов

Подписано в печать 24.03.2020

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 30050.

Отпечатано в типографии
КнАГУ
681013, г. Комсомольск-на-А-
муре,
пр. Ленина, д. 27.

