

ISSN 0013-5860





ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается с января 1930 года

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭлНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить
в INTERNET через службу ИНФОМАГ,
организованную в Московском физико-техни-
ческом институте.

Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном
объеме и выходит в США в издательстве
"ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New
York, N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединенному каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс
— 71111.
В редакции можно подписаться на журнал с
любого месяца и приобрести отдельные номера
за прошлые и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал «Электротехника»
обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения
авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несет.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтamt, а/я 648.

Адрес редакции: 123242, Москва, Зоологическая ул., 11, комн. 213 Телефон/факс: 254-11-52

E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

№ 10 ОКТЯБРЬ 2002

СОДЕРЖАНИЕ

Копылов И.П., Лопухина Е.М., Юргенсон Т.С. Кафедре электромеханики МЭИ (ТУ) 70 лет 2

Лопухина Е.М., Осин И.Л., Семенчуков Г.А., Сентюрихин Н.И., Татаринов М.Г. Становление, развитие и перспективы научного направления электрические машины малой мощности на кафедре электромеханики МЭИ 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Чувашев В.А., Броди В.Я., Папазов Ю.Н., Дудник М.З. Взрывобезопасные асинхронные двигатели привода электромеханических ключей... 15

Чувашев В.А., Броди В.Я., Папазов Ю.Н., Гринь Г.М., Мухаметшин Н.А. Совершенствование асинхронных двигателей малой мощности 21

Чувашев В.А., Железняков А.В., Папазов Ю.Н., Дудник М.З., Демченко В.Н. Математическая модель взрывозащищенного асинхронного погружного электродвигателя для привода центробежных бесштанговых насосов 27

Андранинов М.В., Родионов Р.В. Цифровой способ измерения скольжения при испытаниях асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором 34

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Акимов Л.В., Долбня В.Т., Пирожок А.В. Астатические регуляторы скорости для двухмассового электропривода ТРН-АД с нелинейной характеристикой нагрузки 36

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

Юркевич В.М. Синтез силовых контактных соединений проводников 45

НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Копылов И.П. Электромеханика Солнечной системы 50

ИСТОЧНИКИ ТОКА

Баюнов В.В., Подалинский Ю.А., Барсукова М.М., Коликова Г.А. Изменение напряжения во время разряда герметизированного свинцового аккумулятора 54

Коликова Г.А., Барсукова М.М. Влияние температуры на электрические характеристики герметизированных свинцовых аккумуляторов с абсорбированным электролитом 57

КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Рыбаков Ю.В. Модель деформации при прокатке кабельной металлической оболочки 61

БИБЛИОГРАФИЯ

Алиев И.И. Рецензия на учебник "Проектирование электрических машин" 65

CONTENTS

Kopilov I.P., Lopuhina E.M., Yurgenson T.S. The seventieth anniversary of MPEI (TU) Department of electromechanics 2

Lopuhina E.M., Osin I.L., Sentiurihin N.I., Tatarinov M.G. Scientific line of lower-power electric machines at MPEI (TU) Department of electromechanics: the making, development and future trends 6

ELECTRIC MACHINES

Chuvashev V.A., Brodi V.A., Papazov Y.N., Dudnik M.Z. Explosion-proof asynchronous motors for electromechanical switches drive 15

Chuvashev V.A., Brodi V.A., Papazov Y.N., Grin G.M., Muhametshin N.A. Development of lower-power asynchronous motors 21

Chuvashev V.A., Geleznyakov A.V., Demchenko V.N., Papazov Y.N., Dudnik M.Z. Mathematical model of explosion-proof submersible asynchronous electric motor for rotary rodless pumps drive 27

Andrianov M.V., Rodionov R.V. Digital method of motor slip measurement when testing asynchronous squirrel-cage motors 34

ELECTRIC DRIVE

Akimov L.V., Dolbnya V.T., Pirogok A.V. Astatic regulators of speed for two-mass electric drive of TRU-AM with non-linear load characteristic 36

RESEARCH AND DEVELOPMENT

Yurkevich V.M. Synthesis of power contacting conductor joints 45

SCIENTIFIC HYPOTHESES

Kopilov I.P. Solar system electromechanics 50

CURRENT SOURCES

Bayunov V.V., Podalinsky Y.A., Barsukova M.M., Kolikova G.A. Voltage change during the discharge of sealed lead accumulator 54

Kolikova G.A., Barsukova M.M. Temperature influence on electrical characteristics of sealed lead accumulators with absorbed electrolyte 57

CABLE TECHNICS

Ribakov Y.V. Deformation model of cable metal sheath during the process of rolling 61

BIBLIOGRAPHY

Aliev I.I. Review of the textbook "Electric machines design" 65

Кафедре электромеханики МЭИ (ТУ) 70 лет

КОПЫЛОВ И.П., ЛОПУХИНА Е.М., ЮРГЕНСОН Т.С.

Московский энергетический институт (МЭИ) был создан в феврале 1930 г. по постановлению Президиума Высшего Совета народного хозяйства на базе электротехнического факультета МВТУ и института народного хозяйства (ИНХ) имени Г.В. Плеханова. Электромеханический факультет, в который входила кафедра электрических машин, был организован в 1932 г. Однако развитие одной из основных специальностей факультета – электрические машины – началось еще на механическом факультете МВТУ в 1905 г. Одним из первых окончивших МВТУ по электротехнической специализации был виднейший русский электротехник, основатель московской школы электромашиностроителей (с 1938 г. академик) Клавдий Ипполитович Шенфер, учителями которого были инициаторы создания в МВТУ специализации по электротехнике профессора К.А. Круг и Б.И. Угримов.

В первую группу студентов электротехнического факультета МВТУ, специализировавшихся на электромашиностроении, входили: Б.П. Апаров, Н.М. Михайлов, Г.Н. Петров, В.М. Мартынов, М.А. Романов и окончившие МВТУ несколько ранее А.Н. Ларионов, Е.В. Нитусов, С.А. Погожев и И.И. Славцов. Одновременно электромашиностроительная специализация начала создаваться под руководством С.И. Курбатова в ИНХ и среди окончивших ее были: П.С. Сергеев, И.С. Брук, В.А. Трапезников, Д.П. Морозов, Н.В. Горюхов, Ф.А. Горяинов, Л.М. Петрова и др. В дальнейшем большинство из них работали на кафедре электрических машин МЭИ.

С 1932 по 1938 гг. заведующим кафедрой электрических машин МЭИ был К.И. Шенфер, с 1938 по 1974 гг. кафедру возглавлял Г.Н. Петров, с 1974 по 1989 гг. кафедрой заведовал И.П. Копылов, а с 1989 г. по настоящее время – В.А. Кузнецов.

Научные направления деятельности кафедры формировались в соответствии с тенденциями развития науки и техники и потребностей народного хозяйства страны. Десятки госбюджетных и хоздоговорных научных работ, проводимых на кафедре, способствовали отработке оригинальных конструкций, новых ти-

пов и серий электрических машин, развитию анализа статических и динамических режимов работы электрических машин.

Научное направление кафедры в теории трансформаторов интенсивно развивалось под руководством профессора Г.Н. Петрова (в последствии чл.-кор. АН СССР и лауреата Государственных премий СССР) и принесло кафедре заслуженное признание как центра исследований в этой области науки и техники. Широко известны фундаментальные труды Г.Н. Петрова: «Трансформаторы» (1934 г.), «Электрические машины и трансформаторы», «Электрические машины» (в трех частях), развивающие теорию трансформаторов и общую теорию электрических машин. Еще в 1948 г. совместно с группой работников Московского трансформаторного завода заведующему кафедрой электрических машин МЭИ была присуждена Государственная премия СССР за создание мощных трансформаторов для выпрямительных агрегатов. А в 1952 г. профессору Г.Н. Петрову и доценту С.С. Окуню была присуждена Государственная премия СССР за создание трансформаторов тока с компенсацией погрешностей.



Рис.1. Руководство кафедрой электрических машин МЭИ в 1963 г.: заведующий кафедрой чл.-кор. АН СССР, проф. Г.Н. Петров, парторг доцент Е.М. Лопухина, профорг Г.С. Тамоян, зам. заведующего кафедрой проф. П.М. Тихомиров

В те же годы кафедра выпустила ряд новых учебных пособий. Были изданы учебники по проектированию электрических машин под редакцией профессора П.С. Сергеева, по технологии электрических машин Н.В. Виноградова (два издания), по расчету трансформаторов профессора П.М. Тихомирова, по электрическим машинам профессора Г.Н. Петрова и краткий курс по электрическим машинам профессора П.С. Сергеева (к 50-летию кафедры). Особо хочется отметить, что сотрудники кафедры Н.В. Астахов, Н.В. Виноградов, П.С. Сергеев, Б.Ф. Токарев и ряд других принимали непосредственное участие в создании единых серий асинхронных машин и машин постоянного тока.

Впервые в мировой практике был создан принципиально новый гидрогенератор – гидрогенератор высокого напряжения, который заменил собой блок из обычного гидрогенерато-

ра и повышающего трансформатора, более экономичный по расходу конструкционных материалов, активных и изоляционных материалов. В ходе научной работы были составлены методики электромагнитного расчета и расчета тока в демпферной обмотке. По этой методике был рассчитан гидрогенератор для ГЭС Днепр-2. Расчеты показали, что его применение позволит уменьшить стоимость электрической станции более чем на 60%.

На кафедре была разработана серия регуляторов-стабилизаторов напряжения, универсальных по применению и отличающихся простотой регулирования и эксплуатации, высокими технико-экономическими показателями. Отсутствие подвижных частей и переключающих контактов обусловили высокую их надежность и длительный срок службы. Существенно улучшена и форма выходного напряжения, регули-



Рис.2. Коллектив кафедры электромеханики в 1976 г. В первом ряду (слева направо) сидят доценты В.С. Шаров и Г.С. Тамоян, профессора А.В. Иванов-Смоленский, П.М. Тихомиров, Н.В. Астахов, И.П. Копылов, Б.Ф. Токарев, Ф.М. Юферов, доценты Е.М. Лопухина и Г.К. Салгус, учебный мастер (позднее ассистент) А.Я. Титунин

ровочные свойства не зависят от нагрузки и ее коэффициента мощности. Значительно уменьшены габариты и масса.

Международное признание получили разработки кафедры в области теории и практики микромашин различного назначения: от автоматических устройств до бытовых машин малой мощности. Результаты этой работы отражены в монографиях, учебниках и учебных пособиях научной группы по микромашинам: «Электрические микромашины», «Расчет электродвигателей однофазного и трехфазного тока» (издана также в Китае и Болгарии), «Асинхронные микромашины с полым ротором», «Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором», «Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности», «Испытание электрических микромашин» и др. Вышел также впервые в свет учебник «Электрические микромашины автоматических устройств» Ф.М. Юферова.

Проблемы вибраций и шумов в электрических машинах, обусловленных электромагнитным полем, решались в научной группе под руководством профессора В.Н. Астахова. В результате теоретических и экспериментальных исследований был разработан целый ряд практических мер по уменьшению вибраций и шумов. В содружестве с машиностроительным заводом «Коммунар» выполнены исследовательские и проектные работы, позволившие понизить уровень шума пылесосов «Чайка» на 3–5 дБ без снижения аэродинамических показателей и повысить ресурс однофазных коллекторных двигателей на 30%. В масштабах только одного завода это принесло миллионы рублей экономии в год.

В научной группе профессора Б.Ф. Токарева были созданы погружные электродвигатели постоянного тока, заполненные жидким диэлектриком. При этом были разработаны методики электромагнитного, теплового и гидродинамического расчетов, методика оценки коммутации и искрения. Решены вопросы конструирования отдельных узлов и компоновки погружного электродвигателя в целом. Исследование щеточного контакта и гидродинамических потерь позволило улучшить технико-экономические показатели машин и повысить их надежность.

В научных исследованиях и печатных трудах профессора А.В. Иванова-Смоленского и его учеников был разработан современный метод расчета поля – метод зубцовых конту-

ров, дающий широкие возможности для быстрого моделирования электромагнитных процессов в электрических машинах. Их книга «Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах» (А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов, под редакцией А.В. Иванова-Смоленского), получила широкую известность.

Большой объем научных исследований выполнен профессором В.А. Кузнецовым и его сотрудниками при создании теории и практическом внедрении индукторных машин и коммутаторов на полупроводниковых приборах.

В проблемной лаборатории электромеханики разработана теория, методики расчета, конструкции и схемы управления шаговыми электродвигателями. Создана единая унифицированная серия шаговых электродвигателей. Разработана методика их проектирования, позволившая в сочетании с рядом предложенных усовершенствований конструкции существенно повысить использование активных материалов в двигателях новой серии и улучшить их весовые и энергетические показатели. За разработку этих двигателей коллектив ученых, среди которых был сотрудник нашей кафедры Б.А. Ивоботенко, отнесен Государственной премией СССР.

Предложенная в середине 60-х годов профессором И.П. Копыловым математическая модель обобщенного электромеханического преобразователя позволила записать дифференциальные уравнения для любой электрической машины с учетом нелинейностей, несимметрии, любого числа обмоток при несимметричном, несинусоидальном напряжении питания. Под его руководством были исследованы фундаментальные уравнения динамики электрических машин с учетом нелинейности и многих контуров, предложены уравнения, описывающие процессы преобразования энергии в индуктивных, емкостных и индуктивно-емкостных машинах. В 1973 г. вышла монография И.П. Копылова «Электромеханические преобразователи энергии», получившая широкое признание специалистов.

Еще в 1956 г. на кафедре была защищена кандидатская диссертация, при подготовке которой для решения уравнений асинхронной машины использовалась вычислительная машина. С этого времени применение ЭВМ, а затем и ПЭВМ приобретает большой размах. Ведутся работы по созданию САПР асинхрон-

ных и специальных электрических машин. Создается кафедральный вычислительный центр, который активно используется для проведения научных исследований и учебных занятий, в том числе практикума по курсовому проектированию.

Достижения в практике применения ЭВМ для решения задач элекромеханики изложены в учебнике И.П. Копылова «Математическое моделирование электрических машин», удостоенного Государственной премии СССР в 1990 г. Третье издание этой книги вышло в 2001 г. Вкладом кафедры является введение определения значений активной, реактивной и обменной мощности в динамических режимах электрических машин, определение на ЭВМ динамических КПД, коэффициента мощности и энергетического коэффициента, имеющих важное значение для развития теории электромеханического преобразования энергии.

В 1980 г. вышла книга Е.М. Лопухиной и Г.А. Семенчука «Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ», а в 1997, 1998 и 2001 гг. – книги тех же авторов «Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности».

Ученые кафедры внесли значительный вклад в развитие космической электромеханики. Профессор И.П. Копылов в последние годы

перенес достижения классической электродинамики на астрофизические объекты, создав новое научное направление в космической электромеханике – гео- и гелиоэлектромеханика.

Все годы большое внимание на кафедре уделялось учебному процессу: развитию лабораторий, разработке современных методов преподавания, созданию пособий по всем циклам лабораторных работ, курсовому и дипломному проектированию. Все пособия регулярно обновлялись и пополнялись новыми работами.

Своим богатым опытом научных исследований и преподавания кафедра всегда делилась с другими вузами страны. С 1970 по 1990 гг. ежегодно проводились занятия на факультете повышения квалификации для преподавателей-электромехаников. Каждый год выпускные работы выполняли до 45 преподавателей.

Кафедра установила тесные контакты с многими вузами и предприятиями в стране и за рубежом. За годы совместной работы защищены десятки докторских и сотни кандидатских диссертаций, авторы которых успешно трудятся в России, странах ближнего и дальнего зарубежья. Монографии, учебники и учебные пособия, написанные сотрудниками кафедры, широко используются не только в вузах страны, но и на предприятиях отрасли и за рубежом.



Рис.1. Среди выпускников слушателей факультета повышения квалификации 1970 г. преподаватели кафедры (в первом ряду в центре слева направо): доцент Е.М. Лопухина, проф. Б.Ф. Токарев, проф. Н.С. Курбатова, зав. кафедрой чл.-кор. АН СССР Г.Н. Петров и проф. Ф.А. Горяинов

За 70 лет кафедра подготовила тысячи высококвалифицированных специалистов, работающих на предприятиях, в НИИ и вузах страны и за рубежом.

Большое внимание кафедра всегда уделяла пропаганде передовых методов исследований и оригинальных решений задач в электромеханике. Ежегодно кафедра организует работу секции «Электрические машины» в рамках Международной конференции «Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение».

Подробно о работе кафедры электромеханики можно узнать на страницах кафедры в Internet по адресу: <http://elmech.mpei.ac.ru>.

Можно установить прямые контакты по телефонам и адресу электронной почты:

тел.: (095)-362-71-89, (095)-362-72-69

факс.: (095)-362-72-69

E-mail: em@mpei.ru или
elmech@srv-vmss.mpei.ac.ru.



Копылов Игорь Петрович – доктор техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии СССР, выпускник МЭИ 1952 г.



Полухина Елена Моисеевна –
канд. техн. наук, доцент, выпускник
МЭИ 1941 г.



Юргенсон Тамара Сергеевна –
канд. техн. наук, старший научный
сотрудник, выпускник МЭИ 1962 г.

Становление, развитие и перспективы научного направления электрических машин малой мощности на кафедре электромеханики МЭИ

ЛОПУХИНА Е.М., ОСИН И.Л., СЕМЕНЧУКОВ Г.А., СЕНТИОРИХИН Н.И., ТАТАРИНОВ М.Г.

Основание научного направления по микромашинам в МЭИ связано с деятельностью профессора Юрия Сергеевича Чечета. Заведовавший в то время кафедрой электрических машин чл.-кор. АН СССР Георгий Николаевич Петров активно поддерживал развитие нового научного направления.

Кафедра электромеханики (ранее – электрических машин) МЭИ, старейшая кафедра ведущего вуза страны, всегда славилась большим объемом и результативностью научных исследований и методических разработок в учебном процессе, которыми она охотно делилась с другими. Учебный процесс на кафедре всегда имеет в своей основе последние достижения отрасли, включая новые научные разработки ведущих ученых и специалистов кафедры, и тем самым обеспечивает высокий

уровень подготовки специалистов. Наряду со многими известными преподавателями на кафедре всегда трудилось большое количество научно-исследовательского персонала. В некоторые годы на кафедре насчитывалось до 280 сотрудников, всегда было много молодежи. Число аспирантов в некоторые годы превышало 50 человек, много было стажеров из других вузов и из зарубежных стран. Коллектив кафедры всегда был тесно связан с предприятиями отрасли и не только обеспечивал их квалифицированными кадрами, но и активно внедрял результаты своих научных работ, дававших весьма значительный экономический эффект.

Исследование и преподавание микромашин уже тогда выделилось в отдельное научное и научно-методическое направление. Микрома-

шины мощностью от сотых долей ватта до киловатта:

- исполнительные двигатели и тахогенераторы переменного и постоянного тока;
- микродвигатели общего применения (асинхронные трехфазные и однофазные, синхронные с постоянными магнитами, реактивные, гистерезисные);
- информационные микромашины (сельсины и поворотные трансформаторы) отличаются огромным конструктивным многообразием, многонomenклатурностью (особенно асинхронные бытового и общего применения). В СССР их выпускалось более 70 типов, причем миллионами штук в год. На производство микромашин затрачивалось больше активных материалов, чем на турбо- и гидрогенераторы вместе взятые. Развитие механизации и автоматизации производственных процессов в народном хозяйстве, применение манипуляторов, ГАП, сложных автономных комплексов во многом связано с ростом роли микромашин.

Для микромашин характерны малое число пазов, малый воздушный зазор, несинусоидальное магнитное поле в воздушном зазоре, значительные механические и добавочные потери, большое влияние оказывают зубцовые гармоники, поперечные токи в роторе. Микромашины в большинстве – это машины несимметричные и требуют применения специальных методов расчета. В них имеются различные виды асимметрии (электрическая, магнитная, пространственная). Большое влияние на протекание тепловых процессов в них оказывают даже способы крепления, которые весьма разнообразны. Очень большую роль играет технологический разброс: погрешности размеров, колебания воздушного зазора, изменение свойств материалов в зависимости от обработки, в частности сопротивления беличьей клетки, а также несовершенство процессов сборки и заливки роторов. Проектирование микромашин требует системного подхода и автоматизации. При общей методологической основе анализа микромашин и машин большей и средней мощности происходит перераспределение важности решаемых расчетных задач, приходится отказываться от ряда существенных допущений. В результате даже для аналогичных типов электрических машин могут быть получены для различной мощности противоположные выводы. Существует большое число типов микромашин, не имеющих аналогов среди крупных машин по функциональному назначению.

Методологически математическое моделирование электромагнитных процессов электрических машин различной мощности осуществляется одинаково. Однако перечень решаемых задач для микромашин оказывается значительно шире, что связано с рядом их особенностей:

- резким расширением функционального назначения микромашин, в первую очередь информационных, что приводит к необходимости решать нетипичные для крупных машин задачи;

- существенным многообразием конструктивных и схемных решений и изменением соотношения параметров и мощностей в микромашинах обычного функционального назначения (двигателей асинхронных, синхронных и постоянного тока), в результате на передний план выделяются задачи, не имеющие существенного значения для машин средней и большой мощности, и наоборот.

Большая номенклатура микромашин с разнообразным функциональным назначением ведет, с одной стороны, к невозможности разработки объектно-направленных математических моделей для каждого типа и к необходимости методо-направленных алгоритмов, с другой стороны, к огромному многообразию решаемых задач.

Под руководством Ю.С. Чечета были выполнены первые научно-исследовательские работы по исполнительным двигателям переменного тока совместно с ВНИИЭМ (г. Москва), по двигателям для медицинского оборудования с заводом "Красногвардеец" (г. Ленинград). В дальнейшем эти работы велись учениками и продолжателями Ю.С. Чечета.

Ю.С. Чечет первым систематизировал разрозненные знания в области расчета и конструирования микромашин и в 1949 г. начал чтение специального курса лекций "Электрические микромашины автоматических устройств". Его книга выдержала два издания, в последний раз она вышла в 1964 г. (посмертно). Ю.С. Чечет впервые создал на кафедре особую научно-методическую группу по микромашинам, продолжившую его работу и во многом способствовавшую развитию этого современного и важного для народного хозяйства страны направления.

В научную группу по микромашинам вошли: Елена Моисеевна Лопухина, Николай Владимиrowич Астахов, Федор Михайлович Юферов, Галина Сергеевна Сомихина, Алексей Яковлевич Титунин. Принимали участие в ее работе

Надежда Сергеевна Курбатова, Берта Львовна Крайз, Евдокия Александровна Мишарина, которые занимались исследованием и расчетом маломощных трансформаторов. Позже к группе присоединились Игорь Львович Осин, Геннадий Алексеевич Семенчуков, Виктор Тихонович Медведев, Николай Иванович Сентюрихин, Владимир Геннадиевич Машкин и др. В исследованиях по машинам малой мощности принимали участие Виктор Яковлевич Беспалов, Давид Эммануилович Брускин, Юрий Анатольевич Мошинский, Михаил Геннадьевич Татаринов, Алексей Алексеевич Кирякин.

После Ю.С. Чечета курс микромашин для разных факультетов и специальностей читали Е.М. Лопухина, Ф.М. Юферов, И.Л. Осин, Н.И. Сентюрихин.

На кафедре профессором Ф.М. Юферовым был подготовлен первый в нашей стране учебник "Электрические машины автоматических устройств", выдержавший два издания и переведенный на иностранные языки.

Специальные исследования были посвящены методике измерения электрических и неэлектрических величин, математическому моделированию микромашин, исследованию уровня звука, вибраций и радиопомех. Книга по испытаниям микромашин в лаборатории электромеханики МЭИ выдержала несколько изданий, была переведена в Болгарии и Польше, широко применялась вузами страны.

Научной группой под руководством Е.М. Лопухиной с 1958 по 2002 гг. проводились циклы научных госбюджетных и хоздоговорных работ в областях разработки теории и методики автоматизированного проектирования явнопо-

люсных и неявнополюсных асинхронных двигателей малой мощности общего назначения и автоматических устройств. Проведенные исследования в области асинхронных электрических микродвигателей можно обобщить по следующим направлениям:

- разработка математических моделей и методик автоматизированного расчета явнополюсных и неявнополюсных двигателей малой мощности разнообразных конструктивных и схемных решений;
- разработка методов оптимизации и вероятностных расчетов характеристик асинхронных микромашин разнообразных конструктивных и схемных решений;
- создание системы автоматизированного проектирования асинхронных машин малой мощности.

Хоздоговорные работы выполнялись по заданию предприятий объединения "Эльфа" и выделившегося из него НИИ по созданию двигателей серии КД, с ЯЭМЗ по разработке явнополюсных двигателей с короткозамкнутыми витками 1ДВЛВ и ЗДВЛВ, НИИэлектромаш (г. Ереван, Армения) по однофазным модификациям серий 4А и АИ, с ВНИИЛтексмаш и другими предприятиями (табл.1).

С этими заводами и НИИ работы велись в течение многих лет и были направлены на создание серий и параметрических рядов асинхронных двигателей малой мощности с распределенной обмоткой на статоре и явнополюсных. Заметный экономический эффект был достигнут благодаря разработке в течение ряда лет теории и методики автоматизированного проектирования асинхронных двигателей.

Начиная с 1943 г. на кафедре электрических машин Е.М. Лопухиной проводилась научно-исследовательская работа по созданию теории, математических моделей и методике автоматизированного проектирования асинхронных исполнительных микродвигателей (ИД) с полым немагнитным ротором (ИДП) и с короткозамкнутым ротором (ИДК). Следует отметить, что технологический уровень многих устройств автоматики и телемеханики, а также приборных систем в авиации и судостроении зависит от асинхронных ИД. Экспериментальная часть исследований ИДП проводилась в НИИ-10. Было найдено аналитически распределение вихревого тока в полом немагнитном роторе и определено его сопротивление.

Именно для этих двигателей был предложен в дальнейшем параметрический метод



Научная группа по разработке микромашин в настоящее время: в первом ряду слева направо – проф. И.Л.Осин, доценты Е.М.Лопухина, Г.А.Семенчуков, во втором ряду – доценты М.Г.Татаринов, Н.И.Сентюрихин, ст. научн. сотрудник В.Г.Машкин

Таблица 1

Внедрение результатов автоматизированного проектирования асинхронных двигателей малой мощности

| Тип ДА | Обозначение ДА | Изготовитель | Практический эффект | Экономический эффект, руб/шт. (цены 1990 г.) | Объем выпуска, тыс. шт. | Экономический эффект, тыс. руб (цены 1990 г.) | Назначение |
|---|---|--|---|--|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| ДАК | КД60-2/45Р | ЭТЗ (Воронеж) ПО "Эльфа" | Снижение G на 6,2%, Повышение K_m до 1,75, Повышение K_n до 0,55, Снижение уровня звука до 37 дБ·А | 7,13 | 350(1987) 305(1988) 465(1989) | 250 217,5 331,6 | Бытовые приборы |
| | КД120-2/56Р | ЭТЗ (Армавир) "Электротехника" (Николаев) | Снижение G на 11,5%, Снижение уровня звука до 56 дБ·А. | 3,75 | 600(1987) 530(1988) 550(1989) | 225 198,8 206,3 | Стиральные машины |
| ДАО с короткозамкнутым витком | ЗДВЛВ | ЯЭМЗ НЭВЗ | Повышение КПД на 2%, Повышение $\cos \varphi$ на 3% | 0,67 | 1057 | 70,62 | Бытовые вентиляторы |
| | 1ДВЛВ | ХЭАЗ "Красный металллист" (Грузэнерго) | Снижение G Снижение V | 0,097 | 800 | 78,17 | Тепловентилятор "Климат" |
| ДАК | Многоскоростные DAO | МЭИ ЧГУ | Расширение диапазона регулирования скорости | | макеты | | Бытовые вентиляторы |
| | АГК $P_n = 180, 200, 250$ Вт $2p = 2$ | ВНИИЛтэкмаш | Повышение КПД на 7%, Повышение холодильного коэффициента на 20% | 2,49 | 35 | 87 | Компрессор торгового холодильника |
| DAO с r_n | | НИИ "Якорь" | Сокращение сроков разработки | Передан комплекс программ | | 60 | Компрессор холодильника |
| Единая серия DAO, DAO с r_n , DAO с C_n | $h = 50, 56, 63$ мм АИРШ АИРЕ АИРУ | ЛЭЗ (Лобня) Армэнерго | Снижение G Повышение КПД Повышение K_m Повышение срока службы | 3,95 7,73 9,74 | 30(1989) 10(1990) 10(1990) | 23,7 15,4 19,8 | Двигатели общего применения |

расчета, который использовался в алгоритмах поверочного и оптимизационного расчетов и позволял проектировать двигатели с заданным комплексом свойств, управляя значениями относительных параметров их схемы замещения. ИД рассматривались как элемент следящих систем, что позволило выработать рекомендации по выбору сопротивления усилителя в обмотке управления и предложить методику оценки устойчивости системы в зависимости от степени нелинейности механической и регулировочной характеристик машины.

В 1977–1985 гг. выполнялась госбюджетная научно-исследовательская работа "Разработка оптимизированных серий управляемых и неуправляемых асинхронных микродвигателей с учетом влияния высших гармонических". В этой работе параметрический метод был распрост-

ранен и на неуправляемые (нерегулируемые) асинхронные двигатели с распределенной обмоткой на статоре и короткозамкнутым ротором. Для ИД были составлены алгоритмы и программы проектирования машин для наиболее распространенных схем включения: "сдвиг схемой" и конденсаторного двигателя.

Созданные программы были опробованы при расчетах двигателей серии ДКИ и переданы на завод "Металлист" (г. Серпухов). Результаты НИИР отражены в табл.2.

В области неуправляемых двигателей значительный подтвержденный актами предприятий экономический эффект был достигнут при разработке одного из важнейших участков серии АД – КД, первой в мире единой серии двигателей бытового назначения. В создании этой серии члены научной группы участвовали с

самого начала и во многом определили техническую политику и структуру серии. Машины этой серии высоко унифицированы, надежны в эксплуатации, отличаются высокой степенью использования габарита, технологичны и имеют улучшенные моментные и виброакустические показатели. Конденсаторные двигатели КДР мощностью от 6 до 60 Вт (табл.3), двухполюсные и четырехполюсные выпускались на многих заводах страны сотнями тысяч штук и предназначались для большого числа разнообразных бытовых приводов, заменив в них устаревшие двигатели. Только один двигатель

КД 60-2/45Р использовался в таких широко распространенных приводах, как электромясорубка, соковыжималка, овощерезка и др.

Научная работа по созданию серии КДР была поощрена премией Минвуза СССР.

Среди большого числа госбюджетных работ, выполненных научной группой по микромашинам, можно отметить работы по математическому моделированию асинхронных двигателей малой мощности разных конструктивных исполнений и схемных решений и работы по автоматизации проектирования этих двигателей, доведенные до создания первой очереди

Таблица 2

Технические данные ИД с короткозамкнутым ротором серии ДКИ $f=400$ Гц, $2p=4$

| Параметры | ДКИ 1-12ТВ | ДКИ 2,5-12ТВ | ДКИ 6-12 ТВ | ДКИ 16-12 ТВ |
|---|------------|--------------|-------------|--------------|
| Напряжение U_c , В | 115 | 115 | 115 | 115 |
| Напряжение U_r , В | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Пусковой момент $M \cdot 10^{-4}$, Н/м (не менее) | 30,4 | 64 | 127 | 294 |
| Полезная мощность $P_{\text{н}}$, Вт | 1,0 | 2,5 | 6,0 | 18,0 |
| Номинальная частота вращения n_n , об/мин | 8600 | 9800 | 9500 | 10000 |
| Момент инерции J , $\text{кг}\cdot\text{м}^2 \cdot 10^{-8}$ | 5,9 | 17,7 | 65,7 | 196 |
| Электромеханическая постоянная времени T_m , мс | 10 | 15 | 20 | 30 |
| КПД η , % | 12 | 22 | 30 | 43 |
| Масса G , кг | 0,1 | 0,18 | 0,35 | 0,75 |

Таблица 3

**Технические данные асинхронных конденсаторных микродвигателей бытового назначения серии КДР
 $U_n = 220$ В, $f = 50$ Гц**

| Параметр | КД-16-2 | КД-25-2 | КД-40-2 | КД-60-2 | КД-6-4 | КД-10-4 | КД-16-4 | КД-25-4 | КД-40-4 |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| P_{2n} , Вт | 16 | 25 | 40 | 60 | 6 | 10 | 16 | 25 | 40 |
| I_n , А | 0,26 | 0,35 | 0,41 | 0,57 | 0,20 | 0,27 | 0,32 | 0,38 | 0,52 |
| η , % | 34 | 37 | 49 | 52 | 16 | 18 | 24 | 35 | 40 |
| $\cos \phi_n$ | 0,8 | 0,8 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,82 | 0,8 | 0,8 |
| n_n , мин^{-1} | 2800 | 2800 | 2770 | 2770 | 1350 | 1350 | 1350 | 1390 | 1390 |
| K_{\max} | 1,7 | 1,7 | 1,75 | 1,75 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,75 | 1,75 |
| K_n | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 |
| K_m | 0,6 | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,65 | 0,6 |
| C , мкФ | 1,0 | 2,2 | 2,2 | 2,0 | 4,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 |
| G , кг | 1,3 | 1,4 | 1,95 | 2,25 | 1,0 | 1,3 | 1,8 | 1,95 | 2,25 |

Таблица 4

Технические данные асинхронных микродвигателей с экранированными полюсами $U_n = 220$ В, $f = 50$ Гц

| Параметр | 1ДВЛВ-0,6-2 | 1ДВЛВ-1-2 | 1ДВЛВ-1,6-2 | 1ДВЛВ-2,5-2 | ЗДВЛВ-4-4 | ЗДВЛВ-6-4 | ЗДВЛВ-10-4 |
|---------------------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| P_{2m} , Вт | 0,6 | 1,0 | 1,6 | 2,5 | 4,0 | 6,0 | 10,0 |
| I_n , А | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,12 | 0,19 | 0,27 | 0,42 |
| η , % | 7,0 | 9,0 | 11,0 | 13,0 | 15,0 | 17,0 | 20,0 |
| $\cos \phi_n$ | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,63 | 0,60 | 0,54 |
| n_n , мин^{-1} | 2400 | 2340 | 2180 | 2350 | 1250 | 1290 | 1230 |
| K_M | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| K_n | 0,4 | 0,45 | 0,47 | 0,55 | 0,45 | 0,4 | 0,4 |
| G , кг | 0,35 | 0,45 | 0,50 | 0,65 | 0,79 | 0,81 | 0,91 |

САПР. Экономическая эффективность внедрения созданного программного комплекса была подсчитана по методике ВНИИЭМ на примере оптимизации двигателей серии АИР с высотой оси вращения $h = 56$ мм. Двигатели были внедрены на электромашиностроительном заводе ЛЭЗ (г. Лобня).

Впервые удалось создать методику автоматизированного оптимизационного проектирования явнополюсных асинхронных двигателей с экранированными полюсами и учесть влияние технологического разброса входных конструктивно-технологических показателей и качества электроэнергии на их выходные характеристики. Эти двигатели очень просты по конструкции и в изготовлении, но весьма сложны с точки зрения физических процессов в машине. В них имеются все виды асимметрии (магнитной, пространственной, электрической) и насыщающиеся участки магнитной цепи. Комплекс работ по явнополюсным двигателям с экранированными полюсами был успешно выполнен в сотрудстве с ЯЭМЗ (г.Ярославль) под руководством Е.М.Лопухиной, а затем Н.И. Сентюрихина. В табл.4 приведены данные внедренных на ЯЭМЗ двигателей серии ЗДВЛВ для бытовых вентиляторов.

Впоследствии Е.М. Лопухина на основе проводимых научно-исследовательских работ создала курс лекций "Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности" для студентов 5-го курса.

В 1997-1998 гг. Е.М. Лопухиной был подготовлен для магистров новый курс лекций: "Генерация идей и инженерное творчество". Упражнения к курсу направлены на развитие творческого воображения, посвящены деловым играм, мозговому штурму, деловой игре по групповому экспертированию, использованию алгоритмов АРП и АРИЗ для решения творческих и изобретательских задач, сенектике, психологии делового общения. Все домашние задания способствовали развитию навыков научной деятельности.

Активное участие в научно-исследовательской работе кафедры принимали студенты. На кафедре долгое время функционировал студенческий семинар для студентов 4–5 курсов, дипломников и аспирантов по автоматическому проектированию микромашин. На этих занятиях решались задачи экспертной оценки, патентного поиска, проводимые нашим бывшим аспирантом, представителем патентной библиотеки В.П. Комаровым. Дипломники док-

ладывали о результатах преддипломной практики на предприятиях "Эльфа" (г. Вильнюс, Литва), НИИэлектромаш (г. Ереван, Армения), ЯЭМЗ (г. Ярославль, РФ), НИИ технологии микромашин (г. Тбилиси, Грузия) и др., с которыми выполнялись совместные исследования серии двигателей малой мощности.

Ф.М. Юферов, работая для Судпрома, значительно сократил брак выпускаемых бесконтактных сельсинов, показав на практике, что означает теория.

В середине 60-х годов группа инженеров под руководством Ф.М. Юферова начала выполнять программу научно-исследовательских работ по созданию синхронных микродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), обладающих высокими энергетическими показателями и малой нестабильностью мгновенной угловой скорости. Совместно с НПО "Энергия" (г. Воронеж) был разработан отрезок серии универсальных СДПМ, рассчитанных на работу от однофазной и трехфазной сети с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Двигатели этого отрезка серии выполнены четырехполюсными, имеют частоту вращения 1500 об/мин и рассчитаны для работы в нормальных и тяжелых условиях. Технические данные универсальных СДПМ приведены в табл.5.

В качестве материала постоянных магнитов в указанных двигателях применен сплав ЮНДК35Т5. Двигатели мощностью от 1 до 6 Вт выполнены с ротором аксиальной конструкции, двигатель мощностью 25 Вт – с ротором радиальной конструкции.

В табл.6 приведены технические данные серии трехфазных двигателей мощностью от 6 до 180 Вт для привода лентопротяжных механизмов с высокой стабильностью частоты вращения, разработанных совместно с ВНИИЭМ. Двигатели этой серии имеют низкий уровень шумов и рассчитаны для работы от сети с напряжением 36 В и частотой 50 Гц. Все двигатели имеют частоту вращения 1500 об/мин и обеспечивают втягивание в синхронизм нагрузки с моментом инерции, равным моменту инерции ротора, в течение времени не более 0,6 с. Для устранения вредного влияния высших гармонических, кратных трем, обмотки статора соединены в звезду с изолированной нейтралью. Двигатели первых двух габаритов СДМ-11 и СДМ-22 выполнены с ротором аксиальной конструкции, двигатели СДМ-31, СДМ-32, СДМ-41 и СДМ-42 – с ротором радиальной кон-

Таблица 5

Технические данные универсальных синхронных микродвигателей с постоянными магнитами

| Параметр | ДС-1-1500 | | ДС-2,5-1500 | | ДС-6-1500 | | ДС-10-1500 | | ДС-25-1500 | |
|------------------|--------------|-------|-------------|-------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | Режим работы | | | | | | | | | |
| | I | II | I | II | I | II | I | II | I | II |
| P_{2H} , Вт | 1,5 | 1,0 | 3,0 | 2,5 | 8,0 | 6,0 | 13 | 10 | 30 | 25 |
| I_H , А | 0,058 | 0,084 | 0,092 | 0,107 | 0,132 | 0,158 | 0,175 | 0,20 | 0,307 | 0,31 |
| η_H | 0,1 | 0,077 | 0,15 | 0,143 | 0,32 | 0,207 | 0,44 | 0,277 | 0,56 | 0,49 |
| $\cos \varphi_H$ | 0,62 | 0,722 | 0,634 | 0,743 | 0,53 | 0,835 | 0,44 | 0,821 | 0,47 | 0,746 |
| $M_{вых}/M_H$ | 1,7 | 3,0 | 1,2 | 1,3 | 2,0 | 1,8 | 2,0 | 1,8 | 2,0 | 1,7 |
| M_n/M_H | 1,9 | 1,7 | 2,0 | 1,9 | 3,8 | 2,0 | 3,5 | 1,25 | 2,6 | 2,2 |
| I_n/I_H | 1,5 | 1,5 | 1,8 | 2,0 | 3,5 | 2,5 | 3,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| C_p/C_n , мкФ | – | 1,0 | – | 1,25 | – | 2,5 | – | 3 | – | 3/8 |

Примечание. I – трехфазный режим, II – однофазный режим.

Таблица 6

Технические данные трехфазных синхронных микродвигателей с постоянными магнитами

| Параметр | СДМ-11 | СДМ-12 | СДМ-21 | СДМ-22 | СДМ-31 | СДМ-32 | СДМ-41 | СДМ-42 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P_{2H} , Вт | 6 | 10 | 16 | 25 | 40 | 60 | 120 | 180 |
| I_H , А | 0,41 | 0,71 | 1,03 | 1,55 | 2,2 | 2,94 | 4,5 | 5,8 |
| η_H | 0,38 | 0,36 | 0,47 | 0,45 | 0,59 | 0,63 | 0,71 | 0,75 |
| $\cos \varphi_H$ | 0,58 | 0,62 | 0,53 | 0,56 | 0,49 | 0,52 | 0,61 | 0,66 |
| $M_{вых}/M_H$ | 1,5 | 1,34 | 1,38 | 1,34 | 1,35 | 1,54 | 1,48 | 1,5 |
| $M_{вых}/M_H$ | 2,1 | 2,25 | 1,66 | 1,8 | 2,35 | 1,95 | 1,85 | 1,56 |
| M_n/M_H | 3,3 | 2,6 | 3,3 | 3,35 | 3,2 | 3,1 | 2,3 | 2,05 |
| I_n/I_H | 2,7 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,8 | 2,75 | 3,95 | 3,95 |

Таблица 7

Технические данные частотно-регулируемых синхронных двигателей

| Параметр | СДПМ-4 | СДПМ-5 | СДПМ-6 | СДПМ-7 |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| U_H , В | 196/84 | 200/49,3 | 190/85 | 212/94,4 |
| f , Гц | 70/28,3 | 150/30 | 200/83,3 | 200/83,3 |
| M_H , Н·м | 5 | 5 | 8 | 5 |
| n_H , об/мин | 2100/850 | 4500/900 | 6000/2500 | 6000/2500 |
| I_H , А | 3,2/3,2 | 5,7/5,7 | 12/11 | 8,0/7,8 |
| η , % | 84/83 | 83/81 | 86/88 | 80/84 |
| $\cos \varphi_H$, % | 0,84/0,8 | 0,95/0,86 | 0,95/0,94 | 0,91/0,85 |
| $M_{вых}$, Н·м | 16,8/15,2 | 12,8/13,7 | 17,9/19,3 | 15,3/16,4 |
| $M_{вых}$, Н·м | 13,4/12,7 | 3,7/10,8 | 2,6/5,2 | 4,8/7,2 |
| Возбужденность, о.е. | 0,42/0,4 | 0,5/0,42 | 0,48/0,45 | 0,47/0,43 |
| I_n , А | 38,2/26,8 | 59,3/43,6 | 104/100 | 92/86 |
| M_n , Н·м | 12,3/14,8 | 4,8/12,6 | 8,8/19,5 | 10,3/21,4 |

Примечание. В числителе приведены значения параметров при верхней границе диапазона частоты вращения, в знаменателе – при нижней границе.

структур. Постоянные магниты в двигателях всех габаритов выполнены в виде "звездочек" из сплава ЮНДК35Т5.

В начале 80-х годов совместно с ВНИПТИЭМ (г. Владимир) на кафедре электрических машин под руководством проф. Ф.М. Юферова в течение ряда лет велись работы по созданию машин малой мощности с малоотходными магнитопроводами. При производстве таких машин не применяются вырубные штампы, а ярма и зубцово-пазовые зоны получаются путем гибки из стальных лент. Эта технология позволяла резко снизить отходы дорогостоящей электротехнической стали. Предложенная конструкция магнитопроводов позволяла выполнить отдельные его части (ярма, зубцово-пазовые зоны) из стали разной толщины, получать совершенно гладкие поверхности пазов, укладывать обмотку в открытые до сборки со стороны ярма пазы, выполнять зубцы весьма малой толщины, что невозможно при применяемой в настоящее время штамповке. Коллегия Министерства электротехнической промышленности в 1982 г. одобрила проведение исследований в данной области. К разработке технического оборудования для серийного выпуска таких машин был привлечен ряд научно-исследовательских технологических институтов страны.

Научные исследования в области электрических машин малой мощности продолжаются на кафедре электромеханики и в настоящее время.

В начале 90-х годов совместно с НИИПМ и заводом "Дзержинец" были разработаны частотно-регулируемые синхронные двигатели с постоянными магнитами и асинхронным пуском с номинальными моментами 5 и 8 Н·м и частотами вращения от 840 до 6000 об/мин. Эти двигатели предназначены для нужд химической промышленности (изготовление синтетических волокон) и имеют лучшие энергетические и массогабаритные показатели по сравнению с зарубежными (в том числе японскими) аналогами. Они заменили более энергоемкие синхронные реактивные двигатели, используемые в электроприводах различного рода ленто- и нитепротяжных механизмов. Все двигатели, технические данные которых приведены в табл.7, выполнены на базе магнитопровода статора асинхронного двигателя серии А1 с высотой оси вращения 112 мм. Роторы коллекторного типа содержат тангенциально намагниченные феррито-стронциевые магни-

ты, размещенные между клиновидными полюсами. Двигатели питаются от преобразователя частоты типа ЭКТ 2Р63/380.200 с рабочим диапазоном частоты 15 – 200 Гц и линейных напряжений 60 – 380 В.

В 1998–1999 гг. выполнялась работа по гранту Минвуза Российской Федерации на тему: "Исследование возможностей автоматизированного проектирования для создания энергосберегающих однофазных асинхронных двигателей с несимметричными трехфазными обмотками" совместно с Лобненским ЭМЗ.

В настоящее время совместно с предприятием ЗАО "Агрегат-Привод", а также по гранту Минвуза Российской Федерации ведутся работы по созданию однофазных асинхронных двигателей повышенной мощности (6–8 кВт).

Основные направления работы по дальнейшему совершенствованию электрических машин малой мощности:

- создание систем автоматизированного проектирования (САПР с применением перспективных ЭВМ);
- электронизация микродвигателей переменного тока и бытовых приборов, в которых она применяется для расширения функциональности и снижения энергопотребления;
- создание новых унифицированных конкурентоспособных микромашин общепромышленного и бытового назначения с учетом новейших достижений в области материалов, конструкций и технологии изготовления двигателей;
- повышение удельного веса машин с более высокими энергетическими и конструктивными показателями;
- широкое распространение интеграции микромашин с управляющей электроникой нового поколения, что позволит иметь высокоэффективные управляемые самонастраивающиеся интеллектуальные приводы для "умных" устройств будущего;
- не только расширение процесса преобразования энергии в микромашинах, например как это достигается на современном этапе в вентильно-индукторных двигателях, но и оптимизация этого процесса;
- новые задачи в проектировании двигателей малой мощности как для автомобилей, так и для средств малого передвижения в связи с переводом всего транспорта в будущем на электрическую энергию;
- создание и внедрение современных измерительных комплексов и автоматизированных систем для испытания микромашин и оп-

ределения всех контролируемых параметров.

Список литературы

1. Чечет Ю.С. Управляемый асинхронный двигатель с полым ротором. М.: Госэнергоиздат, 1955.
2. Чечет Ю.С. Электрические микромашины автоматических устройств. М.: Госэнергоиздат, 1957, 1964.
3. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока. М.: Госэнергоиздат, 1961.
4. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Асинхронные микродвигатели с полым ротором. Теория и основы расчета. М.: Энергия, 1967.
5. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Проектирование асинхронных микродвигателей с полым ротором. М.: Высшая школа, 1968.
6. Микродвигатели для систем автоматики: Справочник / Под ред. Э.А. Лодочникова, Ф.М. Юферова. М.: Энергия, 1969.
7. Потапов Л.А., Юферов Ф.М. Измерение врачающих моментов и скоростей вращения микроэлектродвигателей. М.: Энергия, 1974.
8. Осин И.Л., Колесников В.П., Юферов Ф.М. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. 1976.
9. Кацман М.М., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических систем. М.: Высшая школа, 1979.
10. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980.
11. Астахов Н.В., Лопухина Е.М., Медведев В.Т. и др. Испытание электрических микромашин. М.: Высшая школа, 1973, 1984.
12. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1978, 1988.
13. Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики. М.: Высшая школа, 1988.
14. Осин И.Л., Антонов М.В. Устройство и производство электрических машин малой мощности. М.: Высшая школа. 1988.
15. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины. Синхронные машины. М.: Высшая школа, 1990.
16. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. Ч.1. М.: Изд-во МЭИ, 1997.
17. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. Ч.2. М.: Изд-во МЭИ, 1998.
18. Электротехнический справочник. Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1986.
19. Лопухина Е.М., Захаренко А.Б. Генерация идей и научное творчество. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
20. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрихин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. М.: Мастерство, 2001.
21. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. М.: Высшая школа, 2002.

Лопухина Елена Моисеевна – канд. техн. наук, доцент, выпускник МЭИ 1941 г.



Семенчуков Геннадий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, выпускник МЭИ 1962 г.



Осин Игорь Львович – доктор техн. наук, проф., выпускник МЭИ 1965 г.



Сентюрихин Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент, выпускник МЭИ 1972 г.



Татаринов Михаил Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, выпускник МЭИ 1973 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Взрывобезопасные асинхронные двигатели привода электромеханических ключей

ЧУВАШЕВ В.А., БРОДИ В.Я., ПАПАЗОВ Ю.Н., ДУДНИК М.З.

Предложены дополнения к существующим методикам расчета асинхронных двигателей с учетом пускового слоя в каждом стержне литой медной короткозамкнутой обмотки ротора.

В нефтедобывающей промышленности для ремонта нефтяных скважин в качестве инструмента применяются электромеханические ключи АПР-2 ВБМ и КМУ-50. Они механизируют трудоемкие операции по свинчиванию-развинчиванию колонны насосно-компрессорных труб, автоматизируют их захват, удержание на весу, освобождение и центрирование в скважине. Двигатели электромеханических ключей имеют неравномерный характер формирования нагрузки с нередкими случаями полного или частичного стопорения, особенно при пуске.

Асинхронные двигатели (АД) привода ключей во взрывобезопасном исполнении мощностью 3 кВт в продолжительном режиме S1 по ГОСТ 183-74 имеют недостаточную надежность. Их срок службы по данным ОАО "Татнефть" (Татарстан, РФ) составляет в среднем до 2,5 мес. Заменить же АД на следующую, более высокую ступень мощности невозможно из-за недопустимости увеличения габаритных и установочных размеров. Реальный режим работы АД [1] является повторно-кратковременным с частыми пусками S4 и продолжительностью включения (ПВ), равной 25–60 %, с резкими стохастическими перегрузками, иногда с полным либо частичным стопорением рабочего органа электромеханического ключа. Поэтому показатели надежности примененных АД значительно меньше указанных в нормативной документации (НД).

В результате поисково-теоретических и экспериментальных работ, особенно успехов в технологии литья меди, в том числе из медного лома [2–5], созданы опытные образцы взрывозащищенных АД с литой медной обмоткой ротора и пусковым слоем в каждом стержне обмотки, которые полностью удовлетворяют всем требованиям эксплуатации электромеханических ключей, имеют улучшенные энергомеханические характеристики по сравнению с серийными АД и показатели надежности в соответствии с требованиями НД.

Двигатели выполнены на базе серийного статора АИМ100S4 и нового ротора [6, 7] в виде литой медной короткозамкнутой обмотки с пусковым слоем в каждом стержне из сплава меди. Геометрические размеры зубцового контура ротора: высота спинки, высота паза, высота мостика, ширина равновеликого зубца, отношение верхнего и нижнего диаметров овального глубокого паза стержня, отношение высоты пускового и рабочего слоев стержня – получены путем оптимизации по показателям пуска (пусковой момент и пусковой ток), энергетики (КПД и $\cos \phi$), перегрузочной способности (максимальный момент и критическое скольжение) и полезной мощности на валу. Оптимизационные расчеты АД выполнены на основе разработанной методики электромагнитного расчета, базирующейся на известных методиках УкрНИИВЭ, но имеющей существенные отличия.

Рассмотрим некоторые наиболее значимые при расчетах особенности этих АД.

1. Схема замещения АД является основой, на базе которой осуществляются все электромагнитные, электродинамические, тепловые расчеты и построения векторных и круговых диаграмм. Для рассматриваемого АД она представлена на рис.1.

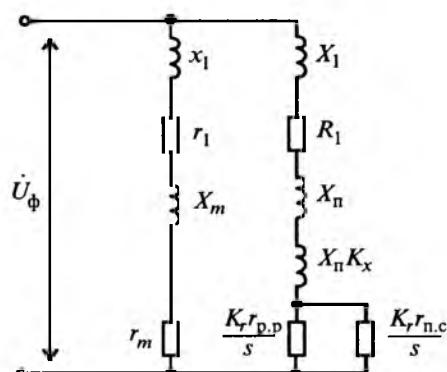


Рис.1. Схема замещения АД с пусковым слоем в верхней части стержня

Здесь x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; X_m – индуктивное сопротивление взаимоиндукции; r_m – активное сопротивление, учитывающее потери в стали; X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния,

$$X_1 = x_1 \sigma_1;$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} - j \frac{r_1}{x_m};$$

R_1 – активное сопротивление, учитывающее потери от потоков рассеяния,

$$R_1 = r_1 \sigma_1;$$

$X_{\text{л}}$ – индуктивное сопротивление от рассеяния в лобовых частях

$$X_{\text{л}} = x'_{2\text{л}} \sigma_1^2;$$

$x'_{2\text{л}}$ – приведенное индуктивное сопротивление лобовых частей обмотки ротора; $X_{\text{п}}$ – индуктивное сопротивление от потока рассеяния короткозамкнутой обмотки,

$$X_{\text{п}} = x'_{2\text{п}} \sigma_1^2;$$

$x'_{2\text{п}}$ – приведенное индуктивное сопротивление от потока рассеяния обмотки ротора; $r_{\text{p.p}}$ – активное сопротивление рабочего слоя стержня; $r_{\text{p.p}}$ – активное сопротивление пускового слоя стержня; K_r – коэффициент увеличения омического сопротивления обмотки ротора при пуске; K_x – коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления обмотки ротора при пуске; s – скольжение.

Отличительной особенностью такой схемы замещения от известных схем для глубокопазных АД является то, что параллельно сопротивлению рабочего слоя стержня добавляется сопротивление пускового слоя, так же, как и сопротивление рабочего слоя, являющееся функцией скольжения. Добавление нового параметра в схему замещения вызывает адекватные изменения структуры расчетной схемы и основных характеристик АД.

2. Влияние пускового слоя стержня на коэффициент увеличения активного сопротивления. Поперечное сечение стержня ротора с пусковым слоем представлено на рис.2.

Активное сопротивление однородного по составу стержня ротора:

$$r_{\text{cl}} = \frac{l_c K_2 \cdot 10^{-4}}{\gamma_p q_c},$$

где l_c – длина стержня; K_2 – температурный коэффициент; γ_p – удельная проводимость материала стержня; q_c – сечение стержня.

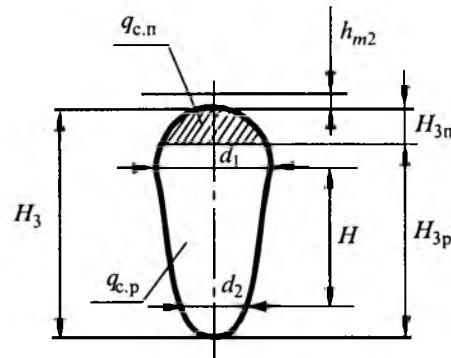


Рис.2. Поперечное сечение стержня ротора с пусковым слоем

Активное сопротивление стержня с пусковым слоем

$$r_{\text{c2}} = \frac{r_{\text{p.p}} r_{\text{p.n}}}{r_{\text{p.p}} + r_{\text{p.n}}}, \quad (1)$$

где

$$r_{\text{p.p}} = \frac{l_c K_{\text{rp}} \cdot 10^{-4}}{\gamma_{\text{p.p}} q_{c,p}}; \quad (2)$$

$$r_{\text{p.n}} = \frac{l_c K_{\text{rn}} \cdot 10^{-4}}{\gamma_{\text{p.n}} q_{c,n}}. \quad (3)$$

В этих зависимостях удельные проводимости материала рабочего и пускового слоев, а также их температурные коэффициенты формируют соответствующие омические сопротивления слоев и в конечном итоге влияют на омическое сопротивление всего стержня.

Известно, что коэффициент увеличения активного сопротивления однородного стержня глубокопазного ротора при пуске определяется зависимостью:

$$K_{r1} = \xi \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)},$$

$$\alpha_\xi = 2\pi \sqrt{\frac{f}{\rho_{\text{гор}}} \cdot 10^{-5}},$$

$$\xi = \alpha_\xi H_3,$$

где ξ – приведенная высота стержня; α_ξ – коэффициент, учитывающий вытеснения тока при пуске; $\rho_{\text{гор}}$ – среднее за время пуска удельное сопротивление материала стержня, равное для меди $\rho_{\text{гор}} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2/\text{см}$.

В случае ротора с пусковым слоем в стержне

$$K_{r2} = \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} K_{\text{rn.c}},$$

где $K_{\text{rn.c}}$ – коэффициент увеличения омического сопротивления стержня за счет пускового слоя,

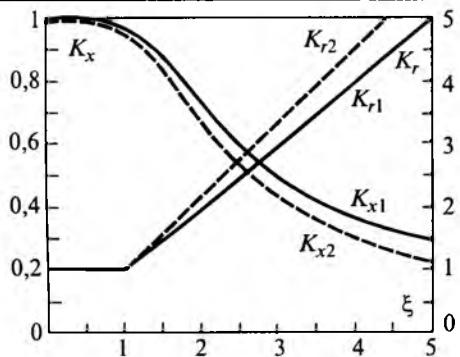


Рис.3. Зависимость коэффициентов K_r и K_x от ξ :
— стержень из однородного материала; - - - стержень с пусковым слоем

$$K_{r_{\text{п.с}}} = r_{c2}/r_{c1}. \quad (4)$$

Зависимость коэффициента K_{r1} от ξ показана на рис.3.

Анализ формул (1)–(4) при оптимальных соотношениях геометрических размеров зубцового контура ротора позволил определить зависимость $K_{r2}(\xi)$ для ротора с пусковым слоем в стержнях (см. рис. 3). Из сопоставления зависимостей $K_{r1}(\xi)$ и $K_{r2}(\xi)$ следует, что коэффициент увеличения омического сопротивления стержней при пуске в случае обмотки с пусковым слоем в стержнях выше, чем в случае обмотки из однородного материала, что приводит к снижению пускового тока и увеличению пускового момента АД.

3. Влияние пускового слоя стержня на коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления. Известно, что коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления однородного стержня глубокопазного ротора при пуске определяется зависимостью:

$$K_{x1} = \frac{2}{3\xi} \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}.$$

В этом случае коэффициент проводимости пазового рассеяния ротора

$$\lambda_{n2} = 0,66 + \lambda_m + \frac{H}{3d_1}; \quad (5)$$

$$\lambda_m = \frac{0,595 h_{m2}}{P_n} \Phi_1 Z_2 \cdot 10^{-5},$$

где λ_m – коэффициент проводимости в пазу ротора в рабочем режиме ($s = 2\% - 3\%$); P_n – номинальная мощность двигателя; Φ_1 – магнитный поток в статоре; Z_2 – число пазов ротора.

Расчеты, выполненные с помощью метода конечных элементов для любых взаимных положений зубцового контура АД в пределах одно-

го зубцового деления t_{z1} , показали, что проводимость пазового рассеяния ротора с пусковым слоем несколько меньше, чем полученная по формуле (5), а индуктивное сопротивление пазового рассеяния больше, чем у ротора с однородным материалом стержней, и, следовательно, коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления $K_{x2} < K_{x1}$. Зависимость $K_{x2}(\xi)$ для ротора с пусковым слоем в стержнях обмотки показана на рис.3 штриховой линией.

Из сопоставления зависимостей $K_{x1}(\xi)$ и $K_{x2}(\xi)$ следует, что коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления стержней ротора в случае клетки с пусковым слоем в стержнях при сопоставимых условиях меньше, чем в случае обмотки из однородного материала, что в конечном счете приводит к повышению $\cos \phi$ и перегрузочной способности АД.

4. Учет влияния пространственного распределения скалярного магнитного потенциала на удельные проводимости элементов зубцового контура, магнитный поток, индукции и напряженности в активной зоне магнитопровода АД с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора и пусковым слоем в каждом стержне осуществляется с использованием метода конечных элементов (МКЭ), являющегося одним из наиболее эффективных и универсальных численных методов расчета электромагнитных полей [8]. Основной идеей МКЭ является минимизация функционала (скалярного магнитного потенциала) путем разбиения области зубцового контура на элементы конечной величины, в которых функция представляется полиномиальной аппроксимацией.

На рис.4 приведен фрагмент модели из конечных элементов исследуемого АД для привода

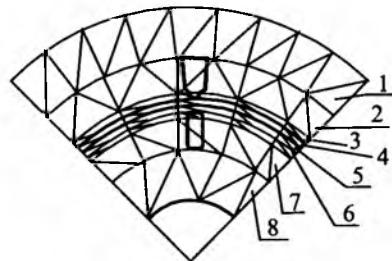


Рис.4. Фрагмент конечно-элементной модели АД для привода электромеханического ключа:

1 – слой спинки статора; 2 – слой зубцов и пазов статора; 3 – слой мостика пазов статора; 4 – слой воздушного зазора; 5 – слой мостика пазов ротора; 6 – слой пускового сечения пазов ротора; 7 – слой рабочего сечения пазов ротора; 8 – слой спинки ротора

электромеханического ключа, в которой применено разбиение на треугольные элементы первого порядка. Для выполнения электромагнитного и электродинамического расчетов АД важно получить картину распределения удельной магнитной проводимости и индукции в зубцовом контуре, т. е. в зубцах и пазах статора и ротора, воздушном зазоре, мостике ротора и шлифе статора. Поэтому в этих элементах производится более мелкое разбиение. Из-за геометрической и магнитной симметрии в поперечном сечении АД воспроизведен фрагмент области зубцового контура на одном полюсном делении. Полномасштабная модель по рис.4 состоит из 424 элементов и 220 узлов.

Электромагнитное поле в каждом узле определяется векторами магнитной индукции B и напряженности H и связана с векторным магнитным потенциалом A системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{div} B = 0; \quad B = \mu H; \\ B = \operatorname{rot} A; \quad \operatorname{rot}(v \operatorname{rot} A) = j, \end{array} \right\} \quad (6)$$

где v – удельное магнитное сопротивление материала магнитопровода; j – плотность тока в рассматриваемой области (обмотка, паз, вихревые токи, гистерезисные и т.д.).

Так как $v = 1/\mu$, то система уравнений (6) нелинейна. Опустив промежуточные выкладки по решению (6), получим окончательно для векторного магнитного потенциала внутри треугольного элемента при линейной интерполяции его значений в вершинах треугольника:

$$A = a_i A_i,$$

где a_i – координатные функции; A_i – векторный магнитный потенциал в узловых точках.

Зная векторный магнитный потенциал, нетрудно перейти к скалярному потенциальному ϕ , а от него – к проводимостям зубцового контура.

МКЭ реализован для расчета магнитного поля в активных областях зубцового контура АД с пусковым слоем с учетом насыщения основных путей магнитного потока и его рассеяний – пазового и дифференциального.

С учетом обобщенного параметра $\Pi = f(\gamma, K_2, K_r, K_x, r_c, \lambda)$, являющегося сложной функцией материала пускового слоя, его омического сопротивления, проводимостей элементов зубцового контура откорректированы базовые формулы электромагнитного расчета КПД, коэффициента мощности, потребляемого тока и мощности, скольжения, а также с учетом особенностей схемы замещения:

$$\cos \varphi = \frac{1 + \operatorname{tg} |\gamma|}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_0^1}{I_w} + \frac{I_w}{I_{ki}} \right)^2}}; \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{I_w}{\cos \varphi}; \quad (8)$$

$$P_l = P_2 + \sum P; \quad (9)$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 \cdot 10^3 + \sum P}; \quad (10)$$

$$s = \frac{P_{32} \cdot 100}{P_{32} + P_{\text{доб}} + P_{\text{мех}} + P_2 \cdot 10^3}. \quad (11)$$

На рис.5 представлены сравнительные рабочие характеристики в относительных единицах для опытного образца АД типа АИМ-М 100S4, рассчитанные по классическим методикам УкрНИИВЭ и с учетом обобщенного параметра Π . Как показывает сравнение, пусковой слой в верхней части стержней литой медной коротко-замкнутой обмотки ротора улучшает рабочие характеристики глубокопазного АД в среднем на 5%.

5. Учет влияния температуры обмоток на максимальный врачающий момент. В известных методиках [16] максимальный врачающий момент считается не зависимым от температуры обмоток:

$$M_{\max} = \frac{14,36 U_{\Phi}^2}{n_c (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_{k,p}^2})},$$

где n_c – синхронная частота вращения; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; $x_{k,p}$ –

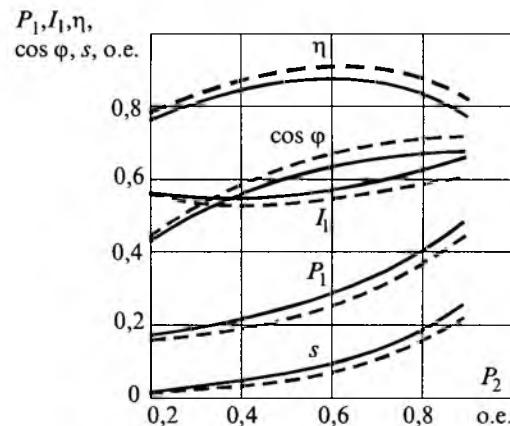


Рис.5. Сравнительные рабочие характеристики двигателя АИМ-М 100 S4:

— — — — — рассчитанные по классическим методикам;
— — — — — с учетом обобщенного параметра

фазное индуктивное сопротивление короткого замыкания в рабочем режиме.

С переходом на литую медную обмотку ротора с пусковым слоем M_{\max} в значительной мере определяется температурой обмотки статора [9–11]:

$$M_{\max} = \frac{14,36 U_{\phi}^2}{n_c \left[\frac{260 + \Theta_1}{360} + \sqrt{\frac{r^2}{360} \frac{260 + \Theta_1}{360} + x_{k,p}^2} \right]},$$

где Θ_1 – превышение температуры обмотки статора.

6. Учет влияния схемы замещения. В связи с отличительными особенностями схемы замещения, обусловленными влиянием пускового слоя стержня на ее параметры, помимо изменений в электромагнитном расчете по базовым формулам (7)–(11), вносятся изменения и в электродинамический расчет АД с пусковым слоем, в частности в расчет и построение кривых врачающего момента и тока в пределах изменения скольжения от 0 до 1. Это осуществляется по преобразованной круговой диаграмме (рис.6) с учетом влияния пускового слоя в стержнях обмотки ротора, построение которой осуществляется в обычном порядке.

7. Учет влияния вариаций стохастического момента сопротивления на валу АД в режиме работы S4. Вследствие случайных факторов, влияющих на формирование нагрузочного момента АД (многократные стохастические включения подряд при заклинивании колонны труб в скважине, подчас с реверсами и стоповыми режимами), приходится рассматривать график нагрузки (рис.7) как случайную функцию в пределах ПВ для режима S4.

Эквивалентный (суммарный) пусковой ток, возникающий при таких многократных пусках АД:

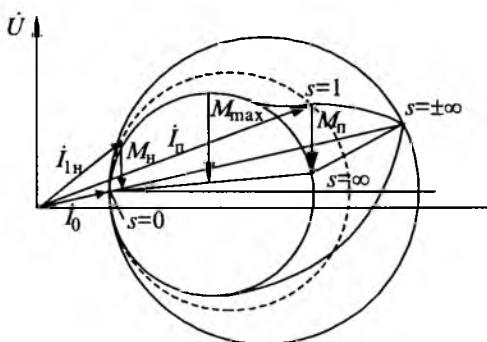


Рис.6. Круговая диаграмма АД с пусковым слоем в стержнях

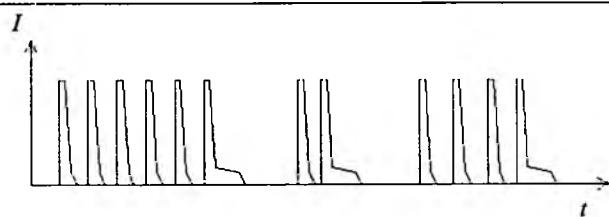


Рис.7. Диаграмма тока, характеризующая режим работы АД в приводе электромеханического ключа

$$I(t) = \sum_{t_k} F(t - t_k), \quad (12)$$

где $F(t - t_k)$ – пусковой ток в момент времени t_k ; t_k – время отдельных пусков АД.

Уравнение (12), решаемое методами математической статистики [12] с привлечением вероятностных характеристик случайного процесса и распределения Пуассона, а также чисел Фибоначчи, для среднего пускового тока при стохастическом нагружении в режиме S4 выглядит следующим образом:

$$I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} dt' F(t - t') \mu(t'),$$

где $\mu(t) = \sum \delta(t - t_k)$ – сумма дельта-функций Дирака [9].

8. Учет влияния обобщенного параметра $\Pi = f(k_r, k_x, \lambda)$ АД с пусковым слоем на расчет токов переходного процесса в режиме S4 осуществляется с помощью постоянных времени апериодических составляющих, а также уточненных значений токов короткого замыкания (КЗ)

$$i_1 = -\frac{i_{\mu 0}}{2} e^{-\frac{t}{T_M}} - i_{k,cr} e^{-\frac{t}{T_s}} + I_{k1} \sqrt{2} \sin(\omega t + \Psi_k - \varphi_{k1}),$$

$$i_1 = -\frac{i_{\mu 0}}{2} e^{-\frac{t}{T_M}} + i_{k,cr} e^{-\frac{t}{T_s}} + I_{k2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \Psi_k - \varphi_{k2}),$$

$$T_M = \frac{L + M}{r};$$

$$T_s = \frac{L - M}{r},$$

где $i_{\mu 0}$ – мгновенное значение намагничивающего тока; T_M – постоянная времени затухания главного поля взаимоиндукции АД; L – индуктивность АД; M – взаимоиндуктивность между обмотками; r – активное сопротивление обмотки, в том числе с учетом пускового слоя; T_s – постоянная времени быстрозатухающих полей рассеяния; $i_{k,cr}$ – среднее значение токов КЗ в обмотках, соответствующее их установившим-

ся значениям в момент начала переходного процесса; I_k – действующее значение установившегося тока КЗ; Ψ_k – начальная фаза напряжения в момент коммутации; Φ_k – угол сдвига по фазе между током и напряжением.

Выводы

1. С учетом отмеченных в статье существенных отличий и особенностей, присущих АД с медной литой клеткой ротора и пусковым слоем в стержнях, разработаны методики электромагнитного и электродинамического расчетов глубокопазного АД с пусковым слоем.

2. Методики подтверждены экспериментальными исследованиями АД для привода электромеханического ключа; они отличаются более высокой степенью сходимости результатов расчета и эксперимента по сравнению с общеизвестными (в среднем на 5%).

3. Методики использованы при разработке технической документации опытных образцов нового поколения взрывозащищенных АД с литой медной обмоткой ротора и пусковым слоем в каждом стержне обмотки ротора.

Список литературы

1. Броди В.Я. Электродвигатели привода электромеханических ключей в нефтегазодобывающей промышленности//Уголь Украины. 1998. № 7. С.55–56.

2. Чувашев В.А., Чуванков В.Ю., Железняков А.В. и др. Технология производства литых медных короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей // Тезисы докладов 1-й международной конференции по электромеханике и электроэнергетике МКЭЭ-94. Ч. 2. Сузdalь, 1994. С.174.

3. Чувашев В.А., Юргенсон Т.С., Чуванков В.Ю. и др. Асинхронные взрывозащищенные электродвигатели с повышенной перегрузочной способностью// Электротехника. № 3. 1995. С. 9–12.

4. Чувашев В.А., Броди В.Я., Чуванков В.Ю. и др. Асинхронные двигатели с медной литой клеткой ротора // Уголь Украины. 1998. № 7. С. 20–22.

5. Чувашев В.А., Броди В.Я., Чуванков В.Ю. и др. Технология изготовления литых медных обмоток роторов двигателей ЭКВ //Уголь Украины. 1998. № 7. С. 23–25.

6. Пат. № 21968, Украина, 6В 22 D 19/01. Спосіб виготовлення литих короткозамкнутих роторів електродвигунів/ В.А.Чувашев, В.Г.Кострица, В.Г.Диренко и др. // Открытия. Изобретения. 1998. № 2.

7. Пат. № 27993, Украина, 6Н02К 17/16. Ротор електричної машини / Ш.Ф.Тахаутдинов, В.А.Чувашев, П.И.Зархарченко и др.// Открытия. Изобретения. 2000. № 5.

8. Шумилов Ю.А. Анализ магнитного поля в воздушном зазоре асинхронной машины методом конечных элементов. Киев: Техника, 1976.

9. Чувашев В.А., Макаров К.Д., Броди В.Я. и др. Характеристики асинхронных двигателей электроприводов шахтных механизмов// Уголь Украины. № 7. 1998. С. 27–31,

10. Чувашев В.А., Олейников А.М., Анисимов А.Р., Жук Н.П. Конструктивные технологические возможности

совершенствования асинхронных двигателей для обслуживания систем атомных станций//Сб. научн. трудов Севастопольского института ядерной энергетики и промышленности. 1999. № 1. С. 75–76.

11. Чувашев В.А., Дудник М.З., Чувашев И.В. К вопросу повышения технических характеристик двигателей шахтных механизмов// Сб. научн. трудов ДоНГТУ. Сер. Электротехника и энергетика. Вып. № 4. 1999. С.131–137.

12. Гардинер К.В. Стохастические методы в естественных науках. М.: Мир, 1986.



Чувашев Виктор Анатольевич – заместитель директора по науке УкрНИИВЭ, канд. техн. наук. В 1969 г. окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института. В 1984 г. защитил диссертацию по тематике, связанной с разработкой и исследованием взрывозащищенных электродвигателей с повышенной перегрузочной способностью и улучшенными виброакустическими характеристиками.

Броди Владимир Янович – заведующий лабораторией отдела экспериментальных исследований и внедрения взрывозащищенных электрических машин УкрНИИВЭ. В 1982 г. окончил Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте". В июне 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Совершенствование асинхронных двигателей привода электромеханических ключей нефтяных скважин" в Донецком национальном ТУ.



Папазов Юрий Николаевич – ведущий научный сотрудник отдела надежности, стандартизации и метрологии взрывозащищенного и рудничного оборудования УкрНИИВЭ. В 1987 г. окончил электромеханический факультет Донецкого политехнического института.

Дудник Михаил Захарович – заведующий кафедрой электромеханики и ТОЭ Донецкого национального ТУ, доктор техн. наук, проф. В 1961 г. окончил горноэлектромеханический факультет Донецкого политехнического института. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию по теме: "Исследование и разработка линейных асинхронных электродвигателей для транспортно-технологических установок".



Совершенствование асинхронных двигателей малой мощности

ЧУВАШЕВ В.А., БРОДИ В.Я., ПАПАЗОВ Ю.Н., ГРИНЬ Г.М., МУХАМЕТШИН Н.А.

Дан сравнительный анализ результатов математического моделирования, стендовых и эксплуатационных испытаний двигателей с алюминиевой и литой медной обмоткой с анизотропным стержнем ротора. Показаны преимущества предложенного пути совершенствования двигателей малой мощности.

Во многих отраслях промышленности эксплуатируются машины и технологическое оборудование, имеющие специфические условия применения и режимы работы приводных асинхронных двигателей (АД) малой мощности: затяжной пуск, неравномерный характер формирования нагрузки, нередкие случаи полного или частичного стопорения, особенно при пуске.

Известно, что более 60% реализации всех АД в мире составили двигатели мощностью до 18 кВт при высоте оси вращения до 160 мм. На европейском рынке отмечается растущий спрос на АД малой мощности с повышенной надежностью и улучшенными энергетическими характеристиками и эксплуатационными показателями. Заводы-изготовители, концентрирующие усилия на повышении КПД, поддерживаются правительственными программами ряда стран Западной Европы, США и Канады [1, 2].

В России освоены две новые серии АД (РА и 5А) с улучшенными энергетическими и пусковыми характеристиками и сниженным расходом активных материалов и уровнем шума [4]. На Украине также, несмотря на отсутствие бюджетного финансирования, проводятся работы по созданию новых высокоэффективных серий АД малой мощности, соответствующих мировому уровню.

Оценка перспектив развития АД показывает, что кардинальные изменения конструкции АД малой мощности в настоящее время не прогнозируются [3]. Повышение пусковых, энергетических и надежностных показателей традиционными методами также не представляется возможным, так как практически достигнуты пределы электромагнитных нагрузок активных материалов и удельный расход активных материалов стабилизировался. Вследствие несовершенства технологии изготовления АД классической конструкции требуются радикальные технические решения и значительные капитальные вложения на создание АД малой мощности и повышенной надежности.

Определенный резерв для улучшения технических характеристик таких АД представляет ротор, за счет изменения конструкции которого и применения новых материалов можно повысить энергомеханические и надежностные параметры АД.

Поэтому для разработки АД с улучшенными энергетическими и механическими характеристиками, надежных в эксплуатации и технологичных в изготовлении, взята за основу литая медная короткозамкнутая обмотка ротора (рис.1), в которой в целях повышения пускового момента и снижения пускового тока в верхней части стержня размещен пусковой слой [4]. Главная отличительная особенность конструкции: каждый такой анизотропный стержень обмотки представляет собой единое целое. Регулируя электропроводность пускового слоя из меди, в

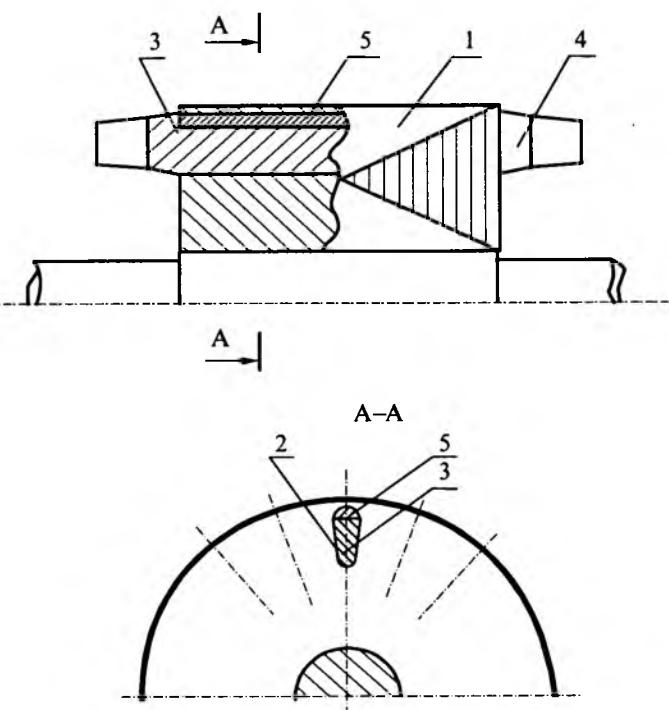


Рис.1. Ротор электрической машины:

1 – сердечник; 2 – паз; 3 – стержень; 4 – короткозамыкающее кольцо; 5 – пусковой слой

которую вводятся легирующие добавки, например цинк, можно создавать АД с заданными механическими характеристиками.

Способ изготовления данной обмотки ротора в настоящее время патентуется.

Рассматриваемая конструкция обмотки ротора позволяет улучшить энергетические и механические характеристики АД: КПД, коэффициент мощности $\cos \phi$, перегрузочную способность, а также надежность. Однако для этого требуется разработать методику расчета нового АД и прежде всего создать математическую модель для поиска оптимальных размеров пускового слоя и электропроводности его материала.

Математическое моделирование в настоящее время является основным методом исследования характеристик АД в тех или иных режимах работы. Оно позволяет провести численный эксперимент, направленный на подтверждение научной гипотезы. Исследование АД начинается с выбора подходящей модели, отвечающей поставленной задаче.

Несмотря на достижения в создании математических моделей электрических машин (ЭМ) на базе уравнений поля, более успешно они моделируются с помощью уравнений, составленных на основе теории электрических цепей. Уравнения электромеханического преобразования получаются совместным решением уравнения движения ротора и уравнений напряжения обмоток. В уравнениях электромеханического преобразования существуют оптимальные отношения между параметрами, при которых ЭМ имеет максимальные КПД и $\cos \phi$, минимальную массу, а также желаемый вид выходных характеристик.

За основу математической модели АД малой мощности выбрана модель идеализированной двухфазной ЭМ с m обмотками статора и n обмотками ротора [5]. Применение двухфазной симметричной ЭМ по сравнению с трехфазной позволяет в 1,5 раза уменьшить число уравнений напряжений и токов, значительно упростить уравнение момента и матрицу сопротивлений. Пространственная модель АД малой мощности приведена на рис.2. Выбор такой модели позволяет с достаточной для практики точностью моделировать процессы, протекающие в АД.

Так как АД является насыщенной ЭД, то индукция в воздушном зазоре и, следовательно, электродвижущая сила ЭДС имеют несинусоидальную форму, что обусловлено конструктивными и технологическими особенностями ЭМ. Для двухфазных симметричных обмоток гармоники порядка $v = 4c + 1$ врачаются в ту же сто-

рону, что и основная гармоника, а гармоники $v = 4c - 1$ – в противоположную. Модель (рис.2) учитывает 1, 3, 5 гармоники, напряжения которых подаются на обмотки w_{s1}, w_{s2}, w_{s3} статора по осям α и β и наводятся ЭДС на роторных обмотках w_{r1}, w_{r2}, w_{r3} . Влияние вихревых токов учитывается в обмотке ротора w_{r4} .

Из известных подходов к анализу уравнений электромеханического преобразования с нелинейными коэффициентами (параметрами ЭМ) перед зависимыми переменными выбран подход, заключающийся в использовании нелинейных коэффициентов, учитывающих динамическое изменение активного сопротивления ротора, индуктивности обмотки, взаимной индуктивности между обмотками, а также коэффициента инерции привода. Уравнения напряжения, учитывающие процессы преобразования энергии в АД, выражаются в виде сложной матрицы, сходной с матрицей Крона для двухобмоточной ЭМ [6].

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{s\alpha} \\ \mathbf{u}_{r\alpha} \\ \mathbf{u}_{r\beta} \\ \mathbf{u}_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{s\alpha} & \mathbf{A}_{sr\alpha} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{rs\alpha} & \mathbf{A}_{r\alpha} & \mathbf{D}_\beta & \mathbf{B}_{\beta\alpha} \\ \mathbf{B}_{\alpha\beta} & \mathbf{D}_\alpha & \mathbf{A}_{r\beta} & \mathbf{A}_{rs\beta} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{sr\beta} & \mathbf{A}_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{s\alpha} \\ \mathbf{i}_{r\alpha} \\ \mathbf{i}_{r\beta} \\ \mathbf{i}_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{u}_{s\alpha}, \mathbf{u}_{s\beta}, \mathbf{u}_{r\alpha}, \mathbf{u}_{r\beta}$ – матрицы напряжений, подаваемых на обмотки статора и ротора по осям α и β ; $\mathbf{i}_{s\alpha}, \mathbf{i}_{s\beta}, \mathbf{i}_{r\alpha}, \mathbf{i}_{r\beta}$ – матрицы токов, протекающих в обмотках статора и ротора по осям α и β ; $\mathbf{A}_{s\alpha}, \mathbf{A}_{s\beta}, \mathbf{A}_{r\alpha}, \mathbf{A}_{r\beta}$ – матрицы полных сопротивлений обмоток статора и ротора по осям α и β ; $\mathbf{A}_{sr\alpha}, \mathbf{A}_{sr\beta}, \mathbf{A}_{rs\alpha}, \mathbf{A}_{rs\beta}$ – матрицы взаимных индук-

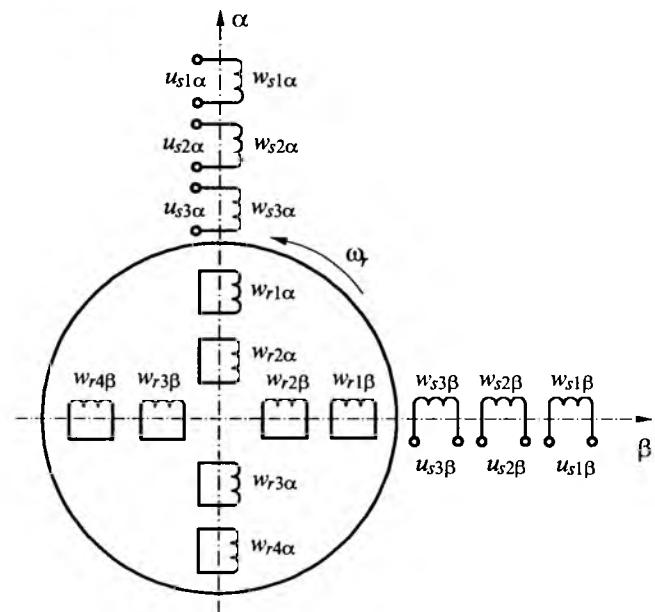


Рис.2. Пространственная модель АД

тивностей между обмотками статора и ротора по осям α и β ; $D_\alpha, D_\beta, B_{\alpha\beta}, B_{\beta\alpha} - D_\alpha, D_\beta, B_{\alpha\beta}, B_{\beta\alpha}$ – матрицы сопротивлений, учитывающих ЭДС вращения, относятся к вращающимся обмоткам.

Уравнение электромагнитного момента

$$M_{\text{эл.м}} = \frac{m}{2} \sum M_{sia(\beta)rja(\beta)} (i_{sib(\alpha)} i_{rja(\beta)} - i_{sia(\beta)} i_{rjb(\alpha)}), \quad (2)$$

где $M_{s1r1}, \dots, M_{s1r4}, \dots, M_{s3r4}$ – взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора; $i_{s1\alpha}, \dots, i_{s3\beta}, i_{r1\alpha}, \dots, i_{r4\beta}$ – токи в обмотках соответственно статора и ротора; m – число фаз АД; $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3, 4$.

Уравнение движения ротора АД

$$M_c + M_{\text{эл.м}} = J \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (3)$$

где M_c – момент сопротивления; $M_{\text{эл.м}}$ – электромагнитный момент АД; J – момент инерции привода; ω_r – угловая скорость ротора.

Система уравнений (1)–(3) не имеет аналитического решения. Приближенные решения системы дифференциальных уравнений АД малой мощности для анализа поведения системы во времени могут быть получены с высокой точностью методом Коши, а также методом Рунге–Кутта [7] на персональном компьютере (ПК). Параметры АД определяются расчетным путем по формулам проектирования АД и используются для сопоставления с результатами экспериментальных исследований.

Впервые в известной математической модели АД (рис.2) предложено учитывать влияние размера пускового слоя на характеристики ЭМ путем введения в уравнения нового параметра ротора – активного сопротивления пускового слоя:

$$R_r = \frac{K_r r'_{p,p} r'_{p,p}}{K_r r'_{p,p} + r'_{p,p}} + r'_{k,k}, \quad (4)$$

где $r'_{p,p}$ – активное сопротивление рабочего слоя стержня ротора, приведенное к статору; $r'_{p,p}$ – активное сопротивление пускового слоя стержня ротора, приведенное к статору; K_r – коэффициент увеличения активного сопротивления при пуске, зависящий от удельной проводимости материала обмотки γ и скольжения s ; $r'_{k,k}$ – активное сопротивление короткозамыкающего кольца ротора, приведенное к статору.

Конечным результатом решения системы уравнений электромеханического преобразования является анализ токов статора и ротора АД, механических характеристик в диапазоне скольжений АД от 1 до 0, а также времени его пуска.

Для корректности моделирования использовалась АД с одними и теми же обмоточными данными статора, одинаковыми размерами пазов статора и ротора в штампе, но различным материалом обмотки ротора. Исследовался двигатель АИМ 100 S4, который применяется в приводе электромеханического ключа, предназначенный для ремонта нефтяных скважин. Анализ осуществлялся последовательным расчетом характеристик АД для вариантов с литой алюминиевой обмоткой ротора и с литой медной обмоткой ротора, имеющей проводимость пускового слоя, равную соответственно 27 и 34 МСм/м. Площадь пускового слоя в процессе численного эксперимента изменялась от 0 до 33% общей площади паза ротора.

При расчетах с использованием модели (рис.2) принимались следующие допущения: воздушный зазор равномерный; обмотки статора по своим параметрам идентичны; обмотки ротора по своим параметрам одинаковы между собой за исключением обмотки, учитывающей влияние вихревых токов; температура обмоток статора и ротора равна рабочей.

Исходными данными для моделирования режимов работы АД являются активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, взаимные индуктивности между обмотками статора, взаимные индуктивности между обмотками ротора, взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора и момент инерции ротора. Исследовались АД типа АИМ 100 S4 с серийным ротором (алюминиевая обмотка) и типа АИМ-М100 S4 с опытными вариантами роторов (медная обмотка и медная обмотка с пусковым слоем). Сравнительные осциллограммы пуска АД, полученные при моделировании на ПК уравнений (1)–(3), приведены на рис.3–5. На рис.6 показаны результаты сравнения динамических характеристик АД в зависимости от соотношения площадей пускового слоя и паза ротора, а также удельной проводимости материала пускового слоя.

Как следует из результатов моделирования, на характер протекания переходных процессов при пуске основное влияние оказывает активное сопротивление ротора. Толщина пускового слоя оказывает влияние на пусковой ток и пусковой момент, но мало влияет на максимальный момент. Время пуска АД с алюминиевой и медной обмоткой ротора практически одинаково.

В результате расчетов определены рациональные значения параметров АД. Сравнительный анализ показывает, что при замене материала

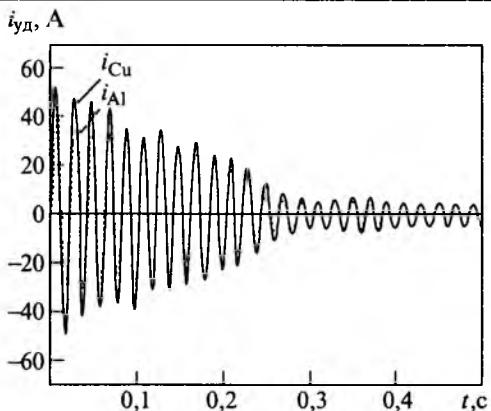


Рис.3. Изменение тока в статоре при пуске АД типа АИМ-М 100 С4 с обмотками ротора из алюминия (Al) и меди (Cu) при $M_c = 0$ и синусоидальном напряжении сети

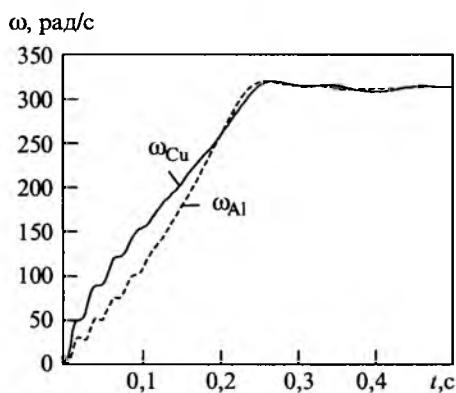


Рис.4. Изменение угловой скорости ротора при пуске АД типа АИМ-М 100 С4 с обмотками ротора из алюминия (Al) и меди (Cu) при $M_c = 0$ и синусоидальном напряжении сети

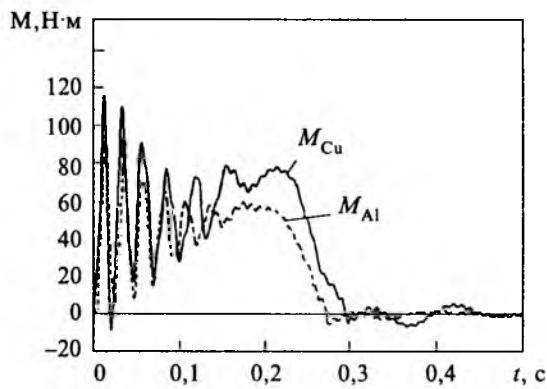


Рис.5. Изменение электромагнитного момента при пуске АД типа АИМ-М 100 С4 с обмотками ротора из алюминия (Al) и меди (Cu) при $M_c = 0$ и синусоидальном напряжении сети

обмотки ротора с алюминия на медь улучшаются энергетические характеристики АД, а применение пускового слоя в верхней части стержня ротора гарантирует пусковые моменты с медной обмоткой ротора не ниже пусковых моментов АД с алюминиевой обмоткой и позволяет сни-

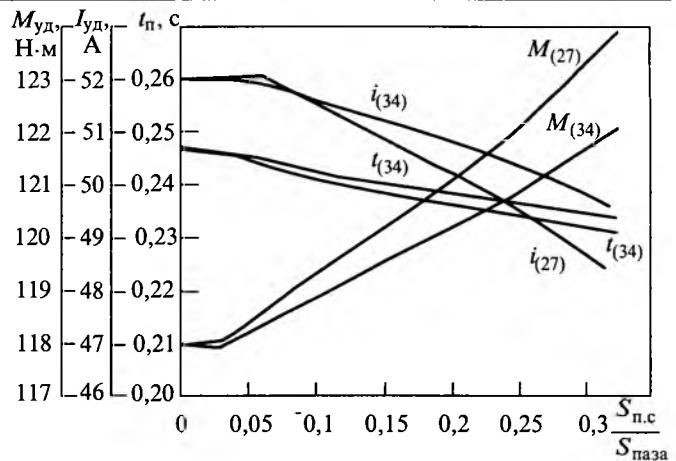


Рис.6. Зависимость ударного момента $M_{уд}$, ударного тока $i_{уд}$ и времени пуска t_n от соотношения площадей пускового слоя и паза ротора и удельной проводимости материала пускового слоя (27 и 34 МСм/м)

зить ударные токи при пуске, что является важным фактором при работе АД в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками.

В результате проведенных исследований выполнена коррекция существующих методик проектирования АД взрывозащищенного исполнения, позволяющая учитывать пусковой слой в стержнях литой медной короткозамкнутой обмотки ротора в части выбора геометрии пазов и определения электромагнитных параметров АД с учетом особенностей его конструкции и режимов работы, а затем разработана необходимая конструкторская документация.

Поскольку роторная обмотка определяет надежность АД, то к качеству литья металла обмотки предъявляются особые требования. За основу разработки технологии заливки медью ротора с пусковым слоем обмотки принят внедренный на ОАО "ПЭМЗ им. К. Маркса" прогрессивный метод плавки в электропечи ИСТ-0,16 и заливки роторов комбайновых двигателей [8]. Основной технологической операцией, определяющей степень чистоты меди, является ее раскисление. Введение экспресс-анализа и порционное введение раскислителя позволили обеспечить стабильную электропроводность отливки меди в пределах 55–59 МСм/м [9]. Отлиты 40 роторов и выявлены исходные данные для разработки промышленной технологии, технологического оборудования и оснастки. Изготовлены опытные образцы АД.

Экспериментальным исследованиям на испытательной базе УкрНИИВЭ подвергнуты опытные образцы АИМ-М 100S4 и АИМ-М 100L4

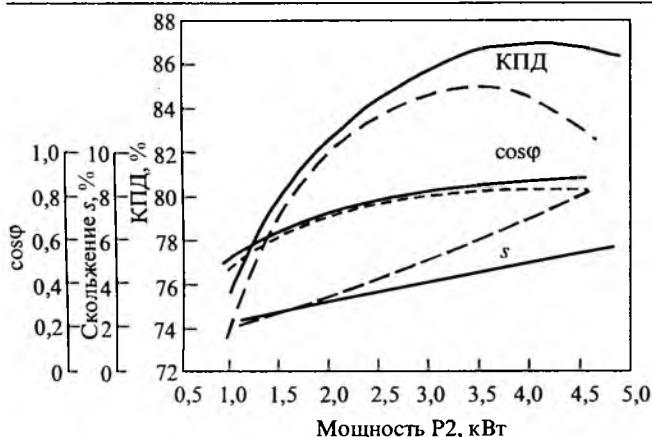


Рис.7. Зависимости КПД, $\cos \varphi$ и скольжения АИМ-М 100 L4 (зав. № 16117) от полезной мощности:
— — — серийный, алюминиевая литая короткозамкнутая обмотка ротора; — — — медная литая короткозамкнутая обмотка ротора с пусковым слоем

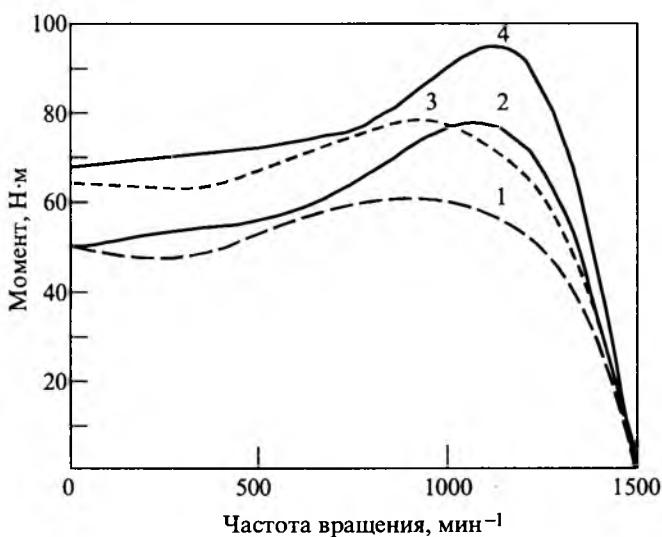


Рис.8. Механические характеристики АИМ-М 100 S4 (зав. № 16153) (1 – ротор серийный, алюминиевая литая короткозамкнутая обмотка; 2 – ротор с медной литой короткозамкнутой обмоткой с пусковым слоем) и АИМ-М 100 L4 (зав. № 16117) (3 – ротор серийный, алюминиевая литая короткозамкнутая обмотка; 4 – ротор с медной литой короткозамкнутой обмоткой с пусковым слоем)

мощностью 3,0 и 4,0 кВт. Программа и методы испытаний выполнялись в соответствии с действующими стандартами и нормативами. Основные результаты представлены на рис.7 и 8.

Сравнительные результаты стендовых испытаний исходного АД для привода электромеханического ключа и опытного образца АД с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора и пусковым слоем [12] представлены в таблице.

| Параметр | Двигатель | | | |
|---|-------------|-------------|------|------|
| | АИМ-М 100S4 | АИМ-М 100L4 | Al | Cu |
| Материал обмотки ротора | Al | Cu | Al | Cu |
| Мощность, кВт, в режиме: | | | | |
| S1 | 3,0 | 3,6 | 4,0 | 5,0 |
| S4 (ПВ-40%, FJ=1,2) | 3,3 | 5,5 | 4,5 | 7,5 |
| Напряжение, В | 380 | | | |
| Ток, А: | | | | |
| номинальный | 7,0 | 7,6 | 8,5 | 9,5 |
| пусковой | 41,3 | 47 | 56 | 60 |
| холостого хода | 3,26 | 2,92 | 3,71 | 3,41 |
| КПД, % | 82,0 | 84,0 | 84,1 | 86,5 |
| Скольжение, % | 5,6 | 5,0 | 7,1 | 5,9 |
| Вращающий момент, | | | | |
| Н·м: | | | | |
| пусковой | 50 | 50 | 65 | 68 |
| максимальный | 61 | 78 | 76 | 97 |
| Превышение температуры обмотки статора, °C, в режиме: | | | | |
| S1 | 82,5 | 68 | 76 | 69 |
| S4 (ПВ-40%, FJ=1,2) | 56 | 44 | 60 | 53 |

Эксплуатационные испытания 15 опытных образцов в НГДУ ОАО "Татнефть" показали, что надежность АД привода электромеханического ключа для ремонта нефтяных скважин увеличилась. Опытные двигатели эксплуатируются с июня 2000 г. По состоянию на январь 2002 г. (18 месяцев эксплуатации) отказов двигателей не произошло. По информации ОАО "Татнефть" средний срок службы серийного АД не превышал 2,5 мес.

Результаты испытаний показали преимущества двигателей малой мощности с литой медной обмоткой ротора, имеющей пусковой слой в каждом стержне, по сравнению с серийным.

Выводы

- Выбрано направление совершенствования АД малой мощности и улучшения их технических характеристик, заключающееся в замене алюминиевой короткозамкнутой обмотки ротора на литую медную с пусковым слоем в верхней части анизотропного стержня. Пусковой слой выполняется из специального сплава на основе меди с электропроводностью порядка 27–34 МСм/м.

- Уточнена методика электромагнитного расчета характеристик АД с учетом наличия пускового слоя стержня, особенностей конструкции и режимов работы. Разработан алгоритм и программный комплекс расчета основных характеристик АД на ЭВМ.

- В результате вариационных расчетов определена наиболее рациональная геометрия магнитной системы активных частей АД. Оптими-

зационные электромагнитные и электромеханические расчеты показали, что высота пускового слоя стержня должна соответствовать глубине проникновения тока в стержень при пуске.

4. В результате проведенных поисковых, теоретических и экспериментальных исследований установлена техническая возможность получения медных литьих короткозамкнутых обмоток роторов с пусковым слоем в каждом стержне. Разработан и внедрен технологический процесс литья медных обмоток роторов АД малой мощности в условиях ОАО "ПЭМЗ им. К. Маркса".

5. Проведенный сравнительный анализ стендовых и эксплуатационных испытаний базового АД с литой алюминиевой обмоткой ротора и опытных образцов АД с литой медной обмоткой и пусковым слоем в каждом стержне доказал преимущества предложенного пути совершенствования АД малой мощности.

Список литературы

1. ABB Motors' efficiency drive. Sacks Tony // Elec. Rev.(Gr. Brit.). 1996. Р. 14–15.
2. Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г., Чувашев В.А. Научно-технический и нормативно-законодательный аспекты повышения эффективности электромеханического преобразования энергии в электрических системах// Безопасность труда в горной промышленности: Первая Международная конференция по экологической безопасности. Макеевка-Донбасс. 2001. С.164–170.
3. Кравчик А.Э., Новиков В.К., Суворов Н.И., Мавляибеков Ю.У. Состояние и перспективы разработки и производства низковольтных асинхронных электродвигателей // Электротехника. 1996. № 2. С. 3–6.
4. Пат. № 27993 Україна, Н02К. Ротор електричної машини/Ш.Ф.Тахаутдинов, В.А.Чувашев, П.И.Захарченко и др./ Бюл. 2000. № 5.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1994.
6. Чувашев В.А, Медведев Ю.Л, Железняков А.В. и др. Обзор математических моделей асинхронных двигателей и методов их реализации. // Вестник ХГПУ. Новые решения в современных технологиях. Вып. № 84. 2000. С.215–222.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. М.: Наука, 1987.
8. Чувашев В.А., Броди В.Я., Чуванков В.Ю. и др. Асинхронные двигатели с литой медной клеткой ротора // Уголь Украины. 1998. № 7. С.20–22.

9. Чувашев В.А., Броди В.Я., Чуванков В.Ю. и др. Технология изготовления литьих медных обмоток роторов двигателей ЭКВ // Уголь Украины. 1998. № 7. С. 23–25

10. Броди В.Я., Чувашев В.А., Демченко В.Н. Результаты исследований по созданию двигателей привода электромеханических ключей, применяемых в нефтяной промышленности // Вестник ХГПУ. Новые решения в современных технологиях. 2000. Вып. № 84. С.31–32.

Чувашев Виктор Анатольевич – заместитель директора по науке УкрНИИВЭ, канд. техн. наук. В 1969 г. окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института. В 1984 г. защитил диссертацию по тематике, связанной с разработкой и исследованием взрывозащищенных электродвигателей с повышенной перегрузочной способностью и улучшенными вибраакустическими характеристиками.

Броди Владимир Янович – заведующий лабораторией отдела экспериментальных исследований и внедрения взрывозащищенных электрических машин УкрНИИВЭ. В 1982 г. окончил Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте". В июне 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Совершенствование асинхронных двигателей привода электромеханических ключей нефтяных скважин" в Донецком национальном ТУ.

Папазов Юрий Николаевич – ведущий научный сотрудник отдела надежности, стандартизации и метрологии взрывозащищенного и рудничного оборудования УкрНИИВЭ. В 1987 г. окончил электромеханический факультет Донецкого политехнического института.

Гринь Геннадий Михайлович – главный технолог ОАО " Первомайский электромеханический завод им. К.Маркса". В 1982 г. окончил электромашиностроительный факультет Коммунарского горно-металлургического института.



Мухаметшин Нафис Анасович – начальник отдела Финансового управления ОАО "Татнефть". В 1989 г. окончил экономический факультет Казанского финансово-экономического института.

Математическая модель взрывозащищенного асинхронного погружного электродвигателя для привода центробежных бесштанговых насосов

ЧУВАШЕВ В.А., ЖЕЛЕЗНИКОВ А.В., ПАПАЗОВ Ю.Н., ДУДНИК М.З., ДЕМЧЕНКО В.Н.

Описаны математическая модель и методики электромагнитного и электродинамических расчетов взрывозащищенного погружного электродвигателя с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора привода центробежных бесштанговых насосов для откачки пластовых жидкостей из скважин, учитывающие такие особенности двигателей, как большое отношение длины сердечника статора к его диаметру и значительную неравномерность магнитного потока вдоль оси двигателя.

Погружные электродвигатели (ПЭД) входят в состав привода бесштанговых насосных установок типа УЭЦН для откачки пластовых жидкостей (нефти) из скважин диаметром от 100 до 400 мм и глубиной до 2 км. Этот класс электродвигателей по конструкции и условиям эксплуатации имеет следующие существенные отличия от обычных асинхронных двигателей (АД): 1) отношение длины сердечника статора l к его наружному диаметру D составляет 5–8 вместо 1,0–2,5, что вызывает неравномерный эксцентрикситет ротора и неодинаковую магнитную индукцию по длине воздушного зазора; 2) неравномерность магнитного потока вдоль оси ПЭД приводит к появлению высших временных и пространственных гармоник потока и магнито-движущих сил; 3) ввиду ограниченного диаметра ротора индукция в его спинке достигает предельных значений порядка 2 Тл и часть магнитного потока замыкается через вал (массивное тело), что приводит к значительному росту потерь на гистерезис и вихревые токи; 4) из-за большого отношения l / D возрастают поперечные токи в роторе, что также приводит к росту потерь.

В известных математических моделях ПЭД, например в [1], все отмеченные явления не нашли отражения. Поэтому при создании взрывозащищенных ПЭД нового поколения с медной литой короткозамкнутой обмоткой ротора (вместо паяной стержневой) возникла необходимость разработки их математической модели с учетом отмеченных особенностей.

В качестве математической модели ПЭД принята модель [2] двухфазной электрической машины (ЭМ) с $m = 3$ обмотками на статоре (1 – учет влияния основной гармоники поля; 2 – учет влияния наиболее сильной пространственной гармоники поля; 3 – учет влияния наиболее сильной временной гармоники поля) и $n = 5$ обмот-

ками на роторе (1 – учет наведенной электродвижущей силы (ЭДС) от основной гармоники поля; 2 – то же от пространственной гармоники поля; 3 – то же от временной гармоники поля; 4 – учет влияния эксцентрикситета ротора на неравномерное распределение магнитного потока в воздушном зазоре вдоль оси; 5 – учет влияния потерь от вихревых и поперечных токов вследствие ответвления части магнитного потока в вал по осям α и β).

Такая модель позволяет с достаточной для практических целей точностью смоделировать процессы, происходящие в ПЭД с литой медной обмоткой ротора. Более полное описание и моделирование ограничено возможностями вычислительной техники, так как в представленной модели приходится решать дифференциальные уравнения уже 25-го порядка.

Матрица-столбец напряжений на обмотках [U] связана с матрицей – столбцом токов [I] следующей формулой:

$$[U] = [Z] \cdot [I], \quad (1)$$

где [Z] – матрица сопротивлений пространственной модели, в сокращенном формате

см. формулу (2) на след. странице

Уравнение электромагнитного момента:

$$\begin{aligned} M_3 = & \frac{m}{2} [M_{s1r1}(i_{s1\beta}i_{r1\alpha} - i_{s1\alpha}i_{r1\beta}) + M_{s1r2}(i_{s1\beta}i_{r2\alpha} - \\ & - i_{s1\alpha}i_{r2\beta}) + M_{s1r3}(i_{s1\beta}i_{r3\alpha} - i_{s1\alpha}i_{r3\beta}) + M_{s1r4}(i_{s1\beta}i_{r4\alpha} - \\ & - i_{s1\alpha}i_{r4\beta}) + M_{s1r5}(i_{s1\beta}i_{r5\alpha} - i_{s1\alpha}i_{r5\beta}) + M_{s2r1}(i_{s2\beta}i_{r1\alpha} - \\ & - i_{s2\alpha}i_{r1\beta}) + M_{s2r2}(i_{s2\beta}i_{r2\alpha} - i_{s2\alpha}i_{r2\beta}) + M_{s2r3}(i_{s2\beta}i_{r3\alpha} - \\ & - i_{s2\alpha}i_{r3\beta}) + M_{s2r4}(i_{s2\beta}i_{r4\alpha} - i_{s2\alpha}i_{r4\beta}) + M_{s2r5}(i_{s2\beta}i_{r5\alpha} - \\ & - i_{s2\alpha}i_{r5\beta}) + M_{s3r1}(i_{s3\beta}i_{r1\alpha} - i_{s3\alpha}i_{r1\beta}) + M_{s3r2}(i_{s3\beta}i_{r2\alpha} - \\ & - i_{s3\alpha}i_{r2\beta}) + M_{s3r3}(i_{s3\beta}i_{r3\alpha} - i_{s3\alpha}i_{r3\beta}) + M_{s3r4}(i_{s3\beta}i_{r4\alpha} - \\ & - i_{s3\alpha}i_{r4\beta}) + M_{s3r5}(i_{s3\beta}i_{r5\alpha} - i_{s3\alpha}i_{r5\beta})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение движения ротора

$$M_s = M_c(t) + J \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (4)$$

В уравнениях (2)–(4) обозначено: $U_{s1\alpha}, \dots, U_{s3\beta}$ – напряжение на обмотках статора по осям α и β ; $i_{s1\alpha}, \dots, i_{s3\beta}$ – ток в обмотках статора по осям α и β ; $i_{r1\alpha}, \dots, i_{r5\beta}$ – ток в обмотках ротора по осям α и β ; $r_{s1\alpha}, \dots, r_{s3\beta}$ – активное сопротивление обмоток статора по осям α и β ; $r_{r1\alpha}, \dots, r_{r5\beta}$ – активное сопротивление обмоток ротора по осям α и β ; $L_{s1\alpha}, \dots, L_{s3\beta}$ – индуктивность обмоток статора по осям α и β ; $L_{r1\alpha}, \dots, L_{r5\beta}$ – индуктивность обмоток ротора по осям α и β ; $M_{s12\alpha}, \dots, M_{s13\beta}$ – взаимные индуктивности между обмотками статора по осям α и β ; $M_{r12\alpha}, \dots, M_{r15\beta}$ – взаимные индуктивности между обмотками ротора по осям α и β ; $M_{s1r1\alpha}, \dots, M_{s1r5\beta}, \dots, M_{s3r5\beta}$ – взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора по осям α и β ; $M_c(t)$ – момент сопротивления на валу ПЭД (имеет нелинейный характер); ω_r – угловая скорость ротора; J – момент инерции вращающихся частей.

Уравнение (1) представляет собой сложную матрицу, сходную с матрицей Крона для двухобмоточной ЭМ [3,4]. Для ее решения необходимо знать параметры ПЭД – коэффициенты перед зависимыми переменными в уравнениях (2), (3) и (4), перечисленные выше.

Параметры определяются по обмоточным данным и результатам электромагнитного расчета серийного секционного электродвигателя ПЭД45-117 МВ5 мощностью 45 кВт, частотой вращения 3000 мин⁻¹ (синхр.) и числом секций 11.

1. Активное сопротивление обмотки статора в рабочем режиме ($d\omega_r/dt = 0$)

$$r_s = K_1 \frac{l_{cp1} w_1}{\gamma q_{\phi1}},$$

где K_1 – температурный коэффициент для расчета сопротивления обмотки статора, зависящий от класса нагревостойкости изоляции; l_{cp1} – средняя длина витка обмотки; w_1 – число витков в обмотке фазы; γ – удельная электрическая проводимость меди, зависящая от рабочей температуры; $q_{\phi1}$ – сечение обмотки фазы статора.

2. Активное сопротивление однородного по составу стержня ротора в рабочем режиме по методике УкрНИИВЭ

$$r_r = K_2 \frac{l_c \cdot 10^{-4}}{\gamma_c q_c} + r_{k,3},$$

| | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|--|-------------------------|-------------------------|--|--|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $r_{s1\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s1\alpha}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s2}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r5}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | $r_{s3\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s3\alpha}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3s2}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3s5}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $\frac{d}{dt} M_{r1s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{r1s1}$ | $r_{r1\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r1\alpha}$ | $\frac{d}{dt} M_{r1r2}$ | $\frac{d}{dt} M_{r1s5}$ | $L_{r1\beta}\omega_r$ | $M_{r1r2}\omega_r$ | $M_{r1s5}\omega_r$ | $M_{r1s3}\omega_r$ | 0 | 0 | 0 |
| $M_{s1r4}\omega_r$ | $M_{s1r3}\omega_r$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r2}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r5}$ | $r_{s5\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r5\alpha}$ | $\frac{d}{dt} M_{s5s1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s5r4}$ | $L_{r5\beta}\omega_r$ | $M_{r5r1}\omega_r$ | $M_{r5r3}\omega_r$ |
| $-M_{r1s3}\omega_r$ | $-M_{r1s1}\omega_r$ | $-L_{r1\alpha}\omega_r$ | $-M_{r1r2}\omega_r$ | $-M_{r1s5}\omega_r$ | $r_{r4\beta} + \frac{d}{dt} L_{r4\beta}$ | $\frac{d}{dt} M_{r4r2}$ | $\frac{d}{dt} M_{r4s5}$ | $\frac{d}{dt} M_{r4s1}$ | $\frac{d}{dt} M_{r4r3}$ | 0 | 0 |
| $\frac{d}{dt} M_{s1r4}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r5}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s3}$ | $\frac{d}{dt} M_{s1s2}$ | $r_{s4\beta} + \frac{d}{dt} L_{s4\beta}$ | 0 | $\frac{d}{dt} M_{s4r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s4s2}$ | $\frac{d}{dt} M_{s4s1}$ |
| 0 | 0 | 0 | $\frac{d}{dt} M_{s1r5}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{d}{dt} M_{s5r5}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3r1}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3s2}$ | $\frac{d}{dt} M_{s3s1}$ |
| | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

$$[Z] =$$

где K_2 – температурный коэффициент; L_c – длина стержня; γ_c – удельная электрическая проводимость материала стержня; q_c – сечение стержня; $r_{k,z}$ – активное сопротивление участка короткозамыкающего кольца, примыкающего к стержню.

3. Активное сопротивление обмотки, учитывющее потери от вихревых токов,

$$r_{rs} = \frac{P_{Fe}}{3(I_0)^2},$$

где P_{Fe} – потери в магнитопроводе; I_0 – ток холостого хода ПЭД.

На стадии моделирования P_{Fe} определяется по [5]

$$P_{Fe} = K_{обр} P_{уд} \left(\frac{t}{50} \right)^\beta B_i G_i,$$

где $K_{обр}$ – коэффициент обработки ($K_{обр} = 1,4 \div 1,8$); $P_{уд}$ – удельные потери в стали при $f = 50$ Гц и $B = 1$ Тл (для ПЭД применяется сталь марки 2211 с $P_{уд} = 2,5$ Вт/кг); f – частота тока; β – коэффициент, зависящий от марки стали ($\beta = 1,5$); B_i – индукция в i -м участке магнитопровода; G_i – масса i -го участка магнитопровода.

Результаты расчета активных сопротивлений приведены в табл.1.

Таблица 1

| Обмотка | r_{s1} | r_{s2} | r_{s3} | r_{r1} | r_{r2} | r_{r3} | r_{r4} | r_{rs} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Сопротивление, Ом | 2,37 | 0,311 | 0,102 | 0,913 | 0,517 | 0,321 | 0,215 | 0,093 |

4. Активное сопротивление стержня ротора при разгоне ПЭД ($d\omega_r / dt > 0$)

$$r_{rp} = r_r K_r + r_{k,z},$$

где K_r – коэффициент увеличения активного сопротивления при пуске, по А.И. Вольдеку

$$K_r = \xi \frac{\sin(2\xi) + \sin(2\xi)}{\sin(2\xi) - \cos(2\xi)},$$

ξ – приведенная высота стержня.

5. Индуктивность обмотки статора

$$L_s = 0,079 \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{\Sigma \lambda_s l}{pq_1 2\pi f}, \quad (5)$$

где $\Sigma \lambda_s$ – сумма коэффициентов магнитных проводимостей (пазовой, лобовой, дифференциальной); l – активная длина сердечника статора; p – число пар полюсов; q_1 – число пазов статора на полюс и фазу.

Применение в ПЭД литой медной обмотки ротора вместо стержневой паяной позволило расширить возможности выбора форм пазов, в

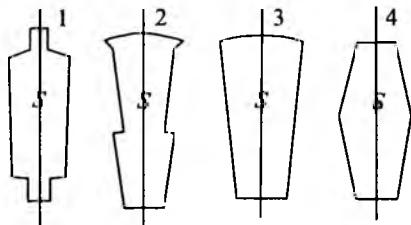


Рис.1. Перспективные формы пазов ротора ПЭД равной площади сечения S

том числе применить перспективные нетрадиционные формы пазов и их сочетания [6], показанные на рис.1.

Известные методики расчета не содержат формул для определения удельных магнитных проводимостей пазового и дифференциального рассеяния для таких форм пазов. Для определения удельных магнитных проводимостей этих пазов и прилегающих к ним участков мостиков, воздушного зазора и шлицев применен метод проводимостей зубцового контура (МПЗК) [7], согласно которому вследствие высокой магнитной проницаемости стали допустимо исследовать распределения магнитного поля только в воздушном зазоре и в непосредственной близости от него, т.е. в зоне зубцового контура (ЗК).

Этот метод учитывает влияние на электромагнитные процессы в АД двухсторонней зубчатости сердечников статора и ротора, изменения конфигурации воздушного зазора при вращении ротора, насыщения основных путей магнитного потока. В этом отношении он выгодно отличается от существующих методов, в которых перечисленные факторы учитываются недостаточно полно.

Идея МПЗК состоит в разбиении двумерной области поля АД на ряд мелких подобластей, в каждой из которых поле может быть рассчитано одним из известных численных методов. Совокупность магнитных полей ЗК позволяет определить главное поле, а также поле пазового и дифференциального рассеяния.

Расчет значений $\Sigma \lambda_s$ в формуле (5) осуществляется в МПЗК одним из известных методов определения удельных магнитных проводимостей элементов ЗК для различных относительных положений зубцов статора и ротора. Для сравнения и выбора метода для ПЭД все они сведены в табл.2. В качестве тестирующего для определения и выбора метода расчета удельных магнитных проводимостей принят графический метод и метод электроаналогий как наиболее полно отражающие картину магнитного поля в ЗК [8].

Таблица 2

| Метод определения магнитных проводимостей по МПЗК | Удельная проводимость ЗК | Недостатки |
|---|--------------------------|--|
| Математическое выражение закона распределения линий индукции и эквипотенциальных линий. | 4,7 | Прямолинейная зависимость проводимости от координаты вдоль расточки и оси двигателя не учитывается краевые эффекты (углы ЗК) |
| Вероятные пути магнитного потока | 5,35 | Недостаточный учет краевых эффектов, обусловленных наличием углов ЗК |
| Потенциальная сетка | 5,1 | Требуется предварительный электромагнитный расчет АД |
| Математическая обработка экспериментальных данных | 4,6 | Аналогично п. 1 |
| Графический, электроаналогий | 5,5–5,6 | Громоздкость. Точность расчетов субъективна |
| Конформных отображений | 3,9 | Невозможность получения общего аналитического решения |
| Интегральные | 4,3 | Непригодность для сложной конфигурации ЗК |

По результатам определения удельных магнитных проводимостей зубцового контура ПЭД, а также удобству пользования наиболее приемлемым и точным является аналитический способ вероятных путей магнитного потока, позволяющий учитывать значительное число элементарных проводимостей (рис.2).

Элементарная проводимость

$$\lambda_{\text{эл}} = \mu_0 \frac{S_{\text{cp}}}{l_{\text{cp}}} = \mu_0 \frac{V_3}{l_{\text{cp}}^2}. \quad (6)$$

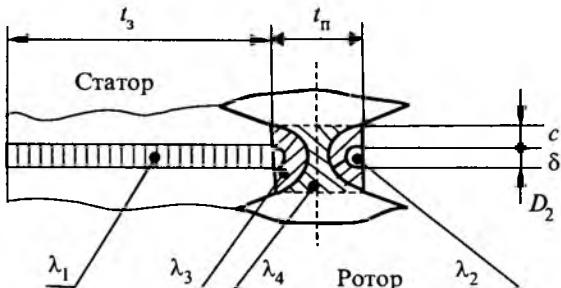


Рис.2. Элементарные проводимости в области воздушного зазора ПЭД

где S_{cp} – среднее поперечное сечение пути магнитного потока; l_{cp} – длина средней линии магнитопровода; V_3 – элементарный объем.

В соответствии с [9] элементарные магнитные проводимости ЗК в области воздушного зазора ПЭД определяются следующим образом:

– призматическое кольцо

$$\lambda_1 = \mu_0 \frac{2\pi t_3}{\ln\left(1 + \frac{2\delta}{D_2}\right)},$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; t_3 – ширина зубца; δ – воздушной зазор; D_2 – наружный диаметр ротора;

– половина тора

$$\lambda_2 = 0,83\mu_0(D_2 + \delta); \quad (7)$$

– круговое полукольцо, уменьшенное на объем половины тора

$$\lambda_3 = 2\mu_0 \frac{D_2 + \delta}{\frac{\delta}{c} + 1}; \quad (8)$$

– призматическое кольцо, уменьшенное на суммы объемов кругового полукольца и тора,

$$\lambda_4 = 2\pi\mu_0 \frac{t_n - 2c - \delta}{\ln\left(1 + \frac{4c + 2\delta}{D_2 - 2c}\right)}, \quad (9)$$

где t_n – ширина шлица; c – высота шлица (мостика).

Тогда суммарная магнитная проводимость для основного магнитного потока и потоков дифференциального рассеяния ПЭД

$$\Sigma\lambda_d = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (10)$$

Аналогично определяется удельная магнитная проводимость пазового рассеяния статора и ротора при любой форме паза.

Удельная магнитная проводимость лобового рассеяния обмотки статора по методике УкрНИИВЭ

$$\lambda_{pl} = K_{pl} \frac{l_{pl}}{l} q_l, \quad (11)$$

где K_{pl} – коэффициент для расчета проводимости в лобовой части, для однослойной обмотки ПЭД $K_{pl} = 0,4$; l_{pl} – длина лобовой части.

Суммарная удельная магнитная проводимость для статора

$$\Sigma\lambda_s = \lambda_{pl} + \lambda_{dl} + \lambda_{ll}. \quad (12)$$

На основе формул (5)–(12) определены индуктивности обмоток статора пространственной модели ПЭД по осям α и β с учетом порядка гармоники (табл.3) и неравномерности распре-

деления индукции в воздушном зазоре вдоль оси ПЭД.

Таблица 3

| Обмотка | L_{s1} | L_{s2} | L_{s3} |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Индуктивность, мГн | 0,436 | 0,0872 | 0,0623 |

6. Индуктивность обмотки ротора определяется по формуле

$$L_r = \frac{\Phi_2 w_2}{I_p}, \quad (13)$$

где Φ_2 – магнитный поток, ответвляющийся в ротор (с учетом дифференциального рассеяния); w_2 – число витков обмотки ротора; I_p – ток ротора.

Из векторной диаграммы и схемы замещения ПЭД следует

$$I_p = \frac{E_2}{\sqrt{(r'_2)^2 + (x'_{20})^2}}, \quad (14)$$

где E_2 – противо-ЭДС ротора; r'_2 – приведенное активное сопротивление ротора; x'_{20} – приведенное индуктивное сопротивление ротора.

На основе формул (13) и (14) и методики УкрНИИВЭ определены индуктивности обмоток ротора пространственной модели ПЭД по осям α и β с учетом порядка гармоники (табл.4) и неравномерности распределения индукции в воздушном зазоре вдоль оси ПЭД, а также влияние вихревых токов.

Таблица 4

| Обмотка | L_{r1} | L_{r2} | L_{r3} | L_{r4} | L_{r5} |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Индуктивность, мГн | 0,325 | 0,065 | 0,0464 | 0,0217 | 0,0209 |

7. Индуктивности обмоток при разгоне ПЭД ($d\omega_r / dt > 0$)

$$L_n = L_{s(r)} K_x,$$

где K_x – коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления при пуске, равный по А.И. Вольдеку

$$K_x = \frac{2 \operatorname{sh}(2\xi) - \sin(2\xi)}{3\xi \operatorname{ch}(2\xi) - \cos(2\xi)}.$$

| Обмотка | s_1 | s_2 | s_3 | r_1 | r_2 | r_3 | r_4 | r_5 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| s_1 | – | 0,0431 | 0,0398 | 0,0195 | 0,0415 | 0,0386 | 0,0305 | 0,0271 |
| s_2 | 0,0431 | – | 0,0407 | 0,0398 | 0,0413 | 0,0306 | 0,0303 | 0,0217 |
| s_3 | 0,0398 | 0,0407 | – | 0,313 | 0,0311 | 0,0375 | 0,0207 | 0,0135 |
| r_1 | 0,0195 | 0,0398 | 0,0313 | – | 0,0307 | 0,0287 | 0,0255 | 0,0115 |
| r_2 | 0,0415 | 0,0413 | 0,0311 | 0,0307 | – | 0,0199 | 0,0217 | 0,0118 |
| r_3 | 0,0386 | 0,0306 | 0,0375 | 0,0287 | 0,0199 | – | 0,0214 | 0,0198 |
| r_4 | 0,0305 | 0,0303 | 0,0207 | 0,0255 | 0,0217 | 0,0214 | – | 0,0174 |
| r_5 | 0,0271 | 0,0217 | 0,0135 | 0,0115 | 0,0118 | 0,0198 | 0,0174 | – |

8. Взаимная индуктивность между обмотками определяется отношением потокосцепления от взаимной индуктивности $\Psi_{s(s)}$, $\Psi_{s(r)}$, $\Psi_{r(r)}$ и тока в той обмотке, в которой определяется взаимная индуктивность

$$M_{s(r)} = \frac{\Psi_{s(r)}}{i_{s(r)}}.$$

Для взаимных индуктивностей между обмотками статора и ротора [5]

$$M_{s_i(r_i)} = \frac{6\mu_0}{p_i \pi^2} (w_{s_i} K_{ob_i})^2 \frac{\tau_i l}{\delta K_\delta},$$

где p_i – число пар полюсов i -й гармоники тока; w_{s_i} – число витков в i -й катушке статора; K_{ob_i} – обмоточный коэффициент для i -й гармоники тока; τ_i – полюсное деление i -й гармоники тока; K_δ – коэффициент воздушного зазора.

Индуктивность между обмотками для разных гармоник статора и ротора определяется расчетным путем по методике И.М.Постникова. Результаты расчета взаимных индуктивностей между обмотками пространственной модели ПЭД по осям α и β с учетом порядка гармоники, неравномерности распределения индукции в воздушном зазоре вдоль оси ПЭД и влияния вихревых и поперечных токов приведены в табл.5. Взаимные индуктивности обмоток при разгоне ПЭД ($d\omega_r / dt > 0$) определяются аналогично определению индуктивностей с учетом коэффициента K_x .

9. Более точный учет момента инерции вращающихся частей (ротора ПЭД и рабочего колеса насоса) осуществляется по формуле

$$J = \gamma \int \rho^2 dV = \gamma_i \sum_{i=1}^n \rho_i^2 V_i,$$

где γ_i – плотность материала вращающейся части; ρ_i – расстояния центра масс однородного элементарного объема ΔV до оси вращения.

Момент инерции вращающихся частей ПЭД45-117МВ5 рассчитан по чертежам и составляет $J = 0,0439 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Таким образом, определены все параметры ПЭД45-117МВ5 мощностью в одной секции

Таблица 5

4кВт, которые служат исходными данными для моделирования режимов его работы.

В системе дифференциальных уравнений (1)–(4) имеется 17 независимых переменных (16 токов и угловая скорость вращения ротора). Дифференциальные уравнения не имеют аналитического решения, так как содержат произведения переменных. Поэтому применены методы приближенного решения с использованием ПЭВМ. Одним из таких методов является интегрирование дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутта [10], достоинством которого является высокая точность решения. Алгоритм реализации метода [11] совмещен с пакетом прикладных программ для инженерных и научных работников системы MATLAB [12]. Пакет оперирует методом проводимостей ЗК и рассчитан на решения линейных и нелинейных вариантов уравнений.

Для исследования переходных процессов ПЭД с литой медной обмоткой ротора в системе MATLAB разработана программа численного интегрирования дифференциальных уравнений методом Эйлера (метод трапеций) с постоянным шагом интегрирования.

Следует отметить, что в практике реализации математических моделей MATLAB является последним словом, отвечающим самым высоким требованиям, предъявляемым к анализу электромагнитных и электродинамических процессов в АД.

При реализации математической модели ПЭД получен целый ряд осциллограмм, одна из которых приведена на рис.3.

По этой осциллограмме определены ударные токи статора ($i_{\text{ст}} = 71 \text{ A}$), ротора ($i_{\text{р}} = 75 \text{ A}$), ударный момент ($M_{\text{уд}} = 23,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$), а также время пуска ($t_{\text{п}} = 0,22 \text{ с}$) как при $M_c = 0$, так и при $M_c = f(t)$.

В переходном режиме ПЭД оказывается при пуске, разгоне, резком падении напора насоса, в режиме частных пусков и т.п., когда его напряжение, ток, электромагнитный момент и частота вращения являются функциями времени.

Динамические характеристики ПЭД представляют значительный интерес, так как позволяют определять броски тока, ударные моменты и время достижения установившейся частоты вращения. Последнее должно быть минимально возможным, так как от него зависит тепловое состояние ПЭД, работающего в режиме частных пусков при температуре пластовой жидкости (окружающей среды) до 100°C.

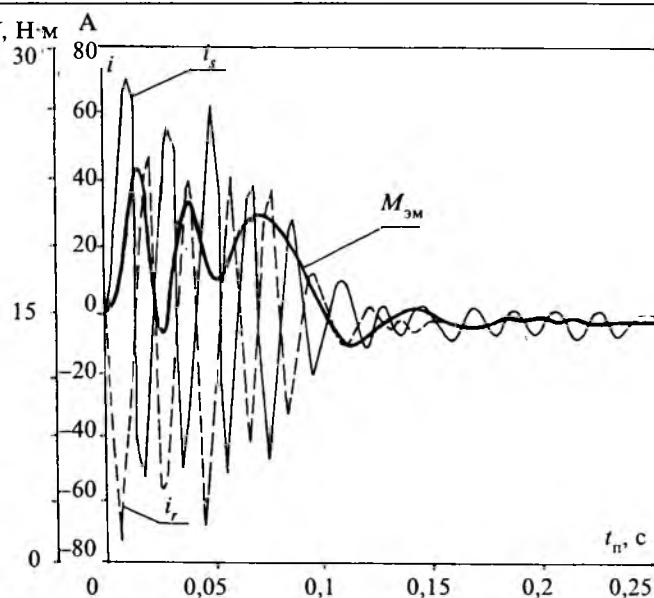


Рис.3. Осциллограмма пуска электродвигателя ПЭД 45-117МВ5 (при $M_c = M_h$)

Используя разработанную математическую модель ПЭД с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора, определены оптимальные значения сопротивления r_r ротора (оптимальное значение удельной проводимости γ медного сплава), индуктивности ротора L_r (оптимальное значение коэффициента, учитывающего прохождение магнитного потока через вал), а также выбрана лучшая форма паза ротора из четырех, приведенных на рис.1. Критериями являлись минимальные значения ударных тока и момента, а также времени разгона. Изменение параметров для каждой формы паза выполнено в пределах: $\gamma = 48 \div 59 \text{ м}\cdot\text{См}/\text{м}$; $K_{\text{вал}} = 0,1 \div 0,6$.

Сводные результаты моделирования приведены в табл.6.

Анализ результатов моделирования динамических характеристик ПЭД 45-117МВ5 с литой медной короткозамкнутой обмоткой показал, что наиболее приемлемыми параметрами являются: 1) трапециoidalная форма паза ротора со скругленной верхней стороной трапеции (№ 3); 2) удельная проводимость материала сплава обмотки ротора $\gamma = 51,5 \text{ м}\cdot\text{См}/\text{м}$; 3) коэффициент,

Таблица 6

| Форма паза | $i_{\text{уд}}, \text{A}$ | $M_{\text{уд}}, \text{Н}\cdot\text{м}$ | $T_{\text{п}}, \text{с}$ | Примечание |
|------------|---------------------------|--|--------------------------|--|
| 1 | 64 | 21 | 0,2 | – |
| 2 | 65 | 22 | 0,21 | – |
| 3 | 59 | 19 | 0,18 | $\gamma = 51,5$; $K_{\text{вал}} = 0,45$ |
| 4 | 71 | 23,5 | 0,22 | – |

учитывающий прохождение магнитного потока через вал, $K_{\text{вал}} = 0,45$.

Выводы

Результаты моделирования легли в основу разработки методик электромагнитного и электродинамического расчетов, а также разработки конструкторской документации секционных ПАД нового поколения с литой медной короткозамкнутой обмоткой ротора, отличающихся от существующих более высокими энергетическими и надежностными характеристиками, а также конкурентоспособностью на внешнем рынке.

Список литературы

1. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987.
3. Чувашев В.А., Медведев Ю.Л., Железняков А.В. и др. Обзор математических моделей асинхронных двигателей и методов их реализации//Вестник Харьковского НТУ. Новые решения в современных технологиях. 2000. Вып. 84. С. 31–38.
4. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высшая школа, 2000.
6. Макаров Л.Н., Ахунов Т.А., Попов В.И. Совершенствование конструкции и магнитопроводов асинхронных машин мощностью до 100 кВт российской серии RA // Электротехника. 1999. №8. С.7–9.
7. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И. и др. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. Киев: Техника, 1974.
9. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты переменного тока. М.: Энергия, 1968.
10. Бахвалов Н.С., Жуков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987.
11. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке БЕЙСИК для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987.

12. Partial Differential Equations Toolbox User's Guide.
Copy right 1984-1997 by the Math Works Inc.

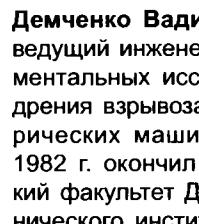
Чувашев Виктор Анатольевич – заместитель директора по науке УкрНИИВЭ, канд. техн. наук. В 1969 г. окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института. В 1984 г. защитил диссертацию по тематике, связанной с разработкой и исследованием взрывозащищенных электродвигателей с повышенной перегрузочной способностью и улучшенными вибраакустическими характеристиками.



Железняков Андрей Владимирович – научный сотрудник отдела экспериментальных исследований и внедрения взрывозащищенных электрических машин УкрНИИВЭ. В 1987 г. окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта МЭИ.

Папазов Юрий Николаевич – ведущий научный сотрудник отдела надежности, стандартизации и метрологии взрывозащищенного и рудничного оборудования УкрНИИВЭ. В 1987 г. окончил электромеханический факультет Донецкого политехнического института.

Дудник Михаил Захарович – заведующий кафедрой электромеханики и ТОЭ Донецкого национального ТУ, доктор техн. наук, проф. В 1961 г. окончил горно-электромеханический факультет Донецкого политехнического института. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию по теме: "Исследование и разработка линейных асинхронных электродвигателей для транспортно-технологических установок".



Демченко Вадим Николаевич – ведущий инженер отдела экспериментальных исследований и внедрения взрывозащищенных электрических машин УкрНИИВЭ. В 1982 г. окончил электротехнический факультет Донецкого политехнического института.

Цифровой способ измерения скольжения при испытаниях асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

АНДРИАНОВ М.В., канд.техн.наук, директор по качеству, РОДИОНОВ Р.В., инж.

ОАО "Владимирский электромоторный завод"

Предложен метод измерения скольжения, позволяющий автоматизировать испытания асинхронных двигателей. Определена погрешность метода. Успешно испытан образец измерительной системы, реализующий предложенный способ.

Обновление и модернизация существующего технологического оборудования при производстве асинхронных электродвигателей включает в себя также требование автоматизации процесса испытаний асинхронных двигателей (АД). Применение компьютерной техники при измерениях позволяет повысить точность измерений и увеличить производительность. Задача автоматизации испытаний АД является достаточно сложной. Цель настоящей статьи – определение способа, позволяющего автоматизировать измерение скольжения. Значение скольжения является необходимым параметром при определении условного КПД двигателя. Определение действующих значений напряжения, тока и мощности не представляет трудностей при испытаниях, а измерение скольжения требует определенных навыков и подготовки испытателя.

Под скольжением АД понимается выраженное в процентах отношение разности между синхронной частотой вращения n_c поля и частотой вращения ротора двигателя n к синхронной частоте вращения [1,2]:

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} 100\%. \quad (1)$$

Так как скольжение АД при нагрузках, близких к номинальной, обычно не превосходит нескольких процентов, определение его измерением частоты вращения не допускается и должно быть заменено определением его разности $n_c - n$ [1]. Однако стробоскопический метод с использованием газоразрядной лампы затрудняет автоматизацию процесса измерения. Для решения поставленной задачи разработана дифференциальная схема измерения скольжения (ДСИС). Структура измерительной системы совместно с ДСИС изображена на рис.1.

Вал испытуемого АД сопряжен с тахогенератором (ТГ). Сигнал с ТГ подается на первый вход дифференциальной схемы измерения сколь-

жения (ДСИС). ДСИС сопряжена посредством модуля аналогового ввода вывода (МАВВ) с персональным компьютером (ПК). МАВВ представляет собой двухканальный аналогово-цифровой преобразователь и одноканальный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). На второй вход ДСИС подается опорный сигнал с ЦАП МАВВ, который уравновешивает сигнал с ТГ при синхронном вращении. Первый канал АЦП предназначен для измерения напряжения ТГ при синхронном вращении и вычисления ПК "кода 2" для задания опорного напряжения. Второй канал АЦП используется непосредственно при измерении скольжения. МАВВ имеет следующие характеристики [3,4]:

| | | |
|---|-------|-----|
| Рабочий диапазон входного напряжения, В | | 0–5 |
| Рабочий диапазон выходного напряжения, В | | 0–5 |
| Время установления выходного напряжения, мкс, не более | | 5 |
| Цена МЭР, мВ | | 2,5 |
| Время преобразования входного напряжения, мкс, не более | | 3 |
| Максимальное напряжение между входами, В | | 15 |

Напряжение U_{TG} прямо пропорционально скорости вращения. Выражение (1) принимает вид:

$$s = \frac{U_{\text{TGC}} - U_{\text{TG}}}{U_{\text{TGC}}} 100\%, \quad (2)$$

где U_{TGC} – напряжение на выходе ТГ при синхронном вращении вала АД; U_{TG} – напряжение на выходе ТГ при скольжении s .

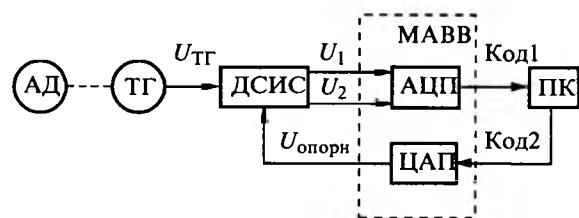


Рис.1.

Таблица 1

| $2p$ | k_1 |
|------|-------|
| 2 | 2 |
| 4 | 4 |
| 6 | 6 |
| 8 | 8 |
| 10 | 10 |
| 12 | 12 |
| 16 | 16 |
| 24 | 24 |

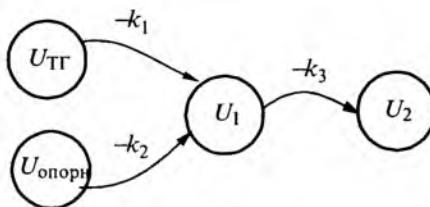


Рис.2.

Сигнальный график системы уравнений (3), иллюстрирующий работу ДСИС, изображен на рис.2:

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = -k_1 U_{\text{ТГ}} - k_2 U_{\text{опорн}} \\ U_2 = -k_3 U_1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Тогда с учетом (3) выражение (2) принимает вид:

$$s = \frac{U_2}{k_2 k_3 U_{\text{опорн}}} - 100\%. \quad (4)$$

Коэффициент k_1 зависит от синхронной скорости вращения двигателя и выбирается таким, чтобы произведение k_1 на напряжение ТГ $U_{\text{ТГ}}$ было приблизительно равно 4 В. При использовании тахогенератора ТМГ-30 значения коэффициента k_1 приведены в табл.1 в зависимости от числа пар полюсов испытуемого АД.

Коэффициент k_2 , для удобства расчета выбирается равным 1. Однако при схемотехнической реализации его значение можно учесть при расчете по выражению (4).

Коэффициент k_3 , зависит от значения скольжения и его рекомендуемые значения приведены в табл.2.

Выходное напряжение $U_{\text{опорн}}$ задается ПК через МАВВ, исходя из системы (3) при синхронном вращении:

$$U_{\text{опорн}} = -\frac{k_1}{k_2} U_{\text{ТГС}} \quad (5)$$

при условии

$$U_{1C} \rightarrow 0+. \quad (6)$$

Условие (6) выполняется МАВВ с точностью $k_2 \cdot MZP$. При калибровке всей измерительной системы на синхронной скорости, программа ПК обрабатывает “код 1” от первого канала АЦП МАВВ, проверяется выполнение условия (6), в случае не выполнения напряжение ЦАП изменяется до его выполнения. Вычисление “код 2” осуществляется с применением (5). При этом

$$U_2 = U_{2c} = -k_3 U_{1c}, \quad (7)$$

где U_{1c} – напряжение U_1 при синхронном вращении; U_{2c} – напряжение U_2 при синхронном вращении.

Учет неточности (7) в выражении (4) осуществляется путем вычитания:

$$s = \frac{U_2 - U_{2c}}{k_2 k_3 U_{\text{опорн}}} - 100\%. \quad (8)$$

Точность расчета по данному методу обусловлена погрешностью задания $U_{\text{опорн}}$ и равна:

$$\epsilon_s = \pm \frac{MZP}{k_3 U_{\text{опорн}}}. \quad (9)$$

Отсюда вытекают следующие пути уменьшения погрешности предложенного метода измерения скольжения:

- уменьшение МЗР или увеличение разрядности МАВВ;
- увеличение коэффициента k_3 ;
- увеличение $U_{\text{опорн}}$.

При этом следует иметь в виду, что $U_{\text{опорн}}$ ограничено уровнем напряжения ТТЛ сигналов МАВВ, а k_3 обусловлено характеристиками операционного усилителя реализующего k_3 .

Таким образом, использование МАВВ большей разрядности позволяет уменьшить погрешность измерения скольжения.

Следует отметить, что время измерения скольжения таким способом определяется временем аналого-цифрового преобразования МАВВ и не превосходит 3 мкс. В случае использования стробоскопического метода с применением газоразрядной лампы и круга с зачерненными секторами время измерения скольжения равно 10–15 с. Это оказывает влияние на значение скольжения при снятии рабочей характеристики АД в режиме перегрузки и особенно для двигателей с большим скольжением. При этом меняется тепловое состояние двигателя, и, соответственно, значение скольжения будет меняться в течение времени измерения.

В соответствии с предложенным способом

Таблица 2

| Тип двигателя | Скольжение s | k_3 |
|---|-------------------------|-------|
| Лифтовые двигатели, двигатели с повышенным скольжением. | $5\% \leq s \leq 20\%$ | 5 |
| Двигатели малой мощности, двигатели с повышенным скольжением. | $1\% \leq s \leq 10\%$ | 10 |
| Двигатели средней мощности | $0,5\% \leq s \leq 5\%$ | 20 |
| Двигатели большой мощности | $0,1\% \leq s \leq 1\%$ | 100 |

измерения скольжения разработана и испытана ДСИС на аналого-цифровой элементной базе. Коэффициенты усиления k_1 и k_3 изменялись согласно табл.1 и 2. Образец ДСИС был испытан в испытательном центре электрических машин ОАО “ВЭМЗ”. В качестве эталонного метода измерения скольжения применялся стробоскопический метод с использованием газоразрядной лампы и круга с зачерненными секторами, который закреплялся на вал испытуемого АД. Погрешность при этом не превышала нормы установленные ГОСТ Р-11828.

Выводы

1. Предложен цифровой метод измерения скольжения асинхронных электродвигателей, имеющий высокую точность.

2. Предложенный метод дает возможность автоматизировать испытания АД, в частности,

снятие рабочих характеристик и определение скольжения.

3. Обоснована и оценена погрешность измерения предложенным способом, которая меньше погрешности регламентируемой ГОСТ Р-11828.

Список литературы

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
2. ГОСТ-11828. Машины электрические врачающиеся. Общие методы испытаний.
3. Пат.2003125 РФ. Измерительный преобразователь искажений формы кривой переменного напряжения/ М.В. Андрианов, В.П. Комлев//Открытия. Изобретения. 1993. № 41–42.
4. Андрианов М.В., Родионов Р.В. Определение параметров фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов//Электротехника. 1999. № 11.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Астатические регуляторы скорости для двухмассового электропривода ТРН-АД с нелинейной характеристикой нагрузки

АКИМОВ Л.В., ДОЛБНЯ В.Т., ПИРОЖОК А.В.

Описано использование полиномиального метода, цепных дробей, стандартных и видоизмененных распределений полюсов для синтеза астатических систем регулирования скорости двухмассового электропривода переменного тока с исходно неустойчивой электромеханической частью в силу влияния нелинейной нагрузки, зависящей от скорости. Рассмотрены примеры синтеза регуляторов и дан анализ динамических показателей системы.

Повышение точности в отработке управляющих и возмущающих воздействий в системах регулирования скорости электропривода (ЭП) связано с применением астатических (А) регуляторов. При этом двойной эффект достигается, когда они используются совместно со статическими объектами. В данном случае замкнутая система становится астатической как по управляющему, так и по возмущающему воздействиям [1].

A polynomial equation method, chain fractions, standard and modified pole distributions are applied to synthesizing astatic speed regulation systems for a double-mass AC electric drive with an electromechanical part that is initially unstable due to action of speed-dependent nonlinear load. Synthesis of the regulators are illustrated with examples, analysis of the system dynamic performance given.

При создании астатических систем, как правило, находят применение два подхода. Первый заключается в добавлении интегральной части к уже известному статическому регулятору скорости [2]. Второй – основан на непосредственном синтезе астатического регулятора с передаточной функцией $W_{APC}(p)$. [3].

Целью статьи является представляющий определенный научный и практический интерес

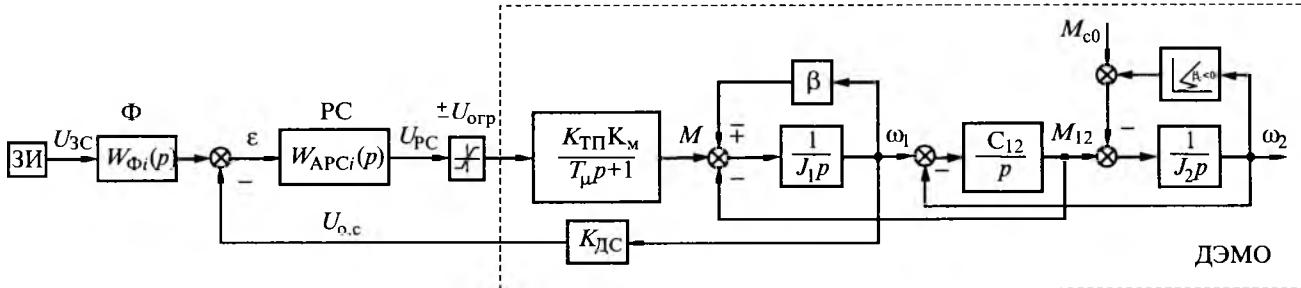


Рис.1. Структурная схема двухмассовой системы регулирования скорости электропривода ТРН-АД СВТ с астатическим РС

сравнительный анализ динамических показателей астатических систем стабилизации скорости вращения, созданных на основе того и другого способа, для двухмассового исходно неустойчивого, в силу влияния нелинейной нагрузки, ЭП переменного тока.

Рассмотрим представленную на рис.1 систему, отвечающую ЭП переменного тока ТРН-АД спирально-винтового транспортера (СВТ). Его особенностью является нелинейный характер создаваемой нагрузки $M_c = M_{c0} \pm \beta_c \omega_2$. Она зависит как от момента холостого хода M_{c0} , так и от скорости ω_2 исполнительного органа – упругой спирали. Кроме того, что очень важно, нагрузка имеет зависящий от скорости падающий участок с жесткостью $\beta_c < 0$. При определенном соотношении параметров ЭП это приводит к исходной статической и динамической неустойчивости двухмассового электромеханического объекта (ДЭМО). К тому же из-за введения обратных связей с коэффициентами β и β_c он становится статическим как по управляемому, так и по возмущающему воздействиям.

Будем предполагать, что для данного ЭП известны коэффициент усиления ТРН $K_{TП}$ и его малая постоянная времени T_μ , коэффициент электромеханического преобразования АД в точке линеаризации его механической характеристики K_m и ее жесткость $\pm\beta$, коэффициент обратной связи по скорости двигателя ω_1 K_{DC} , а также приведенные к валу двигателя моменты инерции первой J_1 и второй J_2 масс совместно с жесткостью упругой связи C_{12} .

Важно отметить, что в точке линеаризации жесткость механической характеристики АД может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Поэтому обратная связь с коэффициентом β на схеме показана с двумя знаками, т.е. отрицательная и положительная.

Допустим, что на основании анализа области устойчивости замкнутой системы рис.1, имеющей в интересующем случае две положитель-

ные обратные связи с коэффициентами β и β_c , найдено значение коэффициента усиления ее пропорционального РС. Тогда при

$$W_{PC1}(p) = K_{PC1}; \quad (1)$$

$$W_{o6}(p) = \frac{U_{o.c}(p)}{U_{PC}(p)} = \frac{\frac{K_{TП}K_mK_{DC}}{|\beta|} \left(\frac{J_2}{C_{12}} p^2 - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} p + 1 \right)}{(T_\mu p + 1) \left(\frac{J_1 J_2}{C_{12} |\beta|} p^3 + \frac{1}{C_{12}} \left(J_2 - J_1 \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right) p^2 + \left(\frac{J_1 + J_2}{|\beta|} - \frac{|\beta_c|}{C_{12}} \right) p + \left(1 - \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right) \right)} \quad (2)$$

для передаточной функции замкнутой системы по управляющему воздействию при $T_\mu = 0$ получено

$$W(p) = \frac{\omega_2(p)}{U_{3С}(p)} = \frac{K/K_{DC}}{\frac{J_1 J_2}{C_{12} |\beta|} p^3 + \frac{1}{C_{12}} \left(J_2 (K \pm 1) \mp \frac{J_1 |\beta_c|}{|\beta|} \right) p^2 + \left(\frac{J_1 + J_2 \mp |\beta_c|}{|\beta|} (K \pm 1) \right) p + \left((K \pm 1) \mp \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right)}, \quad (3)$$

где коэффициент усиления

$$K = K_{PC1} K_{TП} K_m K_{DC} / |\beta|. \quad (4)$$

В (3) знак “-” перед $|\beta_c|$ соответствует работе ЭП на падающем участке нелинейной характеристики нагрузки, а знак “+” – работе на восходящем участке. В сомножителе и слагаемом $(K \pm 1)$ знак “+” относится к отрицательной жесткости β механической характеристики АД, а знак “-” к ее положительному значению.

Из (3) может быть найдено значение среднегеометрического корня системы с П-РС. Оно определяется (в секундах в минус первой степени) выражением

$$\omega_{01} = \sqrt[3]{\frac{(K \pm 1) \mp \frac{|\beta_c|}{|\beta|}}{J_1 J_2}} \beta |C_{12}|. \quad (5)$$

Примем, что при известной неминимально-фазовой передаточной функции объекта $W_{ob}(p)$ (2), имеющей левые и правые нули и полюсы, методом полиномиальных уравнений [4] синтезирован статический РС. Он имеет передаточную функцию

$$W_{PC2}(p) = \frac{K_{PC2}(T_\mu p + 1)(T_1 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)}, \quad (6)$$

что обеспечивает системе среднегеометрический корень ω_{02} .

Из-за относительной сложности передаточной функции РС (6) с помощью цепных дробей [5] осуществлена при $T_\mu = 0$ аппроксимация $W_{ob}(p)$ (2) передаточной функцией второго порядка, также относящейся к группе неминимально-фазовых звеньев, имеющей вид

$$W_{ob}^*(p) = \frac{\frac{K_{TP} K_m K_{DC}}{|\beta|} (\tilde{L}p + |\beta_c| \tilde{A} \tilde{B})}{\frac{\tilde{A} \tilde{C}}{|C_{12}| |\beta|} p^2 + \left(\frac{|\beta_c| \tilde{A}^2 \tilde{B}}{|C_{12}| |\beta|} + \right. \\ \left. + \tilde{L} \left(1 - \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right) \right) p + |\beta_c| \left(1 - \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right) \tilde{A} \tilde{B}}, \quad (7)$$

где $\tilde{A} = C_{12}(J_1 + J_2) - \beta_c^2$; $\tilde{B} = 2C_{12}J_2 - \beta_c^2$;

$$\tilde{C} = C_{12}^2 J_2^2 (J_1 + J_2) + \beta_c^4 J_1 - 3\beta_c^2 C_{12} J_1 J_2; \quad \tilde{L} = \tilde{C} - \frac{\beta_c^2 \tilde{B}^2}{C_{12}}.$$

Применение в данном случае метода полиномиальных уравнений позволило найти более простую, чем (6), передаточную функцию статического РС

$$W_{PC3}(p) = \frac{K_{PC3}(T_1^* p + 1)}{T_2^* p + 1}. \quad (8)$$

При этом необходимый характер переходных процессов в замкнутой статической системе регулирования скорости обеспечивается выбором среднегеометрического корня ω_{03} .

Таким образом, для системы рис.1 получены

три передаточные функции статических РС: (1), (6) и (8).

Для создания астатической системы воспользуемся известным в системах подчиненного регулирования [6,7] приемом синтеза. Он основывается на замене пропорционального РС пропорционально-интегральным регулятором и применяется при создании двукратноинтегрирующих ЭП, когда передаточная функция РС принимается в виде

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(4T_\mu p + 1)}{4T_\mu p}.$$

Введем в рассмотрение малую эквивалентную постоянную времени (в секундах) статических систем регулирования скорости

$$T_{0i} = 1/\omega_{0i}. \quad (9)$$

Тогда передаточные функции астатических РС с учетом постоянной интегрирования

$$T_{ui} = 4T_{0i}/K_{PCi}, \quad (10)$$

представляются в виде:

$$W_{APC1}(p) = \frac{4T_{01}p + 1}{T_{u1}p}; \quad (11)$$

$$W_{APC2}(p) = \frac{(T_\mu p + 1)(T_1 p + 1)(4T_{02}p + 1)}{T_{u2}p(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)}; \quad (12)$$

$$W_{APC3}(p) = \frac{(T_1^* p + 1)(4T_{03}p + 1)}{T_{u3}p(T_2^* p + 1)}, \quad (13)$$

где в силу различных значений ω_{0i} постоянные интегрирования T_{ui} имеют свои вполне определенные значения, как и сомножитель $(4T_{0i}p + 1)$.

Перейдем теперь к непосредственному синтезу астатического РС, используя метод полиномиальных уравнений, как это сделано в [8], и аппроксимированную передаточную функцию объекта регулирования скорости (7). Для этого предварительно представим $W_{ob}^*(p)$ в виде

$$W_{ob}^*(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_0(b_1 p + b_0)}{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (14)$$

где коэффициенты полиномов числителя и знаменателя имеют значения:

$$b_1 = \tilde{L}; \quad b_0 = |\beta_c| \tilde{A} \tilde{B}; \quad a_2 = \frac{\tilde{A} \tilde{C}}{|C_{12}| |\beta|};$$

$$a_1 = \frac{|\beta_c| \tilde{A}^2 \tilde{B}}{|C_{12}| |\beta|} + \tilde{L} \left(1 - \frac{|\beta_c|}{|\beta|} \right);$$

$$a_0 = |\beta_e| \left(1 - \frac{|\beta_e|}{|\beta|} \right) \tilde{A} \tilde{B}, \quad (15)$$

а коэффициент усиления объекта

$$K_0 = K_{\text{TP}} K_m K_{\text{DC}} / |\beta|. \quad (16)$$

Согласно методу полиномиальных уравнений [4] представим полиномы (14) $P(p)$ и $Q(p)$ в виде компенсируемых регулятором $P_{k+}(p)$, $Q_{k+}(p)$, не-компенсируемых по желанию $P_{n+}(p)$, $Q_{n+}(p)$ и не подлежащих компенсации из-за нарушения условия грубости $P_-(p)$, $Q_-(p)$ полиномов и определим их степени с учетом отсутствия в (14) элемента, обладающего астатизмом порядка s . С учетом динамических свойств объекта, а также при $a_0 < 0$ ($|\beta_e| > |\beta|$) для степеней указанных полиномов, обозначаемых в виде $|\cdot|$, получим:

$$s = 0; |P_{k+}| = 0; |P_{n+}| = 1; |P_-| = 0; |Q_-| = 2;$$

$$|Q_{k+}| = 0; |Q_{n+}| = 0; |Q_-| = 2.$$

Зададимся астатизмом замкнутой системы регулирования скорости $v = 1$ и с учетом $P_{k+}(p) = 1$, $Q_{k+}(p) = 1$ представим передаточную функцию синтезируемого РС в виде

$$W_{\text{APC4}}(p) = \frac{M(p)}{K_0 p N(p)}, \quad (17)$$

где $M(p)$ и $N(p)$ неизвестные полиномы, подлежащие определению.

Их степень находится из соотношений, доказанных в [4]

$$|M| = |Q_-| + |Q_{n+}| + v - 1 = 2 - 0 + 1 - 1 = 2;$$

$$|N| = |Q| - |P_{k+}| - 1 = 2 - 0 - 1 = 1,$$

а поэтому

$$M(p) = m_2^* p^2 + m_1^* p + m_0^*; N(p) = n_1^* p + n_0^*. \quad (18)$$

Неизвестные коэффициенты полиномов $M(p)$ и $N(p)$ определяются в результате решения полиномиального уравнения синтеза

$$M(p)P_-(p)P_{n+}(p) + N(p)Q_-(p)Q_{n+}(p)p^v = G(p), \quad (19)$$

где $G(p)$ – характеристический полином замкнутой системы, имеющий степень

$$|G| = |M| + |N| + 1 = 2 + 1 + 1 = 4. \quad (20)$$

Для придания астатической системе желаемых динамических свойств, в качестве $G(p)$ примем, например, видоизмененное распределение полюсов по Баттерворту, которое представим в виде

$$G(p) = \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0, \quad (21)$$

где коэффициенты соответственно равны: $\alpha_4 = 1$, $\alpha_3 = 3$, вместо стандартного $\alpha_3 = 2,6$, $\alpha_2 = 3,4$, $\alpha_1 = 2,6$, $\alpha_0 = 1$ и, кроме того, эквивалентная постоянная времени T_0 определяется значением среднегеометрического корня ω_{04} .

Запишем уравнение (19) с учетом (21) в развернутой форме

$$\begin{aligned} & (m_2^* p^2 + m_1^* p + m_0^*)(b_1 p + b_0) + \\ & + (n_1^* p + n_0^*)(a_2 p^2 + a_1 p + a_0) p = \\ & = \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0. \end{aligned} \quad (22)$$

Левую часть уравнения (22) легко представить в виде слагаемых по мере убывания степени p . Тогда из сравнения сомножителей при одинаковых степенях p левой и правой частей уравнения (22) находятся неизвестные коэффициенты полиномов $M(p)$ и $N(p)$. Они представляют-ся как:

$$\begin{cases} n_1^* = \frac{\alpha_4}{\omega_{04}^4 a_2}; m_0^* = \frac{\alpha_0}{b_0}; m_1^* = \frac{1}{b_0} \left(\frac{\alpha_1}{\omega_{04}} - \right. \\ \left. - \frac{\alpha_0 b_1 - a_0 n_0^*}{b_0} \right); m_2^* = \frac{1}{b_1} \left(\frac{\alpha_3}{\omega_{04}^3} - \frac{\alpha_4 a_1}{\omega_{04}^4 a_2} - a_2 n_0^* \right); \\ n_0^* = \frac{1}{\left[b_1 \left(a_1 - \frac{a_0 b_1}{b_0} \right) + a_2 b_0 \right]} \left(\frac{a_2 b_1}{\omega_{04}^2} + \frac{\alpha_3 b_0}{\omega_{04}^3} + \right. \\ \left. + \frac{\alpha_4}{\omega_{04}^4} \left(\frac{a_1 b_0 - a_0 b_1}{a_2} \right) - \frac{\alpha_1 b_1^2}{\omega_{04} b_0} + \frac{\alpha_0 b_1^3}{b_0^2} \right). \end{cases} \quad (23)$$

Допустим, что при выбранном значении среднегеометрического корня ω_{04} получены положительные значения всех коэффициентов (23). Это говорит о физической реализуемости регулятора. Тогда передаточной функцией синтезированного прямым методом астатического РС на основе (17) будет

$$W_{\text{APC4}}(p) = \frac{(T_2^{**2} p^2 + T_1^{**} p + 1)}{T_{u4} p (T_3^{**} p + 1)}, \quad (24)$$

где постоянные интегрирования T_{u4} и времени форссирующей и инерционной частей определяются по соотношениям:

$$T_{u4} = \frac{K_0 n_0^*}{m_0^*}; T_1^{**} = \frac{m_1^*}{m_0^*}; T_2^{**2} = \frac{m_2^*}{m_0^*}; T_3^{**} = \frac{n_1^*}{n_0^*}. \quad (25)$$

Можно видеть, что использование для аппроксимации исходной передаточной функции объекта (2) цепных дробей способствует существенному упрощению не только статического

РС (8) по отношению к его передаточной функции (6), но и астатического РС (24) по сравнению с $W_{APC2}(p)$ (12). Передаточная функция $W_{APC4}(p)$ практически совпадает по виду с $W_{APC3}(p)$, в основе которой также лежит аппроксимированная передаточная функция объекта (7).

Обратим внимание, что с целью уменьшения перерегулирования на входе астатических систем необходимо установить фильтр (Φ) с соответствующей, используемому регулятору, передаточной функцией:

$$W_{\Phi 1}(p) = \frac{1}{4T_{01}p+1}; W_{\Phi 2}(p) = \frac{1}{(4T_{02}+T_1)p+1};$$

$$W_{\Phi 3}(p) = \frac{1}{4T_{03}p+1}; W_{\Phi 4}(p) = \frac{1}{T_1^* p+1}. \quad (26)$$

Проведем компьютерные исследования системы рис.1 с синтезированными астатическими РС и выполним сравнительный анализ их динамических и статических свойств на примере ЭП ТРН-АД спирально-винтового транспортера со следующими параметрами силовой части: двигатель типа 4A90L4У3 $P_h = 2,2 \text{ кВт}$; $U_h = 380 \text{ В}$; $I_h = 5,02 \text{ А}$; $2p = 4$; $\omega_c = 157 \text{ с}^{-1}$; $s_h = 0,051$; $\omega_h = 149 \text{ с}^{-1}$; $M_h = 14,76 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\lambda = 2,4$; $M_{kp} = 32,45 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $s_{kp} = 0,23$; $J_1 = J_{db} = 0,0056 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Механическая часть системы представлена параметрами СВТ, приведенными к валу двигателя: $C_{12} = 72,6 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; $J_2 = 0,021 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Для нелинейной характеристики нагрузки рис.2,а при $M_{c0} = 3 \text{ Н}\cdot\text{м}$ принято:

$$M_c = \begin{cases} M_{c0} + \beta_{cl}\omega_2; \beta_{cl} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; & 0 \leq \omega_2 \leq 30 \text{ с}^{-1} \\ -\beta_c\omega_2; \quad |\beta_c| = 0,34 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; & 30 \leq \omega_2 \leq 44,7 \text{ с}^{-1} \\ \beta_{c2}\omega_2; \quad \beta_{c2} = 0,045 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}; & 44,7 \leq \omega_2 \leq 157 \text{ с}^{-1} \end{cases} \quad (27)$$

В качестве параметров ТРН выбрано: $K_{TP}K_m = 3,25$; $0,003 \leq T_\mu \leq 0,03 \text{ с}$. Принято $U_{3C} = 10 \text{ В}$, что определило коэффициент обратной связи по скорости двигателя $K_{DC} = 0,0637 \text{ В}\cdot\text{с}$. На входе системы установлен задатчик интенсивности

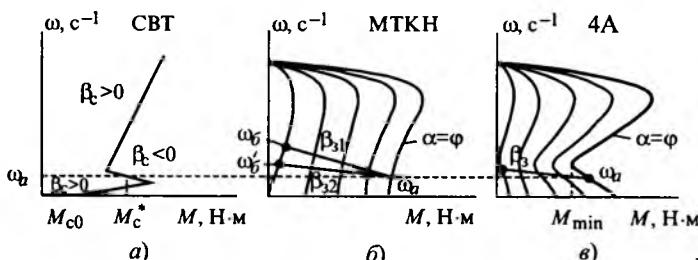


Рис.2. Механические характеристики нелинейной реактивной нагрузки СВТ (а) и асинхронного ЭП с двигателями серий МТКН (б) и 4А (в)

(ЗИ), обеспечивающий время разгона ЭП до номинальной скорости $t_p = 0,44 \text{ с}$.

На нелинейной характеристике нагрузки рис.2,а выбрана рабочая точка с координатами $\omega_a = 32,5 \text{ с}^{-1}$, M_c^* . Для соответствующей точки механической характеристики АД серии 4А рис.2,в по методике [9,10] рассчитана жесткость $\beta = -0,0116 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. Принято, что β может принимать как отрицательное, так и положительное значение, что имеет место на рис.2,б при использовании двигателя серии МТКН. Таким образом, вполне оправдано рассматривать обратную связь по жесткости β как отрицательной ($\beta < 0$), так и положительной при $\beta > 0$. Более того, в ходе экспериментов β изменялась более чем в 25 раз в обе стороны от расчетного значения при сохранении условия $|\beta| < |\beta_c|$.

Предварительно были найдены среднегеометрические корни ω_0 , эквивалентные постоянные времени T_{0i} и параметры трех статических РС. Соответственно получено:

$$K_{PC1} = 4,5; \omega_{01}(5) = 72 \text{ с}^{-1}; T_{01} = 0,014 \text{ с};$$

$$W_{PC1}(p)(1) = 4,5; K_{PC2} = 4,93; \omega_{02}(5) = 50 \text{ с}^{-1};$$

$$T_{02} = 0,02 \text{ с};$$

$$W_{PC2}(p)(6) = \frac{4,93(T_\mu p+1)(2,58 \cdot 10^{-3} p+1)}{3,05 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,01p+1};$$

$$K_{PC3} = 5,02; \omega_{03}(5) = 35 \text{ с}^{-1}; T_{03} = 0,028 \text{ с};$$

$$W_{PC3}(p)(8) = \frac{5,02(4 \cdot 10^{-3} p+1)}{0,02p+1}.$$

Это определило параметры астатических РС и фильтров Φ на входе системы:

$$W_{APC1}(p)(11) = \frac{0,056p+1}{0,0124p}; W_{\Phi 1}(p)(26) = \frac{1}{0,056p+1}; \quad (28)$$

$$W_{APC2}(p)(12) = \frac{(T_\mu p+1)(8,26 \cdot 10^{-2} p+1)}{0,016p(3,05 \cdot 10^{-5} p^2 + 0,01p+1)};$$

$$W_{\Phi 2}(p)(26) = \frac{1}{0,0826p+1}; \quad (29)$$

$$W_{APC3}(p)(13) = \frac{4,48 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,11p+1}{0,022p(0,02p+1)};$$

$$W_{\Phi 3}(p)(26) = \frac{1}{0,11p+1}. \quad (30)$$

Для вычисления параметров $W_{APC4}(p)(24)$ предварительно найдены входящие в (7) коэффициенты: $\tilde{A} = 1,815$; $\tilde{B} = 2,93$; $\tilde{C} = 0,0589$; $\tilde{L} = 0,045$, а также по (15) коэффициенты a_i и b_i полиномов аппроксимированной передаточной

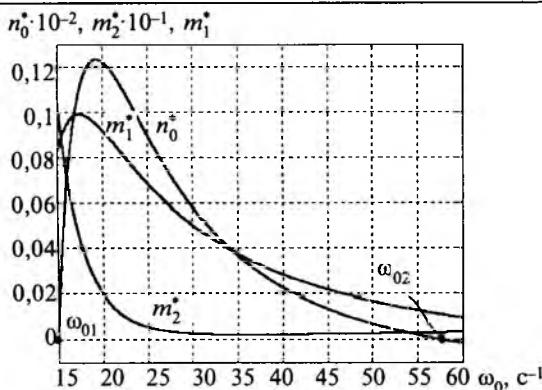


Рис.3. Зависимости коэффициентов n_0^* , m_1^* и m_2^* от ω_0

функции (14): $b_0 = 1,81$; $b_1 = 0,045$; $a_0 = -51,19$; $a_1 = 2,623$; $a_2 = 0,127$. Они подтверждают исходную неустойчивость объекта, так как $a_0 < 0$.

При известных коэффициентах α_i выбранного виодизмененного распределения четвертого порядка по Баттерворту (21) для определения среднегеометрического корня ω_{04} построены зависимости (23) n_1^* , m_1^* и m_2^* в функции ω_0 (рис.3).

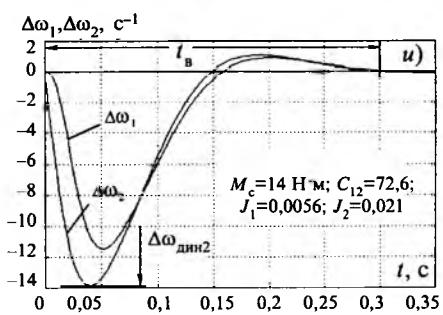
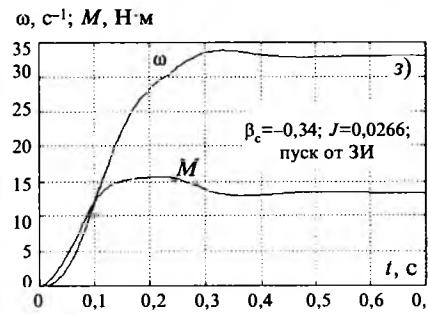
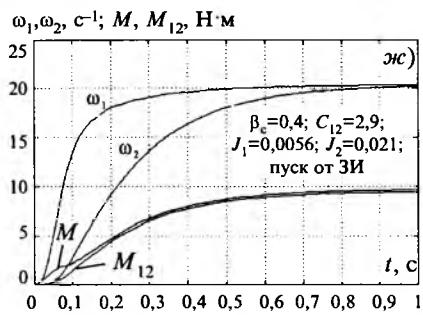
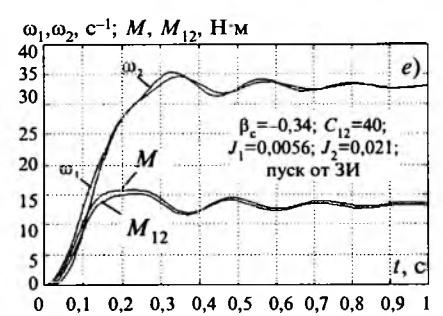
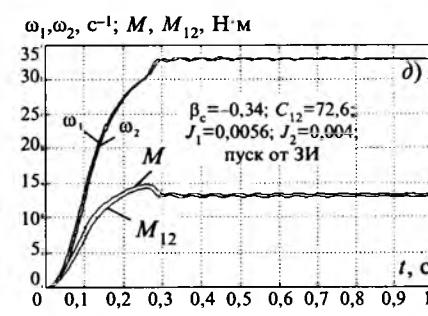
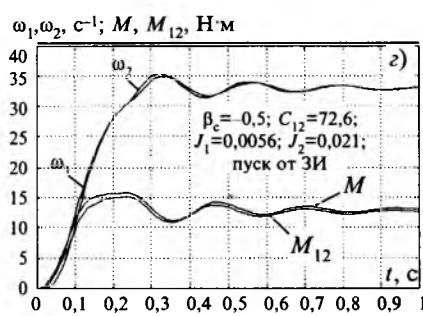
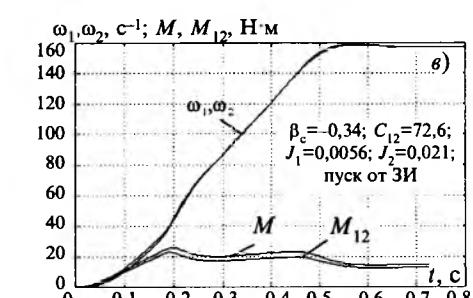
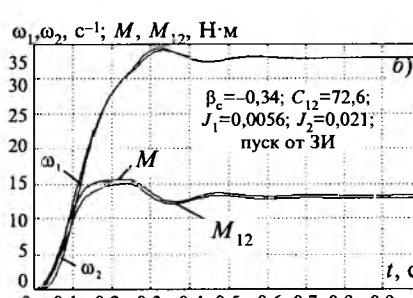


Рис.4. Переходные процессы в системе с передаточной функцией РС $W_{APC1}(28)$
Вологодская областная универсальная научная библиотека

Можно видеть, что положительность этих коэффициентов достигается в диапазоне изменения среднегеометрического корня $15 < \omega_0 < 58$ с⁻¹. При этом следует учесть, что $n_1^* > 0$ и $m_0^* > 0$.

Выберем из указанного диапазона $\omega_{04} = 35$ с⁻¹. Тогда для коэффициентов полиномов $M(p)$ и $N(p)$ (23) окончательно будем иметь: $n_0^* = 3,68 \cdot 10^{-4}$; $n_1^* = 5,24 \cdot 10^{-6}$ с; $m_0^* = 0,552$; $m_1^* = 3,75 \cdot 10^{-2}$ с; $m_2^* = 2,11 \cdot 10^{-4}$ с². По (24), (25) при $K_0 = 17,85$ находятся параметры передаточной функции, синтезированного прямым методом, астатического РС и фильтра Φ на входе системы:

$$W_{APC4}(p)(24) = \frac{3,82 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,068 p + 1}{0,0143 p(0,014 p + 1)},$$

$$W_{\Phi 4}(p)(26) = \frac{1}{0,068 p + 1}. \quad (31)$$

На рис.4–7 показаны переходные процессы в системе с найденными параметрами астатических РС (28)–(31). На рис.4–7 осциллограммы a соответствуют переходной характеристике сис-

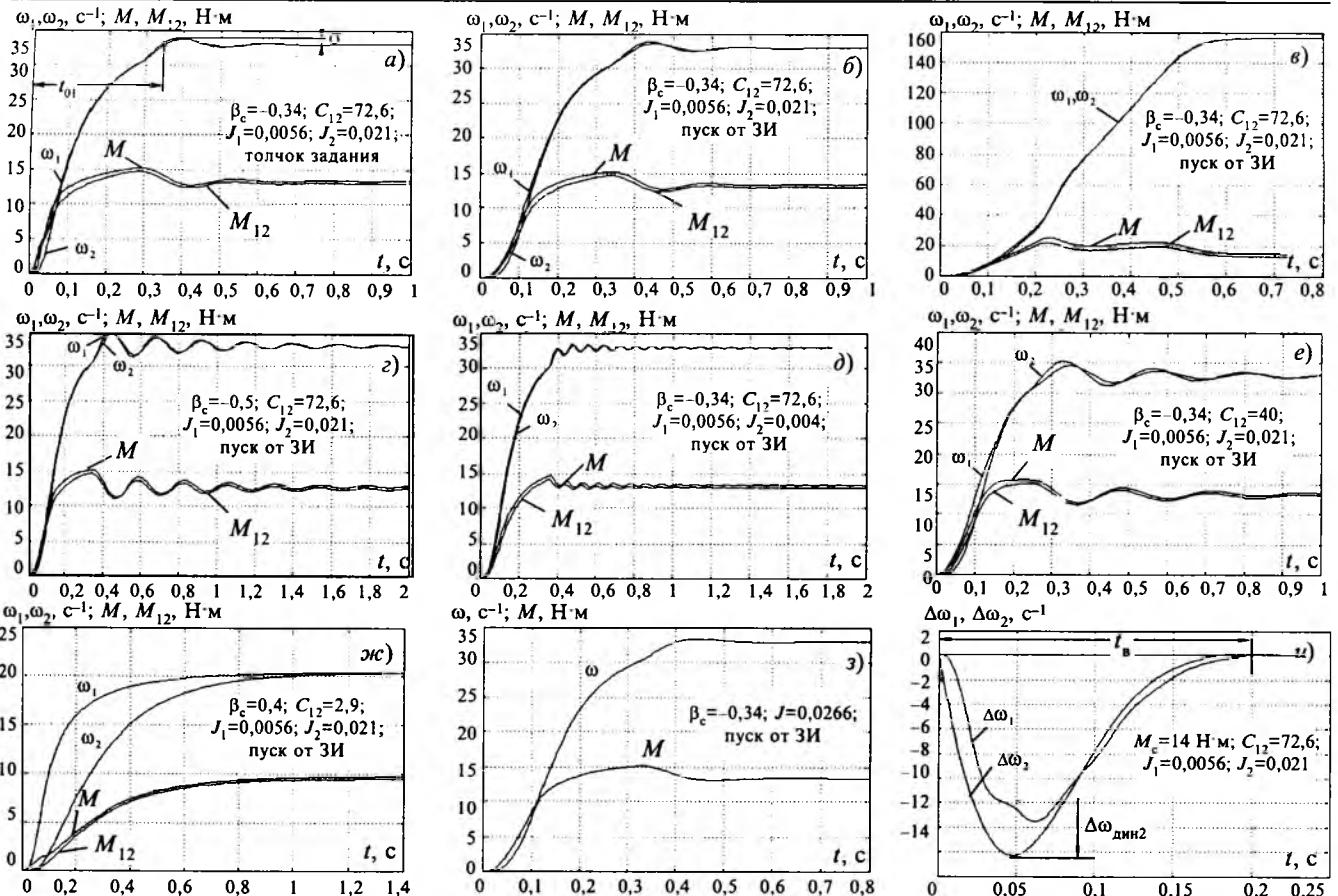


Рис.5. Переходные процессы в системе с передаточной функцией РС $W_{APC2}(29)$ при $T_\mu = 0,003$ с

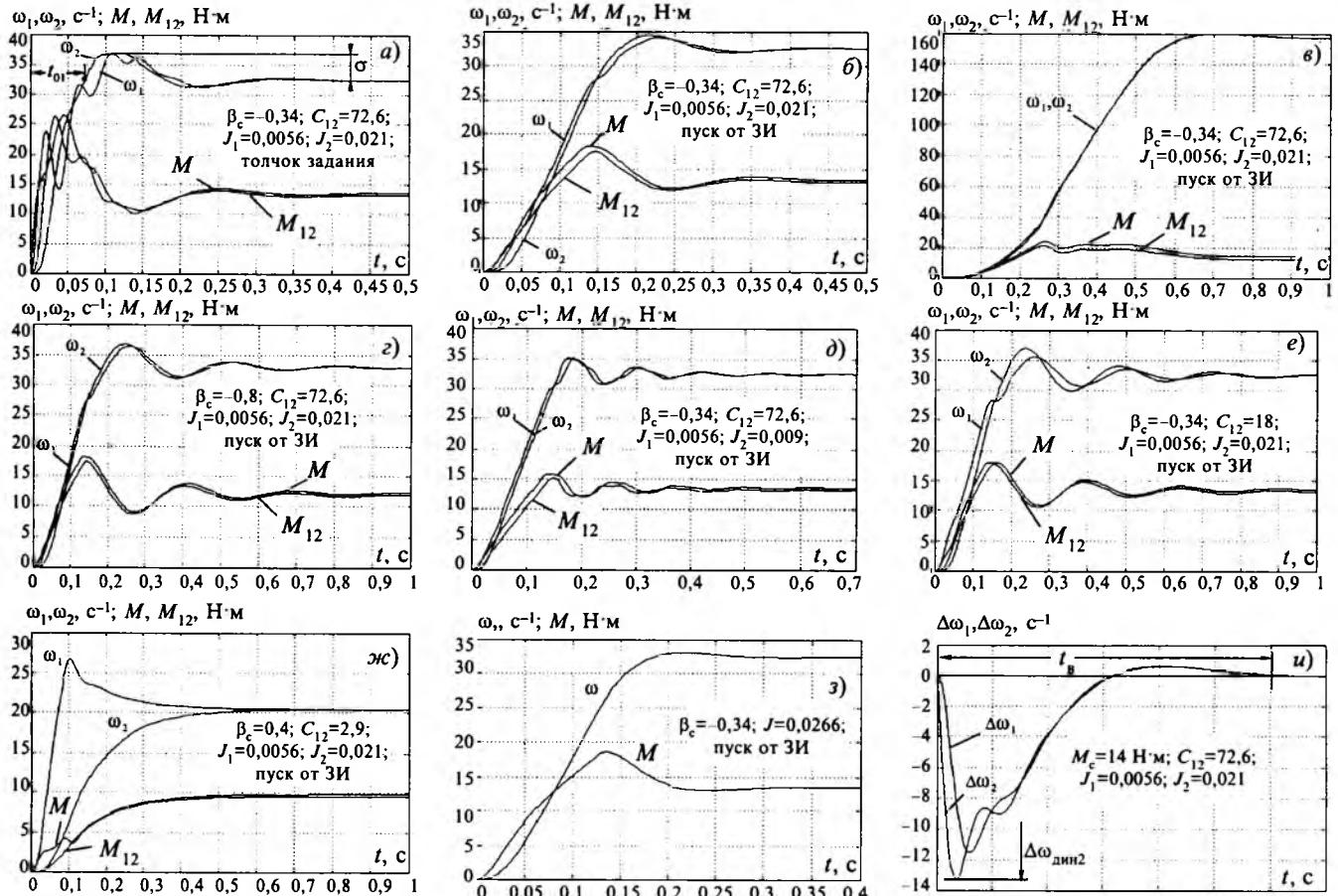


Рис.6. Переходные процессы в системе с передаточной функцией РС $W_{APC3}(30)$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

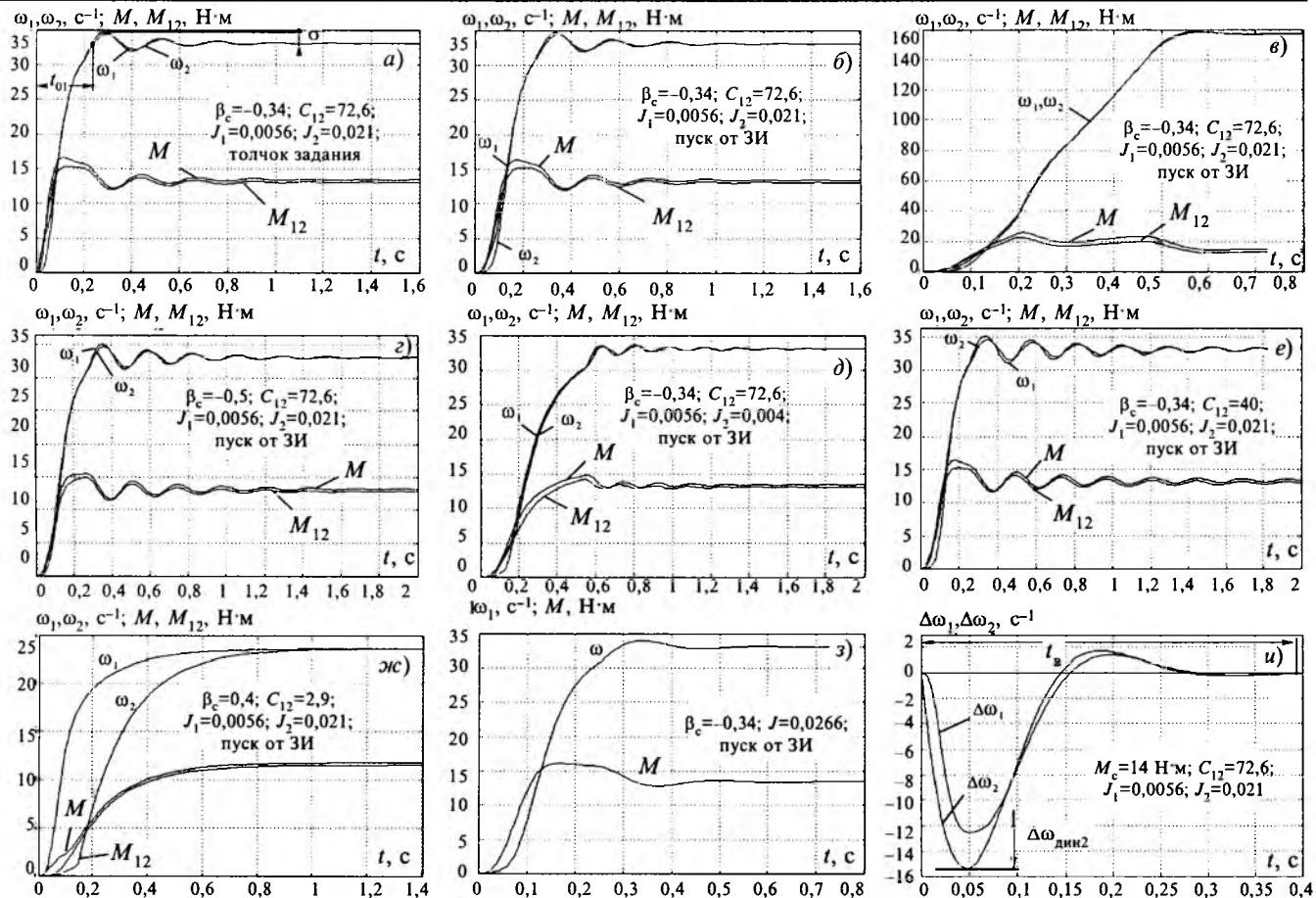


Рис.7. Переходные процессы в системе с передаточной функцией РС WAPC4(31)

темы при разгоне ЭП от толчка задания до скорости падающего участка характеристики нагрузки $\omega_1 = \omega_2 = 32,5 \text{ с}^{-1}$ и характеризуется временем первого согласования t_{01} и величиной перерегулирования σ . На осциллографах б показан процесс разгона астатической системы от ЗИ на ту же скорость, что отвечает работе ЭП в режиме дозирования СВТ. Осциллографы в соответствуют разгону ЭП от ЗИ на номинальную скорость с учетом нелинейной нагрузки рис.2,а. Данный процесс характеризует СВТ в режиме заполнения направляющего кожуха и в установившемся режиме транспортирования сыпучих ингредиентов.

Осциллографы г, д, е подтверждают работоспособность двухмассового ЭП на скорости $32,5 \text{ с}^{-1}$ падающего участка характеристики нагрузки при уменьшении его жесткости β_c , значение которой, в общем-то, носит случайный характер (осциллографы г), уменьшении момента инерции второй массы до $J_{2\min}$ (осциллографы д) и уменьшении жесткости упругой связи до $C_{12\min}$ (осциллографы е). Данные процессы характерны для СВТ при изменении удельной массы перемещаемого сыпучего материала и режи-

ма его высвобождения из транспортера. Происходит увеличение свободного участка трубопровода со спиралью и уменьшение массы перемещаемого груза.

Работе ЭП на восходящем участке характеристики нагрузки с жесткостью $\beta_{c1} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ соответствуют осциллографы ж. Здесь для всех астатических РС установлено, что при расчетных значениях J_1 и J_2 допустимо уменьшение коэффициента жесткости упругой связи C_{12} до 2,9 Н·м/рад, т.е. в 25 раз.

Процесс на осциллографах з отвечает работе одномассового ЭП на падающем участке нелинейной характеристики нагрузки. Это отвечает аномальному режиму полного заполнения трубопровода СВТ в момент его работы на пониженной скорости дозирования сыпучего материала. Наконец, на осциллографах и приведена переходная характеристика по возмущению $M_c = 14 \text{ Н}\cdot\text{м}$ с указанными на ней значениями динамической просадки скорости $\Delta\omega_{\text{дин2}}$ и времени ее восстановления t_b . В результате проведенного сравнительного анализа в таблицу сведены динамические и статические показатели, характеризующие систему со всеми, синтезиро-

| W_{APC_i} | $\omega_0, \text{с}^{-1}$ | $t_{01}, \text{с}$ | $\sigma, \%$ | $\Delta\omega_{\text{дин2}}, \text{с}^{-1}$ | $t_b, \text{с}$ | $\beta_{\text{смн}}, \text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ | $J_{2\text{min}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$ | $C_{12\text{min}}, \text{Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ | $C_{12\text{min}}, \beta_c > 0$ |
|-------------|---------------------------|--------------------|--------------|---|-----------------|--|---|--|---------------------------------|
| 1 | 72 | 0,23 | 4,9 | -14 | 0,3 | -0,5 | 0,004 | 40 | 2,9 |
| 2 | 50 | 0,33 | 3,1 | -16,3 | 0,2 | -0,5 | 0,004 | 40 | |
| 3 | 35 | 0,07 | 12,3 | -13,3 | 0,6 | -0,8 | 0,009 | 18 | |
| 4 | 35 | 0,23 | 6,1 | -16,2 | 0,4 | -0,5 | 0,004 | 40 | |

ванными здесь, астатическими РС.

Из таблицы можно заключить, что все синтезированные РС обеспечивают мало отличающиеся друг от друга динамические и статические показатели. Это подтверждает возможность их использования в составе действующего ЭП ТРН-АД, двухмассовая электромеханическая часть которого изначально представляется в виде неминимально-фазовой передаточной функции. Синтезированные регуляторы гарантируют требуемое качество переходных процессов в системе рис.1 при ее работе на холостом ходу, с постоянной нагрузкой $M_{c0} = \text{const}$, а также на восходящих и падающем участках нагрузки с жесткостью $\beta_c \geq 0$.

Выводы

1. Обоснована эффективность использования метода полиномиальных уравнений для синтеза статических и астатических РС ЭП переменного тока с нелинейной нагрузкой в случае, когда передаточная функция объекта управления относится к группе неминимально-фазовых звеньев, имеющая к тому же правые нули и полюсы.

2. Установлено существенное упрощение решения задачи синтеза и передаточной функции РС, когда для аппроксимации исходной неминимально-фазовой передаточной функции объекта применяются цепные дроби, способствующие понижению ее порядка с сохранением динамических свойств.

3. Оба рассмотренных метода синтеза астатических РС для исходно неустойчивого двухмассового ЭП ТРН-АД в равной степени эффективны, так как созданные на их основе системы имеют практически одинаковые динамические и статические показатели.

4. Использование полиномиального метода совместно со стандартными и видоизмененными распределениями полюсов для синтеза РС не ограничивает возможность задания в широких пределах среднегеометрического корня, определяющего быстродействие замкнутой системы.

Список литературы

1. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. М.: Энергия, 1973.

2. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. М.: Энергоатомиздат, 1992.

3. Красовский А.А., Пospelов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.: Госэнергоиздат, 1962.

4. Залиев С.Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода //Электротехника. 1998. №2. С.48–53.

5. Долбня В.Т. Топологический синтез и упрощение сложных схем высокого порядка с использованием цепных дробей //Электротехника. 1999. №5. С.6–12.

6. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970.

7. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат. 1983.

8. Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 2000.

9. Braslavskiy I.Ya. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988.

10. Герасимяк Р.П. Тиристорный электропривод для кранов. М.: Энергия, 1978.

Акимов Леонид Владимирович – профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального политехнического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ"). Окончил электромашиностроительный факультет ХПИ в 1961 г. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Теория, алгоритмизация проектирования и создание оптимальных по быстродействию электроприводов при ограничениях координат и идеализированном управлении" в МЭИ.

Долбня Виктор Тимофеевич – профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Национального политехнического университета "Харьковский политехнический институт" (НТУ "ХПИ"). Окончил электромашиностроительный факультет ХПИ в 1955 г. В 1979 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Исследования устройств преобразовательной техники топологическим методом" в Институте электродинамики АН Украины.

Пирожок Андрей Владимирович – ассистент кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок" Запорожского национального технического университета (ЗНТУ). Окончил факультет электрификации и автоматизации Мелитопольского государственного института механизации сельского хозяйства в 1996 г.

Синтез силовых контактных соединений проводников

ЮРКЕВИЧ В.М., доктор техн. наук, проф.

МГТУ МАМИ

Предлагается развитие теории синтеза контактных соединений [1,3]. На основе предложенной ранее математической модели с однородными параметрами делается переход к варианту с переменными параметрами, позволяет значительно уменьшить неравномерность распределения плотности тока и мощности у контактной поверхности.

Рассмотрение распределения электрического поля в контактном соединении (КС) [1] позволило в общей форме учесть необходимые электрические параметры проводников и общие связи между напряжениями и составляющими тока (продольной и нормальной). Естественно, что наибольшее внимание уделено нормальной составляющей J_n линейной плотности тока перетекания с одного электрода на другой (рис.1), поскольку именно эта характеристика отвечает назначению всего КС. Оказалось [1], что J_n является функцией координаты x , причем по определению $\int_0^L J_n(x)dx = I$, где I – весь ток проводника. Было получено дифференциальное уравнение для напряжения $U(x)$ на приконтактном слое, которое связано с плотностью тока законом Ома $U(x)g_0 = J_n(x)$. КС характеризуется погонными параметрами: r_{01} , r_{02} , g_0 – соответственно погонные сопротивления первого и второго проводников (рис.1) и погонная поперечная проводимость; $r_0 = r_{01} + r_{02}$. В общем случае уравнение должно записываться в частных производ-

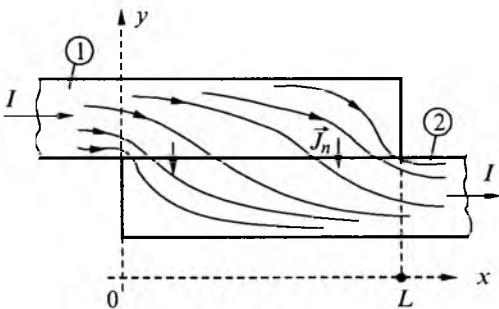


Рис.1.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

The development of the electrical theory of contact couplings is offered [1,3]. On the basis of offered before mathematical model with homogeneous parameters the transition to variant with variable (nonlinear) parameters is done, that at the end allows considerably to reduce nonuniformity of the performance of allocation of a current density and power for a contact surface.

ных, но при постоянстве геометрических размеров (рис.1) в направлении, перпендикулярном осям x , y , оказалось возможным учитывать лишь одну координату:

$$\frac{d^2U(x)}{dx^2} - \gamma^2 U(x) = 0, \quad (1)$$

где $\gamma^2 = r_0 g_0$.

Решение (1) с учетом очевидных граничных условий в конечном итоге приводит к

$$J_n(x) = I \frac{1}{Z_c \operatorname{sh} \gamma L} [r_{02} \operatorname{ch} \gamma x + r_{01} \operatorname{ch} \gamma (L-x)]; \quad (2)$$

здесь $Z_c = \sqrt{\frac{r_0}{g_0}}$ – характеристическое сопротивление.

Введем параметр $x_0 = \frac{1}{\gamma}$ – длина растекания тока, которым измеряются координата x и длины контакта L : $\gamma x = \frac{x}{x_0} = x_r$, и $\lambda L = L_r$ (L – фи-

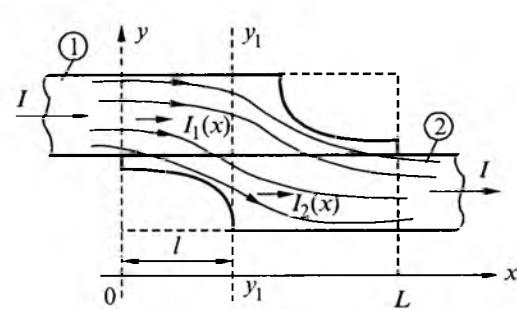


Рис.2.

физическая длина КС; L_r – нормированная). В этой работе ограничимся рассмотрением симметрических КС, т.е. $r_{01} = r_{02} = \frac{1}{2}r_0$, так что в этом случае

(2) примет вид

$$J_n(x_r) = I \frac{r_{01}}{Z_c \operatorname{sh} L_r} [\operatorname{ch} x_r + \operatorname{ch}(L_r - x_r)]. \quad (3)$$

Выражение (3) в таком виде непригодно для сравнительных оценок, так как справа оно содержит полный ток I . Поскольку ранее всегда считалось, что плотность тока на идеальной контактной поверхности постоянна и $J_n = I/L$, то и сравнение полученного результата делается с этой величиной. Попутно в нормирующую величину включим константу r_{01}/Z_c , так что нормированная форма плотности тока будет иметь вид

$$J_r(x) = \frac{L}{\operatorname{sh} L_r} [\operatorname{ch} x_r + \operatorname{ch}(L_r - x_r)]. \quad (4)$$

Здесь справа имеется ограниченный набор переменных: x_r – независимая переменная; L – физическая длина КС, которую предполагается менять при подборе параметров КС; $L_r = L/x_0$ – нормированная длина КС.

Выражение (4) несложно привести к виду

$$J_r(x_r) = L \frac{1+e^{L_r}}{2\operatorname{sh} L_r} [e^{-x_r} + e^{-(L_r-x_r)}], \text{ и поскольку}$$

$\frac{1+e^{L_r}}{2\operatorname{sh} L_r} \approx 1$ почти всюду, за исключением $L_r < 1$,

то

$$J_r \approx L [e^{-x_r} + e^{-(L_r-x_r)}]. \quad (5)$$

Отсюда следует, что плотность тока на краю контакта $-x_r = 0$ или $x_r = L_r$ – пропорциональна L

$$J_r(0) \approx L \quad (6)$$

за исключением значений $L_r < 1$.

Итак, казалось бы естественное желание уменьшить плотность тока перетекания за счет удлинения контакта закономерно приводит к увеличению этой плотности на краю пропорционально удлинению контакта.

Переход от идеальной контактной поверхности предполагает учет дополнительных параметров [2], характеризующих реальный контакт (шероховатость, контактные пятна, пленки и пр.). Всё это в нашем анализе должно учитываться в проводимости g_0 . Уменьшение g_0 приводит к увеличению длины растекания тока x_0 и в конечном итоге – к уменьшению нормированной дли-

L_r ; это в свою очередь может несколько сглаживать график функции $J_r(x_r)$.

Простым пересчетом функций плотности тока несложно получить зависимости плотности мощности в приконтактной области КС: $p(x_r) = \sigma J_r^2(x_r)$, где σ – удельная проводимость материала. Поскольку можно принять $\sigma = \text{const}$, то нормированная функция плотности мощности будет выглядеть просто:

$$p_r(x_r) = J_r^2(x_r). \quad (7)$$

Наибольший интерес, как обычно, представляют значения мощности на краю контакта, $x_r = 0$. К примеру, если у кривой плотности тока $J_r(0) = 10$ (напомним, что это – превышение плотности равномерного распределения), то у плотности мощности $p_r(0) = 100$, т.е. стократное превышение плотности относительно равномерного распределения. Понятно, что для силовых контактных соединений превышение в десятки (сотни) раз при большом общем токе I неприемлемо, так как либо приконтактная зона, либо даже проводник при этом подвержены опасности. Например, в лабораторной практике при токе КЗ (10 кА) наблюдались разрушения материала (расплав алюминиевой жилы кабеля), причем разрушение имело место на краю контакта и, что очень интересно, разрушался не край второго проводника (рис.1), а тело первого на уровне края второго! Всемуказанному естественным продолжением должна быть постановка задачи снижения плотности мощности или снижения плотности тока перетекания. Разумеется, этой цели надо достигать сначала за счет изменения конструкции КС (формы и размеров), а затем – оптимизации параметров, к которым плотность тока оказывается наиболее чувствительна.

Сначала попытаемся из общих соображений представить изменения плотности тока при деформации элементов КС. На рис.2 показан вариант КС, где электроды (по сравнению с рис.1) имеют краевую выемку. По-прежнему будем рассматривать симметричные контакты, что позволяет далее ограничиваться описанием, относящимся только к левой части относительно оси симметрии $y_1 \div -y_1$.

Очевидно, что выемка на краю 2-й пластины приводит к тому, что погонные параметры r_{02} (продольное сопротивление 2-й пластины) и g_0 (поперечная проводимость) становятся функциями координаты x , тогда как на этом участке $r_{01} = \text{const}$.

Увеличение r_{02} должно приводить к уменьшению части тока I , переходящей на 2-й электрод

при малых x , и увеличению доли тока, проходящей во 2-й электрод, ближе к оси симметрии (к середине КС).

Отказ от однородных удельных параметров (r_{01}, r_{02}, g_0) приводит к усложнению уравнений. В [1] записаны уравнения, получаемые из цепной модели КС,

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(x)}{dx} &= r_{02}I_2(x) - r_{01}I_1(x); \\ \frac{dI_2(x)}{dx} &= J_n; \\ \frac{dI_1(x)}{dx} &= -J_n, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $U(x), I_1(x), I_2(x)$ – поперечное напряжение на КС и токи 1- и 2-го электродов.

Теперь удельные параметры являются функциями координаты x , так что последующее дифференцирование 1-го уравнения в (8) приведет к более сложному результату:

$$\begin{aligned} \frac{d^2U(x)}{dx^2} - r_0(x)g_0(x)U(x) &= \\ = \frac{dr_{02}(x)}{dx}I_2(x) - \frac{dr_{01}(x)}{dx}I_1(x). \end{aligned}$$

Как и в [1,3], обозначим

$$r_0(x)g_0(x) = \gamma^2(x), \quad (9)$$

после чего

$$\frac{d^2U(x)}{dx^2} - \gamma^2(x)U(x) = f(x). \quad (10)$$

В [1] это уравнение для $U(x)$ было однородным. Теперь, во-первых, коэффициент $\gamma^2(x)$ есть функция x , и, во-вторых, имеется правая часть. В целом (10) – нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, аналитическое решение которого не найдено. Поэтому для его решения принят численный метод. Для этого сделаны переход к дискретной форме записи функций и на первом этапе некоторые упрощающие приближения. Начнем с упрощений.

Рассмотрим правую часть (10):

$$f(x) = \frac{dr_{02}(x)}{dx}I_2(x) - \frac{dr_{01}(x)}{dx}I_1(x).$$

Расчетная модель (рис.2) симметрична, поэтому возможно численным методом анализировать лишь одну половину (левую) КС, а правую учесть условием симметрии. Но для левой части $r_{01} = \text{const}$, так что слагаемое $\frac{dr_{01}(x)}{dx}I_1(x)$ из

рассмотрения выпадает. Далее, форму краевого среза 2-го электрода (рис.2) здесь выбираем такой, что на относительно большом участке изменения x от 0 $r_{02}(x)$ изменяется слабо и $\frac{dr_{02}(x)}{dx} \approx 0$. Поэтому на этом участке $f(x) \approx 0$.

Итак, всюду вблизи края электрода правая часть основного уравнения (10) принимается равной нулю. Несмотря на то, что далее $r_{02}(x)$ изменяется резко (из-за быстрого изменения сечения электрода), т.е. производная $\frac{dr_{02}(x)}{dx}$ может иметь большее значение, здесь тем не менее принимаем для всего интервала изменения x

$(0 \leq x \leq \frac{1}{2}L) f(x) = 0$. Ошибку, которую полу-

ним за счет этого допущения, будет проявляться в занижении плотности тока J_n в средней части КС и в завышении ее значений вблизи краев. Это означает, что если решение будет давать ожидаемое снижение плотности J_n у края КС, то этот результат будет свидетельствовать о заведомо правильном направлении действий по подбору формы электродов. Итак, рассматриваем, как и в [1], однородное уравнение

$$\frac{d^2U(x)}{dx^2} - \lambda^2(x)U(x) = 0, \quad (11)$$

но которое является нелинейным из-за $\gamma^2(x)$. Напомним, что $\gamma^2(x) = r_0(x)g_0(x) = [r_{01}(x) + r_{02}(x)]g_0(x)$.

Перейдем от непрерывных функций в (11) к дискретным. Для этого весь интервал $0 \leq x \leq L$

разбиваем на N равных частей $\Delta x = \frac{L}{N}$; текущее

значение координаты $x_i = \sum_0^i \Delta x = i\Delta x$. Этому значению соответствует напряжение U_i и вторая про-

изводная его [4]: $\frac{d^2U(x)}{dx^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2}(U_{i+1} - 2U_i + U_{i-1})$.

В результате (11) примет вид $\frac{1}{(\Delta x)^2}(U_{i+1} - 2U_i +$

$+ U_{i-1}) = \gamma^2(x_i)U_i$, что в конечном итоге даёт расчетную формулу

$$U_i = \frac{U_{i+1} + U_{i-1}}{2 + [\Delta x \gamma(x_i)]^2}. \quad (12)$$

Численный расчет удобнее всего вести относительно плотности тока $J_n(x_i)$, поскольку для

КС задаётся ток I . Переход от U_i к $J_n(x_i)$ прост: $J_n(x_i) = g_0 U_i$. В линейном варианте $g_0 = \text{const}$, так что умножение (12) на g_0 само уравнение не меняет. Единственным параметром в (12) является $\gamma(x_i)$ (для линейной задачи $\lambda = \sqrt{r_0 g_0} = \text{const}$).

Численный расчет оказалось возможным сделать в рамках известной системы MathCAD PLUS 7.0 PRO [5]. Правда, итерационный численный расчет требует создания программы с циклами, что для MathCAD'a оказалось плохо реализуемым. Поэтому от итерационной процедуры приходится отказаться и переводить подготовку к системе алгебраических уравнений с числом неизвестных, равным числу разбиения координаты x . Матрица коэффициентов при этом с процедурой решения "lsolve" оказывается вполне "по зубам" для компьютера даже средних достоинств (100 МГц, RAM – 32 Мб) при разбиении длины L на 100–200 интервалов. На компьютере РШ-900 с памятью 256 Мб решение такой системы уже с порядком 1000 занимает около 50 с. Однако просмотр многих вариантов решения убедил, что вполне достаточно остановиться на порядке равном 100, и лишь иногда для выяснения довольно "тонких" нюансов следует его увеличивать (не выше 200).

Итак, решается система уравнений, в которой переменные $J(x_i)$ и x_i связаны уравнением

$$J_i = \frac{J_{i+1} + J_{i-1}}{2 + [\Delta x \gamma(x_i)]^2}. \quad (13)$$

При изменении параметра γ получаем семейство кривых $J(x)$. Чтобы их можно было сравнивать, необходима нормировка. Напомним, что ток I сохраняет своё значение для всех вариантов; это означает контроль плотности J зна-

чением $I = \int_0^L J(x) dx = \text{const}$. Кроме того, прини-

маем значение плотности постоянным $J = 1$, как обычно при равномерном распределении ("короткий" контакт).

На рис.3 приведено семейство кривых $J_n(x)$ для ряда значений параметра γ , рассчитанных численным методом. По оси абсцисс отложено число шагов Δx при общем числе $N = 100$. По оси ординат отчет J идет от равномерного распределения, принятого за единицу. В целом эти кривые повторяют результаты аналитического решения. Здесь они понадобятся нам далее для сопоставлений при расчете нелинейной задачи.

Все варианты численного решения представ-

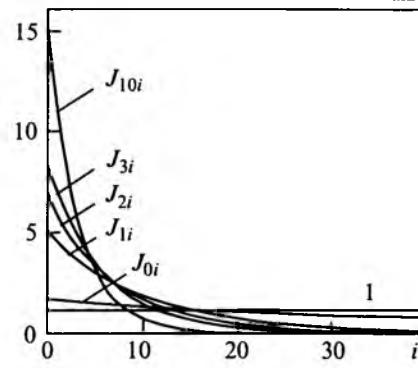


Рис.3.

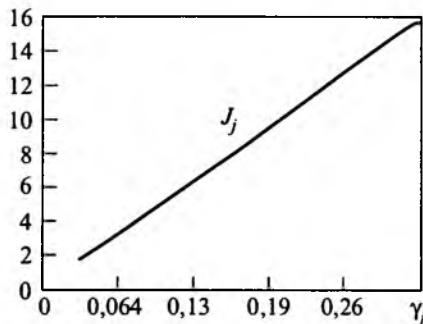


Рис.4.

ляются одной матрицей, каждый столбец которой соответствует выбранному значению параметра γ . На рис.4 показан график, построенный по данным первой строки этой матрицы, т.е. значения $J(0)$ – плотности тока на краю контакта в функции параметра (или нормированной длины L_r контактного соединения). Видно, что он соответствует прежнему выводу (6) о почти линейности этой функции (за исключением начальной части). Этот график наиболее ясно показывает кратность превышения равномерного уровня кривой плотности $J_n(0)$.

Возведением в квадрат значений $J_n(x_i)$ получаем кривые нормированной функции мощности $p_r(x_r)$. На рис.5 эти графики изображены лишь

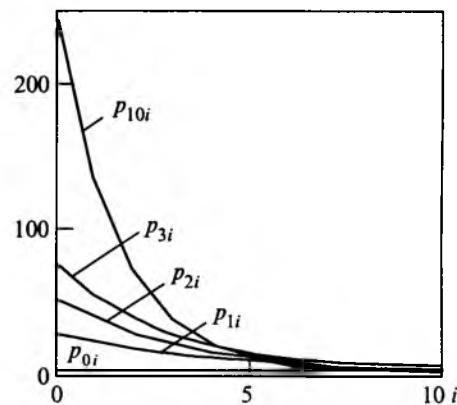


Рис.5.

для начального участка x , поскольку далее они не представляют интереса. Совершенно очевиден вывод о том, что наибольшей опасности подвергается контактная зона вблизи края КС. Именно это обстоятельство заставляет искать способы снижения этой мощности в краевой зоне. Предварительный пример качественно обсуждался выше с помощью рис.2. Займемся теперь более обоснованным анализом, хотя с оговоренными ранее допущениями. Впрочем, более точное решение не даёт принципиально иных в качественном отношении результатов, но требует преодоления дополнительных технических трудностей.

Целью настоящей работы является показать принципиальную возможность снижения мощности $p_r(0)$, тогда как конкретного конструктивного решения с вычислением размеров электродов, характеристик материала и пр. здесь делать не предполагалось. Поэтому за основу взято решение в виде (13) в нелинейном варианте, где изменяющиеся в функции x параметры КС учитываются в $\gamma(x)$.

Итак, вся длина L КС разбита на 100 равных частей. Изменение краевой части 2-го электрода (рис.2) учитывается в параметре $\gamma(x)$

$$[\Delta x \gamma(x)]^2 = \left[\frac{\Delta x}{x_0(x)} \right]^2 = f_1(x); \quad (14)$$

$f_1(x)$ – нормированный шаг разбиения, зависящий от координаты (функция x). Эта функция принята здесь в степенной форме

$$f_1(x) = f_1(0) + a k^\alpha, \quad (15)$$

где k – номер шага; a – константа, которой учитывается перепад $f_1(x)$ от начального значения $f_1(0)$ до конечного $f_1(x_k)$ (под конечным здесь считаем то, которое соответствует линейному варианту).

Тогда константа

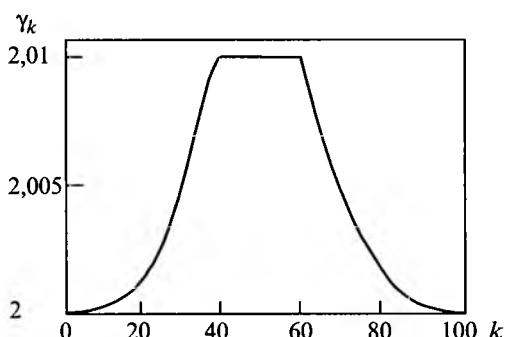


Рис.6.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

$$a = \frac{f_1(x_k) - f_1(0)}{k^\alpha}. \quad (16)$$

По достижении функцией $f_1(x)$ конечного значения далее она его сохраняет. Один из вариантов графика приведен на рис.6.

Чтобы решение имело безразмерную форму, принимаем, как обычно, уровень плотности тока

при равномерном распределении и $\frac{I}{L} = J = 1$ и

$I = 1 \cdot L$. Во всех вариантах при сохранении тока I неизменным должно выполняться равенство

$$\int_0^L J_r(x) dx = I = 1 \cdot L. \quad (17)$$

Для этого после решения общей системы вы-

числяется $\int_0^L J(x) dx = I_p$, далее – отношение

$\frac{I_p}{I} = k_c$, после чего все значения рассчитанной функции плотности тока уменьшаются в k_c раз,

что и даёт $J_r(x) = \frac{1}{k_c} J_p(x)$.

На рис.7 показано семейство кривых $J_r(x)$. Параметром здесь могут быть взяты a и α (см.(15)). Изменения показателя степени α в окончательном итоге менее интересно, поэтому здесь принято $\alpha = 8$, хотя для подробного анализа при выборе конструкции КС рассматривать результаты изменения α следует. На рис.7 параметром является l (рис.2) – длина краевой части электрода. Понятно, что при стремлении $l \rightarrow 0$ результат должен приближаться к линейному варианту (рис.3). Поэтому из рассмотрения рис.7 следует, что чем больше отклонение от линейного варианта (с увеличением l), тем меньше нагрузка краевой части контакта. Сравнивать следует по значениям плотности тока в начальной точке $J_r(0)$.

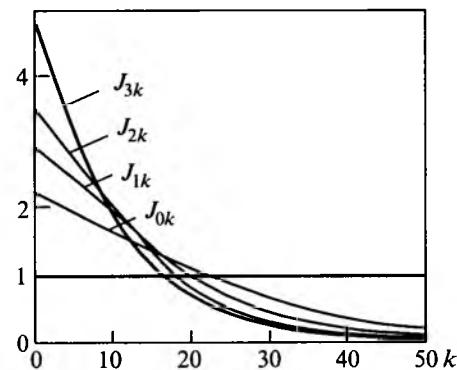


Рис.7.

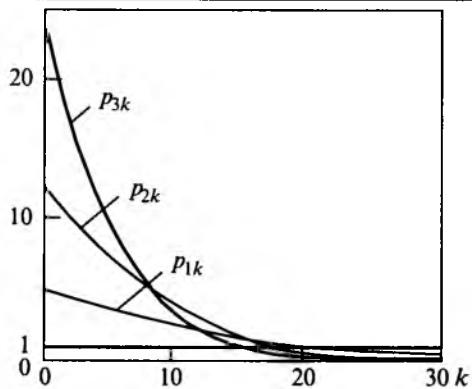


Рис.8.

Здесь надо сделать замечание о критерии сравнения. Ранее, в линейном варианте (рис.3) при сравнении длины L КС мы изменяли $x_0 = 1/y$ (длину растекания) или нормированную длину КС. Получали, что чем меньше x_0 , тем больше начальное значение плотности тока $J_r(0)$. В нелинейном варианте приходится брать за основу сравнения только физическую длину L КС, так как теперь $x_0(x) = 1/r(x)$ – длина растекания является функцией координаты. Семейство кривых рис.7 рассчитано для КС одной длины с нормированием током. Делать сравнительные оценки с рис.3 можно только по одной (или почти одной) величине – начальной плотности $J_r(0)$.

На рис.8 прямым пересчетом функций рис.7 получено семейство кривых плотности мощности $p_r(x)$. Эти результаты сравниваются с $p_r(x)$ линейного варианта (рис.5). Видно, что уменьшение плотности мощности на краю КС впол-

не реально.

В предлагаемой работе сделана попытка показать, что вполне реально подбором параметров КС снизить плотность мощности вблизи краев КС. Подбор и оптимизация параметров КС могут быть задачей для разработчиков конкретных конструкций. Следует отметить, что эта работа может быть выполнена лишь численными методами анализа. В ней необходимой частью должны стать, во-первых, анализ зависимости поперечной проводимости g_0 (в первую очередь в линейном варианте, т.е. для КС с однородными параметрами); во-вторых, соотношение между параметрами r_0 , g_0 и граничными условиями (перераспределение токов между электродами) при появлении несимметрии в КС и далее – при нелинейности $r_0(x)$ и $g_0(x)$.

Эта статья является логическим завершением предыдущих [1,3], в которых был проведен анализ линейной задачи и выявлены неизвестные ранее зависимости распределения плотностей тока и мощности в КС.

Список литературы

1. Юркевич В.М. Основы электрической теории контактных соединений//Электротехника. 1999. № 2.
2. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
3. Юркевич В.М. Электрическое сопротивление и энергетические соотношения для контактного соединения// Электротехника. 1999. № 8.
4. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1965.
5. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. М.: СК ПРЕСС, 1998.

НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Электромеханика Солнечной системы¹

КОПЫЛОВ И.П.

МЭИ

Гелиоэлектромеханика рассматривается со стороны наблюдателя (системы координат), расположенного на магнитном поле Солнца.

Среди читателей журнала вряд ли найдется тот, кто сомневается, что Солнце является источником жизни на Земле, а все планеты Солнечной системы врачаются вокруг Солнца. Однако немногие задумывались – почему так упор-

но миллионы лет планеты врачаются на своих орbitах? Какова роль магнитных полей Солнца и планет и откуда берется энергия, поддерживающая в устойчивом состоянии Солнечную систему в течение миллиардов лет?

Три закона Иоганна Кеплера (1571–1630 гг.) получившие обоснование из закона всемирного

¹ Печатается в порядке обсуждения.

тяготения Исаака Ньютона (1643–1727 гг.) и составляющие фундамент гелиоцентристской системы Николы Коперника (1473–1543 гг.) не дают ответа на эти и многие другие вопросы. На вопросы, на которые не может дать ответа механика, дает ответ электромеханика. Электромеханика, базирующаяся на трех фундаментальных направлениях физики – механике, электродинамике и теплофизике, обладает большими возможностями и дает ответы или подходы к решению многих астрофизических проблем [1].

Космическая электромеханика, как наука, сформировалась в середине прошлого века на базе поразительных успехов технической земной электромеханики. За 100 лет электромеханические преобразователи – электрические машины совершили техническую революцию в энергетике и промышленности. Производство электроэнергии на планете стало глобальным, достигнув 0,1 % всей энергии, получаемой Землей от Солнца.

На базе успехов космической электромеханики около 20 лет тому назад появились первые работы по геоэлектромеханике – электромеханике планеты Земля. Геоэлектромеханика получила признание или молчаливое согласие большинства знакомых с нею специалистов [2]. Ее логическим продолжением является гелиоэлектромеханика – электромеханика Солнечной системы [3, 4].

Основу существования и энергетику всех элементов Солнечной системы определяет звезда – Солнце. Солнце – основной источник энергии, его масса в 750 раз больше массы всех планет вместе взятых. Диаметр Солнца в 109 раз больше диаметра Земли. Объем Солнца равен 1301000 объемов Земли, а масса в 333400 раз больше, чем масса Земли. При этом плотность Солнца составляет 0,26 плотности Земли. Температура на поверхности светила равна 6000°С. Поверхность Солнца вращается неравномерно. На экваторе период вращения относительно звезд равен 25 сут.

Солнце является рядовой звездой нашей Галактики «Млечный путь», в которой около 150 млрд. звезд. Возможно в Галактике только в Солнечной системе существует разумная жизнь и она является родиной человечества. Поэтому Солнце – самая выдающаяся звезда из всех миллиардов звезд [3].

Внутреннее строение Солнца значительно сложнее нашей планеты, о строение которой мы, находясь на ее поверхности, знаем не так уж и много. Наблюдая за Солнцем, мы видим его

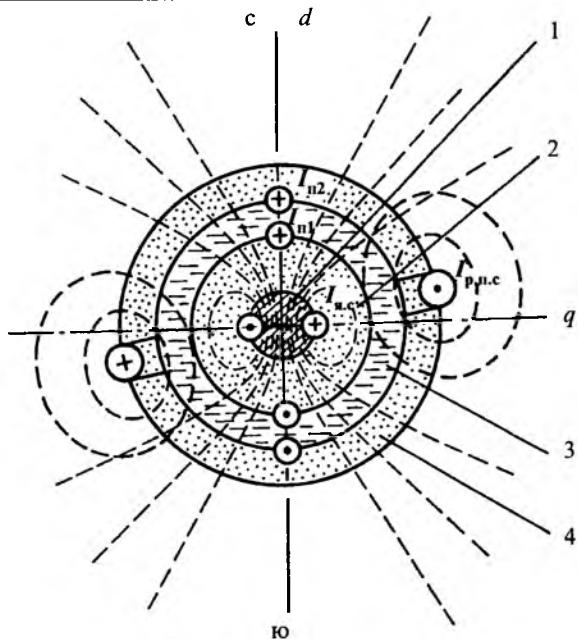


Рис.1. Электромеханическая модель Солнца

хромосферу, излучающую электромагнитные волны высоких частот (в основном, теплового и светового излучения). А что творится внутри можно представить благодаря достоверным гипотезам и косвенным данным.

С точки зрения электромеханики в самом упрощенном виде Солнце можно представить как сферу, имеющую твердую центральную часть (1), окруженную жидкой (2) и газообразной фазой (3) (рис.1). Твердое ядро и жидкая часть Солнца находятся под огромным давлением при температуре в несколько тысяч градусов.

Между газообразной фазой и космосом находится хромосфера (4), излучающая световые и тепловые волны [5].

Магнитное поле Солнца создается токами ядра Солнца $I_{я.c}$, протекающими на границе твердой и жидкой частей, токами радиационных поясов Солнца $I_{p.p.c}$, замыкающимися на границе Солнца и космоса, и поперечными токами в жидкой и газообразной фазах, которые можно привести к эквивалентным поперечным токам $I_{п1}$ и $I_{п2}$ (см.рис.1).

Магнитное поле Солнца для наблюдателя, находящегося вне Солнечной системы, представит в виде диска неправильной формы (рис.2). Его максимальная индукция сосредоточена в ядре Солнца в плоскости окружности токов $I_{o.c}$. Если на поверхности индукция магнитного поля равна примерно 50–60 Гс, то беря отношение поверхности светила к сечению его ядра, можно определить максимальную индукцию в ядре, которая достигает 1–1,2 Тл. По мере удаления

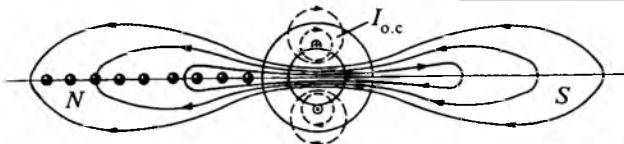


Рис.2. Магнитное поле Солнца

от поверхности Солнца индукция в Солнечной системе убывает и часть силовых линий уходит в бесконечность, образуя единое магнитное поле с Галактикой.

Электромеханическая система Солнца (рис. 3) отличается от системы Земли тем, что у планет внешняя поверхность твердая, а на Солнце внешняя поверхность образует хромосферу, имеющую высокую температуру и являющуюся источником мощного высокочастотного излучения. Хромосфера излучает свет, тепло, СВЧ и радиоволны. Электромеханическая система Солнца состоит из МГД-генератора, получающего энергию из Галактики (P_g, f_g), МГД-двигателя (униполярного насоса) и генератора, излучающего энергию ультразвуковой частоты в солнечную систему ($P_{c.c.}, f_{c.c.}$). К этому генератору можно отнести мощность и высокой частоты ($P_{v.u.}, f_{v.u.}$) [4, 7].

Таким образом, Солнце является преобразователем и генератором ультразвуковой частоты Галактики в энергию Солнечной системы с периодом 23,8 года и в мощность преобразователя высокой частоты от 10^8 – 10^{16} Гц. Если $P_{c.c.}, f_{c.c.}$ вырабатываются благодаря МГД-двигателю, то $P_{v.u.}, f_{v.u.}$ излучается синхронно работающими бесчисленным множеством мельчайших молекулярных генераторов.

Жидкая и газообразная фазы Солнца состоят из бесчисленного числа слоев и можно считать, что электромеханическая модель Солнца имеет ядро и n слоев жидкого и газообразного вещества [6].

Солнце состоит из статора (ядра) и множества роторов – сфер жидкой и газообразной ча-

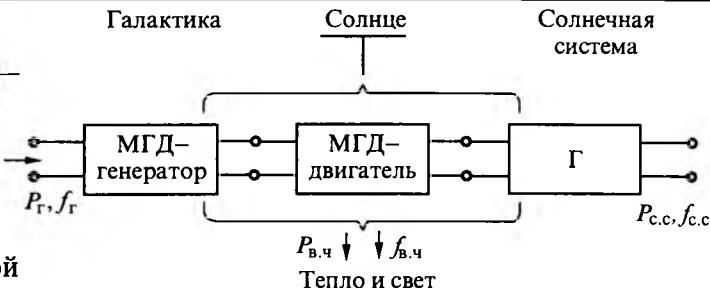


Рис.3. Электромеханическая модель Солнца

сти Солнца. Из уравнений электромеханики для такой системы следует, что ядро имеет частоту вращения по отношению к жидкой и газообразной фазам, стремящуюся к нулю [1]. Ядро Солнца вместе с магнитным полем Солнечной системы как бы вязнет и медленно вращается относительно жидкой и газообразной фазы.

Электромагнитный момент ядра Солнца и магнитного поля Солнечной системы уравновешивается моментом жидкой и газообразной фазы Солнца и электромагнитным моментом, эквивалентным высокочастотному излучению хромосферы (рис. 3).

Рассмотренная электромеханическая система имеет отношение не только к нашей звезде – так должны быть устроены почти все звезды во Вселенной.

Солнечная система состоит из девяти больших планет, имеющих 31 спутник и множество малых планет и астероидов, со своими номерами и названиями. Самая крупная малая планета имеет поперечник 770 км, а самые мелкие – диаметром около одного километра. Траектории малых планет расположены между Марсом и Юпитером. Пять планет Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн известны с глубокой древности. Уран открыт в 1781 г. В.Гершелем. Нептун открыт в 1846 г. И.Галле на основании вычислений У.Леверье. Плутон обнаружен в 1930 г. американской обсерваторией имени Ловелла.

В таблице приведены некоторые данные планет солнечной системы.

| Планеты | Расстояние от Солнца, | | Масса по отношению к Земле | Освещен- ность, отн. ед. | Время оборота вокруг Солнца | Время оборота вокруг оси | Номер гармоники |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| | млн. км | относительно Земли | | | | | |
| Меркурий | 58 | 0,4 | 0,04 | 7 | 88 сут | 88 сут | 90 |
| Венера | 108 | 0,7 | 0,81 | 2 | 224 сут | 369 сут | 36 |
| Земля | 150 | 1 | 1 | 1 | 1 год | 23 ч 56 мин | 22 |
| Марс | 228 | 1,5 | 0,11 | 1/2 | 1,9 года | 24 ч 37 мин | 12 |
| Юпитер | 778 | 5,2 | 318 | 1/27 | 11,9 года | 9 ч 50 мин | 2 |
| Сатурн | 1426 | 9,5 | 95 | 1/90 | 29,5 года | 10 ч 14 мин | 2 |
| Уран | 2869 | 19,2 | 14,6 | 1/400 | 84 года | 10 ч 48 мин | 4 |
| Нептун | 4496 | 30,1 | 19,3 | 1/900 | 164,8 года | 15 ч 48 мин | 8 |
| Плутон | 5929 | 39,6 | Нет данных | 1/1600 | 249,7 года | Нет данных | 12 |

Пределы Солнечной системы определяются границами распространения магнитного поля Солнца, которое плавно переходит в магнитное поле Галактики. Поэтому четко границы Солнечной системы определить нельзя.

Постичь законы движения планет Солнечной системы ученые пытались с доисторических времен. В настоящее время гелиоцентристская система не может ответить на возникающие более глубокие вопросы поведения планет. Поэтому вполне оправдано применить законы космической электромеханики к планетам Солнечной системы, считая Солнечную систему электромеханической системой.

Период вращения магнитного поля Солнца определяется периодичностью появления солнечных пятен и равен 22 годам. Одиннадцатилетний цикл солнечной активности П.Л. Чижевского подтверждается многолетними наблюдениями и принят большинством исследователей в различных сферах деятельности, как основной в жизни Солнечной системы. Нам остается только связать его с полуциклом вращающегося магнитного поля Солнца.

Вращающееся магнитное поле Солнца создается круговыми токами Солнца $I_{\text{я.с.}}$. Его можно представить в самом простом виде как вращение сферического постоянного магнита.

Но токи, которые создают магнитное поле, только в первом приближении можно считать синусоидальными. В действительности они не-синусоидальные и содержат высшие и низшие гармоники. При разложении несинусоидального магнитного поля Солнца в гармонический ряд в бесконечном спектре полей будут преобладать четные гармоники, так как в магнитном поле Солнца преобладает мощная постоянная составляющая.

Рассматривая расположение и движение планет с позиций классической электромеханики поместим наблюдателя и вместе с ним систему координат на ротор – ядро Солнца или иначе на связанное с ним магнитное поле Солнца. Затормозив эту систему, будем рассматривать Солнечную систему со стороны магнитного поля Солнца. Такая система координат широко используется в электромеханике и получила название системы координат d, q [1].

Зная период вращения магнитного поля Солнца и периоды вращения планет вокруг Солнца (в магнитном поле Солнца) получим гелиоэлектромеханическую модель Солнечной системы (рис. 4).

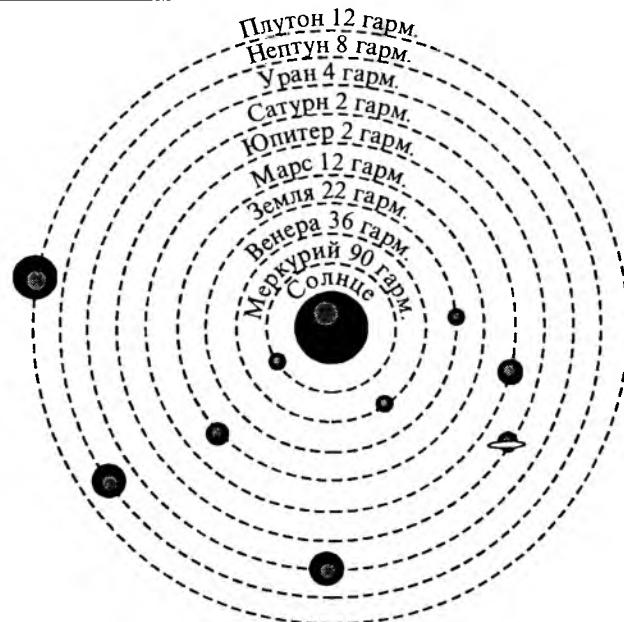


Рис.4. Гелиоэлектромеханическая модель

В этой модели планеты Солнечной системы располагаются на высших и низших гармонических магнитного поля Солнца. Так, наша Земля за один оборот магнитного поля успевает 22 раза повернуться вокруг Солнца, что соответствует 22-й гармонике магнитного поля Солнца. Ближайшая к Солнцу планета Меркурий имеет время одного оборота вокруг Солнца 88 сут и располагается на 90-й гармонике магнитного поля Солнца, а далекий Нептун один оборот вокруг Солнца совершает за 164,8 года, располагаясь, соответственно на 8-й субгармонике (низшей гармонике). Гигант Юпитер совершает один оборот за 11,9 года и находится на 2-й гармонике – первой среди четных гармоник.

Кроме Сатурна погрешности для всех планет не превышают 5–8%. Если учесть, что период солнечной активности колеблется в интервале 20–24 года и не учитывается влияние гиродинов самих планет, гелиоэлектромеханическая модель имеет право на существование.

Гелиоэлектромеханическая модель четко объясняет расположение планет по их массе. Большие планеты занимают положение, где гармоники магнитного поля Солнца имеют наибольшие амплитуды (Юпитер – на 2-й высшей, Сатурн – 2-й низшей гармонике).

Земля, как и все планеты, является электромеханической системой, состоящей из МГД-генератора и униполярного двигателя с жидким ротором, совмещенных в одной сферической электрической машине [2]. Отличие электрической машины планеты от гиродинов летательных

аппаратов только в том, что у гиродина планеты жидкий внешний ротор и его контуры совмещены с контурами МГД-генератора. Отличие гелиоэлектромеханической системы от многороторной системы земной электромеханики только в том, что в гелиоэлектромеханической модели вместо роторов вращаются гиродины в трехмерном пространстве. Гелиоэлектромеханическая модель является развитием гелиоцентрической системы, внося в ее механические основы электродинамические представления.

Из всех планет Солнечной системы только Сатурн имеет кольца и у него наибольшая погрешность в гелиоэлектромеханической модели. Это можно объяснить тем, что он живет в несинхронном (асинхронном) режиме, имея скольжение (относительную скорость по отношению к скорости магнитного поля Солнца) примерно 25–30%. Можно высказать предположение, что кольца Сатурна – это короткозамкнутые обмотки обычного асинхронного двигателя.

Гелиоэлектромеханика является развитием геоэлектромеханики. Гео- и гелиоэлектромеханика составляют основную базу гипотезы электромагнитной Вселенной [2–7], краеугольным камнем которой является обмен энергией между астрофизическими объектами на ультразвуковых, гравитационных частотах.

Гелиоэлектромеханика вносит важный вклад в формулирование космического мировоззрения [2–4, 6, 7].

Солнечная система движется в Галактике по винтовой спирали. Ее эволюция и развитие нашей цивилизации определяются положением нашей звезды в Галактике. Галактические циклы определяют глобальные события на Земле [2, 3]. Спираль жизни имеет большие галактичес-

кие циклы в 200–220 млн. лет, которые определяют геологические события – Великие оледенения, смену полюсов, изменения биосфера, очертания материков. Малые циклы длительностью в 26 000 лет связаны с глобальными изменениями климата, сменой положения теплых и холодных зон, изменением циркуляции океанических вод и атмосферы. Эти события получили название Всемирного потопа, которые случаются каждые 13 000 лет, т.е. в каждом полуцикле [2].

Заключение

Земная цивилизация вот уже более 100 лет переживает активную часть глобального переходного процесса. Гелиоэлектромеханика дает наиболее достоверную модель развития глобальных энергетических событий, которые будут определять жизнь на планете в ближайшем и отдаленном будущем, объясняет причины глобального изменения климата и других глобальных энергетических событий, которые определяют geopolитику государства.

Список литературы.

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин.: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2001.
2. Копылов И.П. Геоэлектромеханика. М.: Изд-во МЭИ, 2000.
3. Копылов И.П. Электромагнитная Вселенная. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
4. Копылов И.П. Гелиоэлектромеханика//Изв. РАН. Сер. Энергетика. 2001. № 4.
5. Копылов И.П. Электромеханический преобразователь – звезда Солнце//Электротехника. 1996. № 6.
6. Копылов И.П. Глобальный проект XX века//Электротехничество и жизнь. 2000. № 6.
7. Копылов И.П. Философия «большого взрыва»//Электротехничество и жизнь. 2001. № 2.

ИСТОЧНИКИ ТОКА

Изменение напряжения во время разряда герметизированного свинцового аккумулятора

БАЮНОВ В.В., ПОДАЛИНСКИЙ Ю.А., БАРСУКОВА М.М., КОЛИКОВА Г.А.

ОАО "НИИИ "Источник" (г. Санкт-Петербург)

Показана возможность определения изменения напряжения в различных режимах разряда для проектируемых герметизированных свинцовых аккумуляторов.

Характерной особенностью развития свинцовых герметизированных аккумуляторов в посle-

днее десятилетие является увеличение их номинальной емкости. Отечественной промышленно-

Вологодская областная универсальная научная библиотека

стю выпускаются аккумуляторы емкостью от 6 до 200 А·ч. Ведутся разработки стационарных герметизированных свинцовых аккумуляторов емкостью до 3000 А·ч и более. Поэтому при проектировании практический интерес представляет возможность определения основной характеристики аккумулятора – изменения напряжения U (В) во время разрядов различными режимами в зависимости от снятой емкости Q (А·ч) или времени разряда τ :

$$U = f(Q), U = f(\tau) \text{ при } I = \text{const.} \quad (1)$$

В герметизированных аккумуляторах применяется иммобилизованный электролит. При одном способе иммобилизации электролита для его загущения используется селикагель (SiO_2) – гелеобразный электролит. В настоящее время для иммобилизации электролита чаще используется сепаратор из стекловолокна с высокой объемной пористостью и хорошей смачиваемостью в растворе серной кислоты – абсорбированный электролит.

Классические зависимости изменения ЭДС свинцового аккумулятора от плотности электролита (Вайнел, Дасоян) даны для одинаковой плотности электролита в баке и в порах активных масс электродов. Известно, что в процессе разряда аккумуляторов плотность электролита в порах электродов становится меньше, чем в баке. В [1] определена разность плотностей электролита ΔP в порах положительного и отрицательного электрода и в баке стартерного аккумулятора в конце пятиминутного 10- и 20-часового разряда. Данные по изменению плотности электролита в порах электродов в процессе разряда отсутствуют. Однако ЭДС аккумулятора определяется плотностью электролита в порах электродов, а не в баке или в сепарации. Это подтверждается и отношением поверхности пор к геометрической поверхности электродов. Для отрицательного электрода свинцового аккумулятора это отношение составляет 1300 [2].

В связи с различными условиями работы электродов в свинцовых аккумуляторах с жидким электролитом и в герметизированных аккумуляторах с иммобилизованным электролитом [3] при проектировании последних возникает необходимость определения разности плотностей электролита в сепарации и в порах активных масс электродов.

Для получения экспериментальных данных исследования проводились на герметизированных свинцовых аккумуляторах СГ-6 с абсорбированным электролитом плотностью 1,280 г·см⁻³

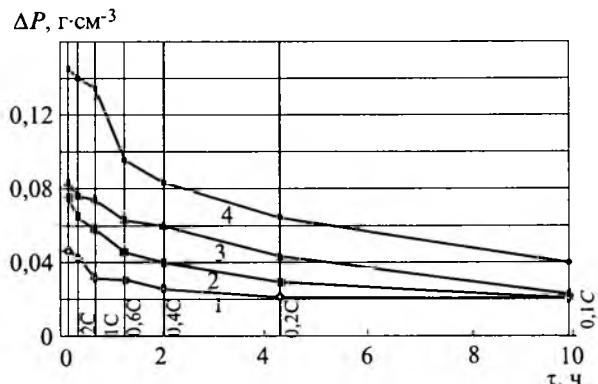


Рис.1. Изменение разности плотностей электролита в сепарации и в порах электродов ΔP (г·см⁻³) аккумулятора СГ-6 в зависимости от длительности разряда τ (ч) и степени разряженности (%):

1 – 25; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100

при 20°C. Замеры НРЦ и напряжения U проводились во время разряда аккумуляторов токами 0,1C; 0,2C; 0,4C; 0,6C; 1C; 2C; 3C (C – номинальная емкость 20-часового разряда) после снятия 25, 50, 75, 100% емкости путем кратковременного разрыва цепи и последующего включения на разряд. Разряды заканчивались в соответствии с технической документацией при конечном напряжении U_k , равном соответственно 1,75; 1,70; 1,65; 1,60; 1,55; 1,45; 1,25 В.

Плотность электролита в порах определялась по данным НРЦ, а в сепарации расчетным путем в зависимости от снятой емкости. Результаты исследований и расчетов (рис.1) показывают, что на каждом режиме разряда разность плотностей электролита в сепарации и в порах электродов ΔP возрастает с увеличением степени разряженности аккумулятора от 25 до 100%. При одной и той же степени разряженности разность плотностей электролита ΔP возрастает с увеличением тока разряда.

Полученные экспериментальные данные позволили определить сопротивление поляризации аккумулятора R_p в рассмотренных режимах разряда после снятия 25, 50, 75, 100% емкости (рис.2). Сопротивление поляризации возрастает с увеличением длительности разряда и с повышением степени разряженности аккумулятора на всех режимах разряда. При степени разряженности 25 и 50% различие R_p незначительное.

Полученные данные по разности плотностей электролита в сепарации и в порах электродов и по сопротивлению поляризации (рис.1, 2) позволяют рассчитать напряжение проектируемого герметизированного свинцового аккумулятора с абсорбированным электролитом для всех

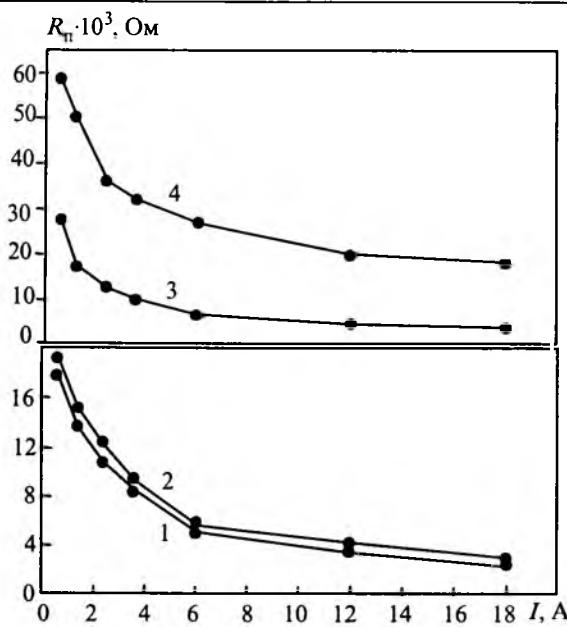


Рис.2. Изменение сопротивления поляризации R_p (Ом) аккумулятора СГ-6 в зависимости от тока разряда I (А) и степени разряженности (%):
1 – 25; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100

| Ток разряда, А | Напряжение, В | | | | | | | | | |
|----------------|--------------------------|-------|------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | Степень разряженности, % | | | | | | | | | |
| | Эксперимент | | | | | Расчет | | | | |
| | 1,5-3 | 25 | 50 | 75 | 100 | 1,5-3 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| 1(0,1C) | 2,08 | 2,050 | 1,99 | 1,92 | 1,75 | 2,07 | 2,044 | 1,993 | 1,931 | 1,761 |
| 2(0,2C) | 2,07 | 2,040 | 1,98 | 1,91 | 1,70 | 2,06 | 2,036 | 1,980 | 1,916 | 1,680 |
| 4(0,4C) | 2,04 | 2,010 | 1,96 | 1,94 | 1,65 | 2,01 | 2,014 | 1,961 | 1,940 | 1,697 |
| 6(0,6C) | 2,02 | 2,010 | 1,96 | 1,91 | 1,60 | 2,01 | 2,000 | 1,967 | 1,900 | 1,680 |
| 10(1C) | 1,98 | 1,990 | 1,95 | 1,89 | 1,55 | 1,99 | 2,015 | 1,960 | 1,900 | 1,530 |
| 20(2C) | 1,95 | 1,950 | 1,90 | 1,83 | 1,45 | 1,96 | 1,980 | 1,920 | 1,820 | 1,466 |
| 30(3C) | 1,91 | 1,900 | 1,84 | 1,77 | 1,25 | 1,92 | 1,939 | 1,886 | 1,850 | 1,380 |

требуемых режимов разряда в следующей последовательности:

- определяется расчетом плотность электролита в сепарации для различной степени разряженности P_c ;
- определяется плотность электролита в порах электродов

$$P_n = P_c - \Delta P \quad (2)$$

и соответствующее этой плотности НРЦ;

- по известным зависимостям определяется активное сопротивление аккумулятора R_a , состоящее из сопротивления активных масс, токо-

тводов, контактного сопротивления между токоотводом и активной массой электродов, сопротивления электролита в порах и сепарации, сопротивления полюсов;

– определяется сопротивление поляризации проектируемого аккумулятора $R_{n.p}$ по зависимости

$$R_{n.p} = R_p \frac{S_p}{S_{n.p}}, \quad (3)$$

где S_p , $S_{n.p}$ – площадь поверхности положительного электрода аккумулятора СГ-6 и проектируемого аккумулятора;

– определяется напряжение аккумулятора U для рассматриваемого разряда током I при различных степенях разряженности:

$$U = E - I(R_a + R_{n.p}). \quad (4)$$

С использованием данных рис.1 и 2 определены зависимости напряжения U от длительности разряда τ для герметизированного свинцово-

вого аккумулятора с абсорбированным электролитом СГ-10. В таблице представлены расчетные и экспериментальные данные для аккумулятора СГ-10.

Различие между сравниваемыми значениями составляет в основном 0–2%, в отдельных случаях 3–10%. Таким образом, зависимости напряжения от длительности разряда

для различных режимов по экспериментальным данным и по расчетным данным практически совпадают.

Список литературы

1. Бессонова Т.М., Животинский Л.Б., Марасанова А.Н. Изменение структуры пористых пластин свинцовых аккумуляторов при работе//Сборник работ по химическим источникам тока. Вып.10. Л.: Энергия, 1975. С. 140–144.
2. Дасоян М.А. Химические источники тока: Справочное пособие. Л.: Энергия, 1969.
3. Агуф И.А., Дасоян М.А., Лызлов Н.Ю., Григлюк Н.К. Современное состояние и перспективы развития научных исследований в области герметичного свинцового аккумулятора. М.: Информэлектро, 1984.

Влияние температуры на электрические характеристики герметизированных свинцовых аккумуляторов с абсорбированным электролитом

КОЛИКОВА Г.А., БАРСУКОВА М.М.

ОАО "НИАИ "Источник" (г. Санкт-Петербург)

Исследовано влияние температуры в диапазоне от -50 до $+45^{\circ}\text{C}$ на емкостные характеристики герметизированных свинцовых аккумуляторов с абсорбированным электролитом при токах разряда от $0,05C_{20}$ до $2C_{20}$ А.

Производство свинцово-кислотных батарей во всем мире занимает ведущее место среди химических источников тока (ХИТ). На них долю приходится примерно 85% общего количества ХИТ. В промышленно развитых странах высокими темпами растет производство герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторов (ГСА) емкостью от долей до нескольких тысяч ампер-часов, в том числе стационарного использования.

В ОАО "НИАИ "Источник" разработан ряд ГСА и батарей, предназначенных для автономного питания электронной аппаратуры, электроснабжения приборов индивидуального пользования, бытовой видеотехники, различных переносных приборов, репортажных, телевизионных камер и других целей. Теоретические основы герметизации свинцового аккумулятора были представлены в [1,2].

Свинцовые герметизированные аккумуляторы и батареи не требуют обслуживания, обладают низким саморазрядом, работоспособны в любом положении в пространстве. Они имеют более высокое напряжение (2 В) по сравнению с герметичными никель-кадмиевыми аккумуляторами (1,2 В) и более низкую (в 4–5 раз) стоимость.

Одной из характерных особенностей герметизированных свинцовых аккумуляторов является использование в них загущенного или абсорбированного электролита, позволяющего реализовать кислородный цикл внутри аккумулятора. Сепаратор из микропористого стекловолокна с абсорбированным электролитом плотно прилегает к поверхности электродов, что позволяет выделяющемуся на положительном электроде кислороду контактировать с отрицательным электродом, на котором происходит его рекомбинация. Уменьшение газовыделения в ГСА достигается также за счет применения материалов с высоким перенапряжением выделения водорода, чистоты исходных материалов, оптимального соотношения активных масс и

ограничения зарядного напряжения. Поскольку полная герметизация свинцового аккумулятора невозможна, для сбрасывания избыточного давления в конструкции ГСА предусмотрен клапан ниппельного типа.

Согласно литературным данным герметизированные свинцовые аккумуляторы работоспособны в широком интервале температур, в том числе отрицательных. Поскольку для отечественных ГСА данные о работоспособности в области отрицательных температур до настоящего времени отсутствовали, представляло интерес исследовать влияние температуры на электрические характеристики аккумуляторов при различных режимах разряда.

В данной работе изучалось влияние температуры на электрические характеристики герметизированных свинцовых аккумуляторов СГ-6 и СГ-10 в интервале температур от -50 до $+45^{\circ}\text{C}$ при токах разряда от $0,05C_{20}$ до $2C_{20}$ А (C_{20} – номинальная емкость 20-часового разряда).

Предварительно было установлено, что по разрядным характеристикам разработанная в институте герметизированная батарея 6СГ-10 (10 – номинальная емкость, А·ч) соответствует зарубежным аналогам (рис.1).

Аккумуляторы СГ-6 и СГ-10 были изготовлены по технологии, разработанной в институ-

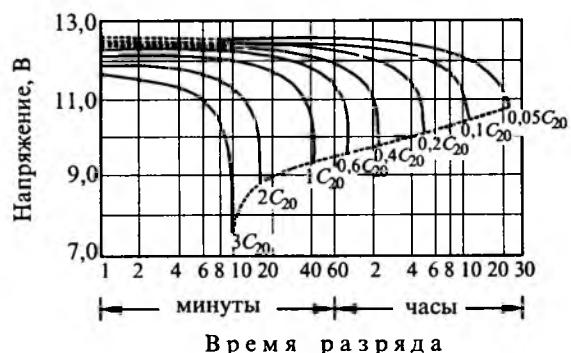


Рис.1. Разрядные кривые свинцовой герметизированной батареи 6СГ-10 при температуре 25°C и токах разряда от $0,05C_{20}$ до $3C_{20}$ А

те. Положительные токоотводы были отлиты из малосурьмянистого свинцово-кадмивого сплава (2,5% мас. Sb, 1,5% мас. Cd), отрицательные – из свинцово-кальциевого сплава (0,08% мас. Ca). В качестве сепаратора использовалось микропористое стекловолокно, разработанное в отделе сепарационных материалов института. Масса аккумуляторов СГ-6 с электролитом составляет 0,4 кг, аккумуляторов СГ-10 – 0,75 кг, габариты 40,5×36×100 и 72×37×104 мм соответственно. Из аккумуляторов СГ-6 и СГ-10 могут быть скомплектованы батареи с напряжением 4, 6, 12, ..., 48 В.

На рис.2 представлены кривые изменения напряжения U (В) аккумулятора СГ-10 в процессе разряда током $I = 2$ А ($0,2C_{20}$ А) при различной температуре. Как и следовало ожидать, чем ниже температура электролита, тем меньше разрядное напряжение и емкость аккумулятора. Наблюдаемое при снижении температуры уменьшение разрядного напряжения объясняется одновременным увеличением омической и поляризационной составляющей внутреннего сопротивления аккумулятора, которые возрастают с понижением температуры аналогично аккумуляторам с жидким электролитом [3]. Кроме того, снижение удельной электропроводности и повышение вязкости электролита при снижении температуры приводит к уменьшению коэффициента использования активной массы, что является причиной уменьшения емкости аккумулятора [4].

Следует обратить внимание на аномалию в ходе разрядной кривой 1 при температуре -30°C , когда в течение первой половины разряда наблюдается более высокое напряжение, чем при температуре -20°C (кривая 2 на рис.2). Известно, что уменьшение плотности электролита в процессе разряда приводит к повышению температуры его замерзания. По данным [5] в герметизированных аккумуляторах замерзший электролит представляет собой смесь кристал-

лов льда и жидкой фазы кислоты. Поскольку образующаяся в зоне реакции разряда слабая кислота замерзает в виде отдельных кристалликов льда, плотность жидкой фазы электролита повышается, вызывая увеличение напряжения, что и наблюдается на разрядной кривой 1 при -30°C (рис.2). В конце разряда при температуре -20°C и -30°C наблюдается более резкое падение напряжения, обусловленное ростом сопротивления за счет концентрационной поляризации и, возможно, частичной "ледяной" пассивации поверхности электродов.

Параметры разряда аккумуляторов СГ-6 при различной температуре T и токах разряда I от 0,3 до 12,0 А [$(0,05C_{20} - 2C_{20})\text{A}$] представлены в табл.1. Приведенные данные свидетельствуют о том, что значение падения напряжения аккумулятора в начале разряда ΔU_n возрастает как с увеличением тока разряда, так и с понижением температуры аналогично аккумуляторам с жидким электролитом [3]. Емкость C (А·ч и %) герметизированных аккумуляторов также уменьшается с ростом разрядного тока и увеличивается с повышением температуры разряда. При снижении температуры, особенно при переходе в область отрицательных температур, наблюдается существенное уменьшение емкости. Так, при токе разряда 1,2 А понижение температуры от $+20$ до -30°C приводит к уменьшению емкости C (%) аккумулятора СГ-6 в 2 раза, при токе 6 А – в 3 раза, а при токе 12 А – почти в 4 раза (табл.1).

Характеристики аккумуляторов СГ-6, представленные в табл.1, в том числе среднее напряжение пологой части кривой U_{cp} (В), могут быть использованы при выборе источника питания для различных приборов и электронной аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации.

Графическая зависимость емкости C (%) герметизированных свинцовых аккумуляторов СГ-6 от температуры T ($^{\circ}\text{C}$) при различных токах разряда I (А) и конечном напряжении $U_k = 1,75$ В представлена на рис.3. Эта зависимость не является линейной, особенно при малых скоростях разряда. На кривых можно условно выделить три участка с различным углом наклона: от -30 до 0°C ; от 0 до $+20^{\circ}\text{C}$ и от $+20$ до $+45^{\circ}\text{C}$. Максимальное влияние на емкость оказывают отрицательные температуры: температурный коэффициент емкости (изменение емкости при изменении температуры на 1°C) повышается от 0,7% для 10-минутного разряда (кривая 4) до 1,1% для 20-часового разряда (кривая 1). При токе разряда 0,3 А (кривая 1) в диапазоне температур от 0 до $+20^{\circ}\text{C}$ этот коэффициент равен 0,7%, а при повышении температуры от $+20$ до $+45^{\circ}\text{C}$ емкость меняется незначительно.

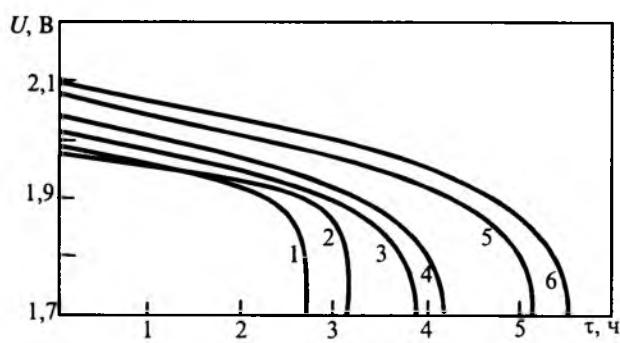


Рис.2. Разрядные кривые свинцового герметизированного аккумулятора СГ-10 при токе разряда 2 А (τ – время разряда, ч):

1 – $T = -30^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = -20^{\circ}\text{C}$; 3 – $T = -10^{\circ}\text{C}$; 4 – $T = +5^{\circ}\text{C}$; 5 – $T = +20^{\circ}\text{C}$; 6 – $T = +45^{\circ}\text{C}$

Таблица 1

Параметры разряда аккумуляторов СГ-6 в зависимости от температуры и тока

| Параметры разряда | Temperatura, °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | +45 | | | | +20 | | | | +5 | | | | -20 | | | | -30 | | | |
| I , A | 0,3 | 1,2 | 6,0 | 12,0 | 0,3 | 1,2 | 6,0 | 12,0 | 0,3 | 1,2 | 6,0 | 12,0 | 0,3 | 1,2 | 6,0 | 12,0 | 0,3 | 1,2 | 6,0 | 12,0 |
| $\Delta U_{\text{н}}$, В | 0,03 | 0,05 | 0,11 | 0,14 | 0,11 | 0,14 | 0,19 | 0,22 | - | 0,17 | 0,25 | 0,28 | 0,20 | 0,22 | 0,29 | 0,32 | - | 0,21 | 0,31 | 0,35 |
| $U_{\text{ср}}$, В | 2,01 | 2,00 | 1,94 | 1,91 | 2,00 | 1,99 | 1,93 | 1,90 | - | 1,96 | 1,91 | 1,86 | 1,96 | 1,92 | 1,85 | 1,76 | - | 1,92 | 1,81 | 1,75 |
| U_{k} , В | 1,75 | | | | 1,75 | | | | 1,75 | | | | 1,75 | | | | 1,75 | | | |
| C , А·ч | 6,60 | 5,66 | 3,98 | 3,17 | 6,29 | 5,08 | 3,65 | 2,68 | - | 4,62 | 2,93 | 2,26 | 4,04 | 2,76 | 1,72 | 1,30 | - | 2,50 | 1,16 | 0,70 |
| C , % | 105 | 90 | 63 | 50 | 100 | 81 | 58 | 43 | - | 73 | 46 | 36 | 64 | 44 | 27 | 21 | - | 40 | 18 | 11 |

Анализ приведенных в табл.2 данных показывает, что с понижением температуры температурный коэффициент емкости герметизированных аккумуляторов повышается, особенно при малых токах разряда.

С увеличением тока разряда в интервале температур от +45 до +20°C температурный коэффициент несколько увеличивается, а в интервале температур от +20 до 0°C начинает уменьшаться в отличие от аккумуляторов с жидким электролитом [3]. Как уже отмечалось, в области отрицательных температур (от 0 до -30°C) на-

блюдается наиболее заметное снижение температурного коэффициента емкости с увеличением тока разряда, обусловленное конструктивной особенностью герметизированного аккумулятора – отсутствием свободного электролита. В этих условиях емкость в основном ограничивается запасом кислоты в порах электрода и приэлектродном слое сепаратора.

В аккумуляторах с жидким электролитом по мере увеличения разрядного тока возрастает влияние диффузии кислоты на разрядную емкость. С понижением температуры их работоспособность значительно ухудшается, о чем свидетельствует повышение температурного коэффициента емкости с увеличением тока разряда [3].

Для аккумуляторов СГ-10 зависимости разрядной емкости C (А·ч и %) от тока разряда I (А) при конечном напряжении U_k , равном 1,75; 1,70; 1,55 и 1,45 В, в диапазоне температур от +45 до -30°C представлены на рис.4. Приведен-

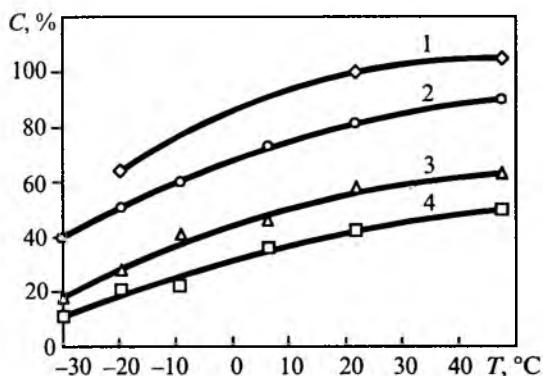


Рис.3. Зависимость емкости свинцовых герметизированных аккумуляторов СГ-6 от температуры ($U_k = 1,75$ В):

1 – $I = 0,3$ A; 2 – $I = 1,2$ A; 3 – $I = 6$ A; 4 – $I = 12$ A

Таблица 2

Температурный коэффициент емкости герметизированных свинцовых аккумуляторов СГ-6

| Ток разряда, А | Температурный коэффициент емкости, %, в интервале температур, °C | | |
|----------------|--|---------|---------|
| | +45 ÷ +20 | +20 ÷ 0 | 0 ÷ -30 |
| 0,3 | 0,2 | 0,7 | 1,1 |
| 1,2 | 0,3 | 0,6 | 0,9 |
| 6,0 | 0,3 | 0,6 | 0,8 |
| 12,0 | 0,4 | 0,5 | 0,7 |

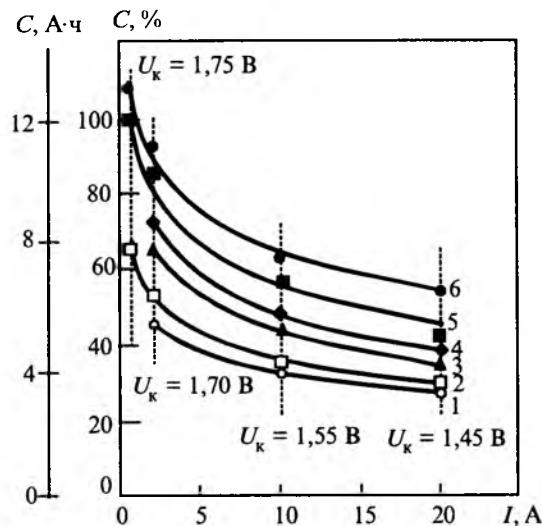


Рис.4. Зависимость емкости свинцовых герметизированных аккумуляторов СГ-10 от тока разряда и температуры:

1 – 6 – то же, что и на рис.2

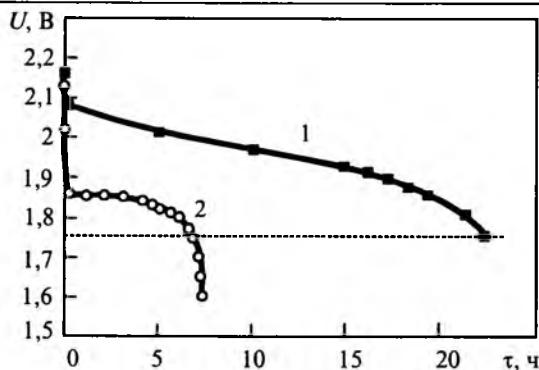


Рис.5. Разрядные кривые свинцового герметизированного аккумулятора СГ-10 при токе разряда 0,5 А и температуре $+20^\circ\text{C}$ (1) и -50°C (2)

ные данные также свидетельствуют о том, что максимальная зависимость емкости герметизированных аккумуляторов от температуры наблюдается при малых токах разряда в отличие от аккумуляторов с жидким электролитом [3].

Согласно литературным данным, электропроводность растворов серной кислоты при -50°C примерно в 8 раз ниже, чем при 0°C , а вязкость примерно в 5 раз выше [6]. Это затрудняет диффузионные процессы в аккумуляторе и оказывает существенное влияние на разрядную емкость. Так, емкость герметизированных аккумуляторов СГ-10 при 20-часовом разряде до напряжения $U_k = 1,75 \text{ В}$ и температуре -50°C составила 30% емкости при температуре $+20^\circ\text{C}$ (рис.5). Из приведенных на рис.5 разрядных кривых видно, что при температуре -50°C падение напряжения в начале разряда ΔU_k составляет 0,27 В (кривая 2), далее разрядная кривая имеет пологий характер и в течение примерно 75% продолжительности разряда напряжение на аккумуляторе составляет 1,86–1,80 В.

Особенностью герметизированных свинцовых аккумуляторов является также способность принимать заряд при отрицательных температурах благодаря упомянутой структуре замерзшего электролита [5].

В данной работе исследовалась возможность заряда аккумуляторов СГ-10 при температуре -30°C . Аккумуляторы разряжались в термокамере при температуре -30°C током 20-часового режима, а затем заряжались при данной температуре в течение 60 ч с коэффициентом перезаряда 120%. Было установлено, что после такого за-

ряда восстановленная емкость при температуре $+20^\circ\text{C}$ составила 70% номинальной.

Совокупность полученных данных свидетельствует о том, что свинцовые герметизированные аккумуляторы работоспособны в широком диапазоне токов и температур, в том числе в экстремальных условиях. При низких температурах и высоких токах разряда емкость обеспечивается тем запасом кислоты, который находится в порах электродов и прилегающем к его поверхности сепараторе.

Выводы

1. Исследования показали, что разработанные в ОАО "НИАИ "Источник" герметизированные свинцовые аккумуляторы с абсорбированным электролитом СГ-6 и СГ-10 работоспособны в широком диапазоне температур и токов и могут быть использованы для питания электронной аппаратуры, в том числе и в экстремальных условиях при температурах $-30 \div -50^\circ\text{C}$.

2. Влияние температуры на емкость аккумуляторов более значительно в области малых токов разряда: температурный коэффициент емкости в интервале положительных температур равен 0,2–0,7%, в интервале отрицательных температур – 1,1%.

С увеличением тока разряда от $0,05C_{20}$ до $2C_{20}$ при отрицательных температурах наблюдается снижение температурного коэффициента емкости в отличие от аккумуляторов с жидким электролитом.

Список литературы

1. Агуф И.А., Дасоян М.А., Лызлов Н.Ю., Григалюк Н.К. Современное состояние и перспективы развития научных исследований в области герметичного свинцового аккумулятора // Электротехническая промышленность. Сер. 22. М.: Информэлектро. 1984. С. 1–67.
2. Агуф И.А., Центр Б.И., Мрга И., Мицки К. Проблема герметизации свинцового аккумулятора // Электротехническая промышленность. Сер. 22. М.: Информэлектро. 1989. С. 1–28.
3. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. М.: Советское радио, 1968.
4. Дасоян М.А., Агуф И.А. Современная теория свинцового аккумулятора. Л.: Энергия, 1975.
5. Frank R. VRLA batteries resist freezing and thawing // Batteries Int. 1994. №18. P.68–69.
6. Максимова И.Н., Никольский А.А., Сергеев С.В. Свойства электролитов химических источников тока. Л.: Энергия, 1975.

Модель деформации при прокатке кабельной металлической оболочки

РЫБАКОВ Ю.В., канд. техн. наук

Ранее было показано [1], что при деформации кабельной заготовки возникает анизотропия деформации по толщине оболочки, из-за торможения деформации на границе металл – керамический наполнитель, а также вследствие геометрической и механической неоднородности кабельной конструкции. Дано достаточно подробное объяснение причин возникновения этого явления. Однако необходимо более подробное изучение механизма деформации металлической оболочки при периодической прокатке без оправки. Интерес представляет также изучение процесса "обратной" прокатки, т.е. прокатки от меньшего диаметра к большему или из зоны с менее плотной изоляцией к более плотной. Заслуживает внимания и процесс деформации двухслойной оболочки, которая показала значительные преимущества по сравнению с однослойной и, в частности, для оболочек из циркониевых сплавов. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

На рис.1 показана схема деформации кабельной заготовки при холодной периодической прокатке, названной нами прямой прокаткой (ПП). Схема представляет собой продольное сечение заготовки на участке так называемого переходного конуса между исходным и конечным диаметрами за один переход. При этом показан также рабочий валок с ручьем переменного диаметра. Сечение заготовки выдержано в определенном масштабе, а длина ручья и соответственно длина переходного конуса умышленно сжаты, что позволило рассмотреть и измерить объемы деформируемого металла оболочки по длине ручья. На рис.1,а показаны также сечения оболочки в переходной части, соответствующие положениям валка 2–4. Площади сечения поверхностных объемов деформируемого металла на разных стадиях прокатки показаны различной штриховкой. Эти объемы определяли по пропорциональным им площадям, указанным на рис.1, путем взвешивания на аналитических весах фигур, соответствующих площадям, вырезанным из рисунка. Все расчеты приведены в относительных единицах. Аналогичная методика была принята и при изучении других процессов и конструкций (рис. 2–4).

Из рис.1 видно, что в результате деформации происходит перемещение поверхностей за одну подачу, наружной – из положения *AB* в положение *EF*, а внутренней из положения *CD* – положение *GK*. Следовательно, вся деформация за одну подачу происходит между поверхностями *AB* и *GK*. Тогда объемы, заключенные между поверхностями *AB* и *EF*, можно условно назвать наружными, а между поверхностями *CD* и *GK* – внутренними. Между ними располагают-

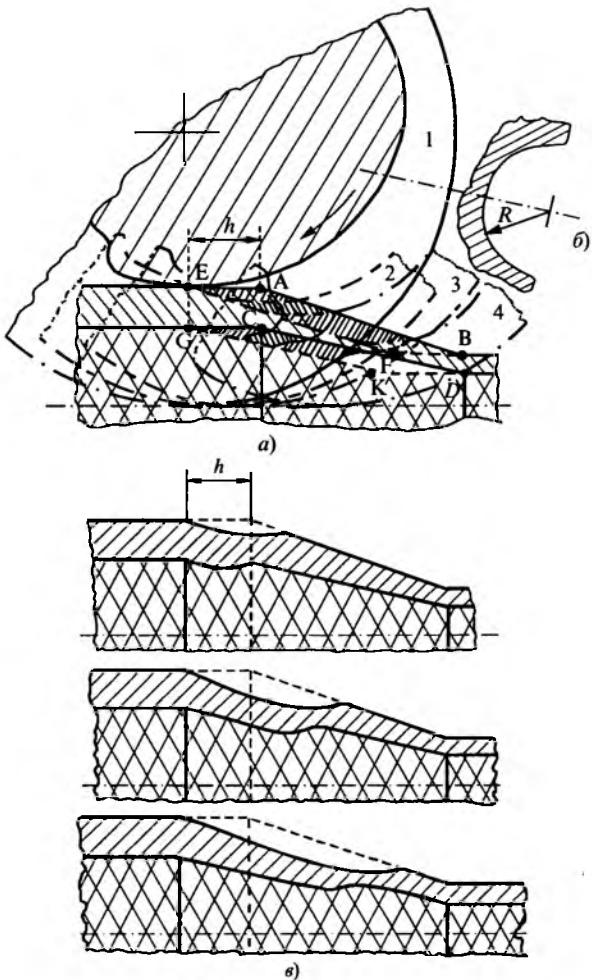
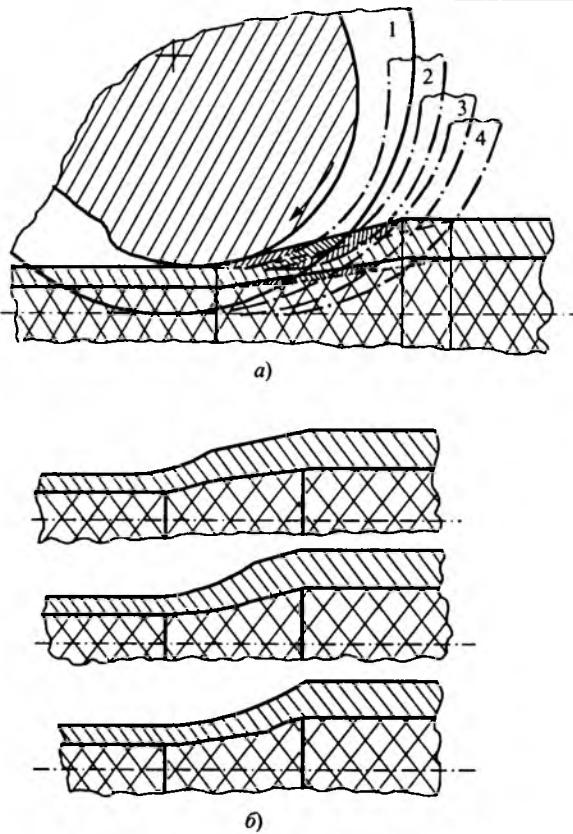


Рис.1. Схема взаимного перемещения кабельной заготовки и рабочего валка при прямой холодной периодической прокатке (а), сечение ручья (б) и продольные сечения заготовки (в), соответствующие разным положениям валка (*h* – подача; 1–4 – последовательные положения валка и заготовки)

ся средние объемы. Из схемы деформации видно, что наружные объемы подвергаются осевому сдвигу, а внутренние – радиальному сдвигу. Однако деформации сдвига в чистом виде встречаются редко и обычно сопровождаются деформациями сжатия или растяжения. В нашем случае разделение на объемы весьма условно, так как четкой границы между объемами (слоями), естественно, нет. Все объемы деформируемого металла связаны между собой и оказывают взаимодействие друг на друга. Поэтому, выделяя разные объемы, можно говорить только о преимущественном действии в каждом объеме тех или иных деформаций и напряжений. В частности, радиальный сдвиг в нашем случае отвечает за относительное увеличение объема.



личение толщины оболочки вследствие ее "осаживания" при прокатке.

Выделим эти объемы (рис. 3). Из рис.3 видно, что наружные, средние и внутренние объемы не одинаковы между собой и отличаются в зависимости от способа прокатки. При ПП отношение наружных объемов к средним и внутренним изменяется по длине ручья от 2,2:7,1:1 до 2,4:0,7:1, а при обратной прокатке (ОП) – от 2,2:1,7:1 до 2,9:1:1. Большая разница между наружными и внутренними объемами, т.е. между осевыми и радиальными сдвигами и оказывает решающее влияние на возникновение – анизотропии деформации кабельной оболочки, что подтверждается исследованием фигур деформации отверстий диаметром 1 мм, просверленных в оболочке перед прокаткой (рис.5) и свидетельствующих о деформациях сдвига и растяжения [1].

Из рис.1 видно также, что впереди бегущего вала образуется волна (гофр), которая и приводит к некоторому увеличению усилий при ПП и нагрузок на привод прокатного стана. Видно также, что при ПП больше вероятность образования шейки и разрушения, чем при ОП. Этим, в частности, объясняется возможность образования утяжек на внутренней поверхности оболочки при высоких степенях обжатия при прокатке [2]. Из опытов известно, что усилия и нагрузки при ОП примерно в 1,5 раза меньше, чем при ПП. Разницу в процессах ПП и ОП может наглядно иллюстрировать схема перемещения деформируемых объемов кабельной оболочки при прямой (а) и обратной (б) периодической прокатке.

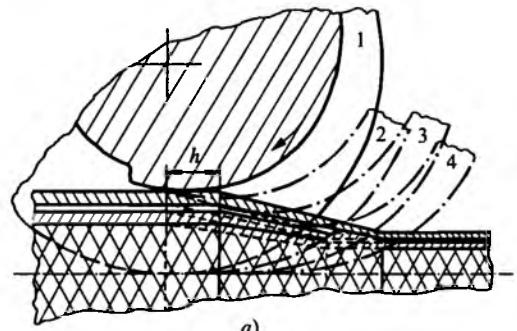
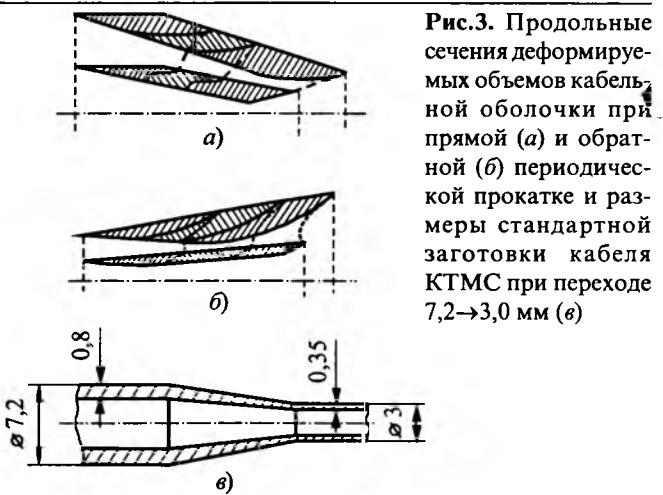


Рис.4. Схема взаимного перемещения двухслойной кабельной оболочки и рабочего вала при прокатке (а) и продольные сечения заготовки (б), соответствующие положению валка 2-4.

изменение толщины оболочки вследствие ее "осаживания" при прокатке.

Из рис.6 видно, что наибольшее десятикратное изменение по длине ручья претерпевает средний объем при ПП. Тот факт, что соотношения между наружными и внутренними объемами для каждого процесса остаются, практически, постоянными, а наибольшие изменения (в 10 раз при ПП) касаются среднего объема, отвечает физике процесса и свидетельствует о верности выбранной модели деформации.

При деформации двухслойной оболочки (рис.4) вследствие гарантированного зазора между оболоч-

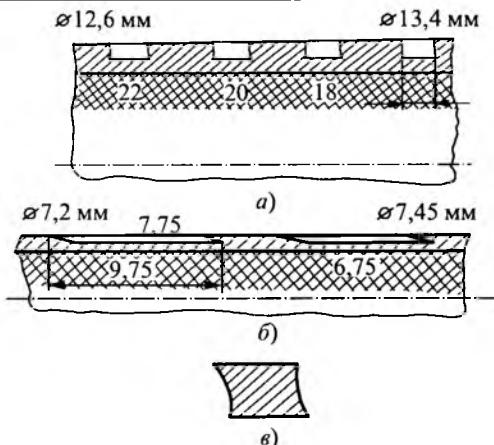


Рис.5. Схема фигур деформации в продольном сечении оболочки двухжильного кабеля диаметром 13,4 мм на месте высверленных отверстий диаметром 1 мм после прокатки (подача – 0,75 мм, угол поворота – 90°):

а – начало прокатки; б – конец прокатки; в – вид отверстия после деформации

ками, особенно на первом переходе, предварительно происходит "осаживание" наружной оболочки, а затем в деформацию вовлекается внутренняя оболочка. Толщина наружной оболочки относительно увеличивается, а следовательно, уменьшается ее осевая деформация (вытяжка). Зазор между оболочками по мере деформации уменьшается, но может еще сохраняться некоторое время за счет упругой составляющей. Толщина внутренней оболочки изменяется более равномерно, так как внутри ее находится "оправка" в виде керамической изоляции. Поэтому на первых переходах вытяжка внутренней оболочки существенно больше, чем наружной. Так, опыты по прокатке двухслойной циркониевой оболочки диаметром 9,0 мм до диаметра 7,0 мм показали, что при длине заготовки 600 мм внутренняя оболочка стала длиннее на 70 мм. При дальнейшей прокатке с 7 до 3 мм относительного смещения оболочек не наблюдалось, видимо вследствие сильного "сцепления" оболочек при глубокой деформации, т.е. двухслойная оболочка повела себя как однослочная. По мере уменьшения диаметра и увеличения плотности изоляции возникает обратный процесс – некоторое увеличение толщины внутренней оболочки относительно наружной. Например, при диаметрах кабеля 1,5 и 1,0 мм разница в толщине оболочек может достигать 10–15%. При необходимости эту разницу можно предотвратить выбором соответствующих труб для исходных заготовок. Это только некоторые особенности деформации двухслойных оболочек на первых переходах.

Произведем расчет относительных долей объемов металлов, отличающихся напряженным состоянием и условно названных нами наружный, внутренний и средний. При этом следует учсть разницу в радиусах тел вращения, соответствующих нашим объемам. Для этого воспользуемся конкретными размерами переходной части заготовки диаметром 7,2×3,0 мм (рис.3,в). Для упрощения расчетов, без особого ущерба

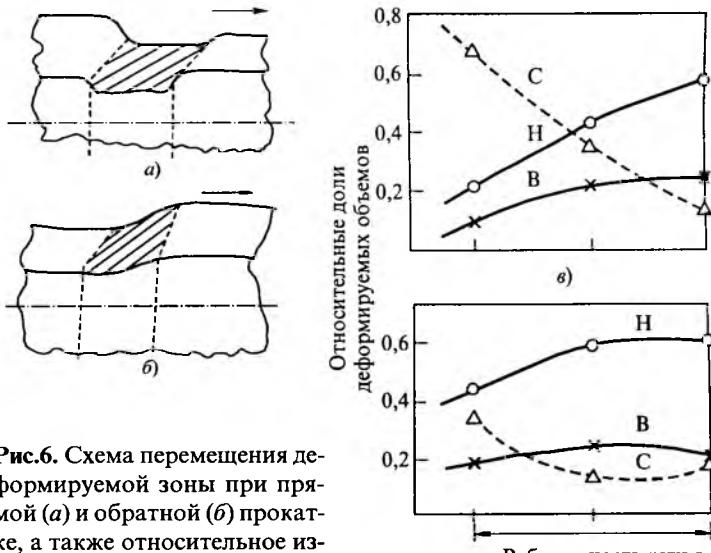


Рис.6. Схема перемещения деформируемой зоны при прямой (а) и обратной (б) прокатке, а также относительное изменение деформируемых объемов к общему объему в данном сечении при прямой прокатке (в) и при обратной прокатке (г) по длине ручья (Н – наружные объемы; В – внутренние объемы; С – средние объемы)

ба для их точности, не учитывали термоэлектродные жилы, которые влияют на жесткость конструкции в целом, а также было допущено, что образующая переходной части является образующей конуса, тогда как на самом деле она имеет более сложную геометрию и воспроизводит профиль ручья прокатных валков. Результаты расчетов сведены в таблицу.

| Способ прокатки | Доли объемов с различным напряженным состоянием при прокатке кабельной заготовки | | |
|-----------------|--|----------|-------------|
| | наружного | среднего | внутреннего |
| Прямая | 0,39 | 0,44 | 0,17 |
| Обратная | 0,56 | 0,22 | 0,22 |

Из таблицы видно, что основное различие между способами прокатки заключается в несколько большем объеме наружного слоя и внутренней части оболочки, контактирующей с изоляцией, при ОП. Это логично, если учесть, что плотность изоляции по длине переходной части изменяется от большей к меньшей. Можно предполагать, что при этом относительное осаживание (увеличение толщины оболочки) будет несколько больше.

Однако главным остается вопрос о характере напряженного состояния среднего объема. Если учесть отсутствие деформации сдвига в среднем объеме, как следует из схем деформаций (рис.1,2,4), то можно предположить, что наибольшую роль в среднем объеме играет деформация растяжения, которой сопутствует деформация радиального сжатия, действующая практически во всех объемах оболочки.

Для проверки этого предположения рассчитаем вытяжку кабельной заготовки при прокатке по переходу 7,2→3,0 мм стандартного двухжильного кабеля (рис.3,в) с подачей 0,75 мм. При этом исключая

ем долю радиальной деформации сдвига, действующую во внутреннем объеме и равную 0,17. Абсолютная вытяжка при этом составила 3,37 мм, а коэффициент вытяжки – 4,5. Полученный коэффициент близок к рассчитанному по известному уравнению [3]:

$$\mu_k = \mu \bar{K} + (1 - \bar{K})\mu^{\frac{\bar{Y}}{Y_0}},$$

учитывающему изменение плотности изоляции по мере изменения сечения, а также долю металлической части в объеме заготовки.

Таким образом, по толщине оболочки можно выделить три элементарных объема, дающих некоторое представление о напряженном состоянии металла.

Тогда общая картина напряженного состояния по толщине оболочки представляется сложной, различной по толщине, состоящей из трех частей (рис. 7, а). На наружный слой преимущественное влияние оказывает деформация осевого сдвига, во внутреннем слое – деформации радиального сдвига, а в среднем слое главными являются деформации растяжения, под воздействием которых в этом слое возникают большие напряжения сжатия, вызывающие в соседних слоях напряжения растяжения, особенно опасные для наружного слоя, контактирующего с инструментом и содержащего концентраторы напряжений: риски, надиры, язвы.

Эпюры распределения деформаций и напряжений по толщине оболочки показаны на рис. 7, б. Толщина оболочки разделена на три слоя в соотношении, полученном в нашем исследовании 0,39:0,44:0,17. Для наглядности мы умышленно разделили деформации сдвига, возникающие под воздействием касательных напряжений, и деформации растяжения и сжатия. Понятно, что сдвиг в реальной конструкции, практически, всегда сопровождается деформациями сжатия или растяжения. Их алгебраическое сложение приводит к напряжениям растяжения в поверхностных слоях и напряжениям сжатия в центральной части. Такое распределение напряжений может приводить к разрушению поверхностных слоев, особенно наружных. Это подтверждается производственным опытом, например, в случае наличия на поверхности дефектов, нарушения режимов термической обработки и т.п.

Кардинально повлиять на распределение напряжений может, в частности, применение многослойной оболочки. Например, при изготовлении термо-парного кабеля из циркониевых сплавов с двухслойной оболочкой существенно повысились его качество и деформационная способность по сравнению с однослоиной, благодаря чему удалось изготовить кабель диаметром 0,5 мм.

Можно предполагать также, что применение двух- и трехслойных оболочек целесообразно для любых сплавов, особенно, если они имеют ограниченную деформационную способность.

Предложенная модель деформации и полученное на ее основе распределение напряжений в сечении оболочки позволяют легко перейти к расчетной схеме для определения усилий при прокатке и мощности оборудования.

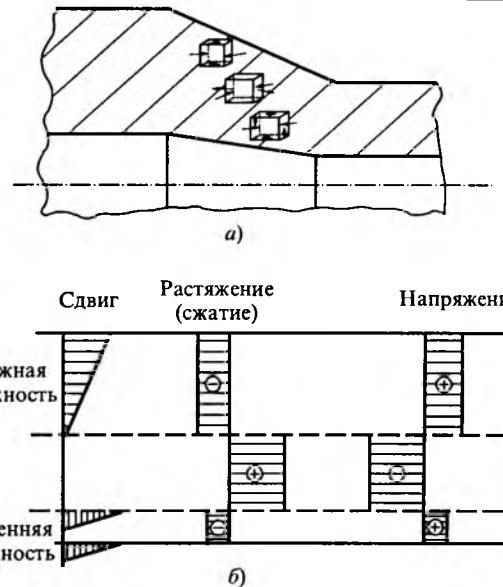


Рис.7. Схема действия напряжений в элементарных объемах, условно выделенных по толщине переходной зоны кабельной оболочки (а) и соответствующие им эпюры деформаций и напряжений (б)

Выводы

1. Предложенная модель деформации при прокатке кабельной металлической оболочки позволила условно выявить три слоя по толщине оболочки, отличающиеся действующими силами при прокатке и представить общую картину распределения деформаций и напряжений в этих слоях.

2. Наружные, средние и внутренние слои находятся в определенном соотношении между собой в зависимости от способа прокатки. При прямой прокатке это соотношение изменяется по длине ручья, главным образом, за счет резкого уменьшения объема среднего слоя, подвергаемого интенсивному растяжению.

3. Ограничение деформации за переход, видимо, связано прежде всего с деформацией среднего слоя.

4. Главными деформациями, действующими в поверхностных слоях, видимо, являются деформации сдвига: осевого – в наружной поверхности и радиального – со стороны внутренней поверхности. Деформации растяжения в среднем слое могут приводить к большим напряжениям сжатия и опасным напряжениям растяжения в поверхностном слое.

5. Одним из приемов повышения деформационной способности металлических оболочек при деформации и эксплуатации является применение многослойных оболочек без металлической связи между слоями, а также с металлическими связями между слоями с различными механическими свойствами.

Список литературы

1. Рыбаков Ю.В. Геометрическая и механическая неоднородность и анизотропия деформации кабельной конструкции // Электротехника. 1990. № 9. С. 64.
2. Рыбаков Ю.В. Повышение конструкционной точности кабелей из неорганических материалов // Электротехника. 1998. № 5. С. 17.
3. Рыбаков Ю.В. Некоторые закономерности деформации и формоизменения из неорганических материалов // Электротехника. 1991. № 1. С. 62.

БИБЛИОГРАФИЯ

Рецензия на учебник "Проектирование электрических машин"

Третье издание учебника "Проектирование электрических машин" вышло в свет летом 2002 г. Учебник предназначен для студентов-электромехаников, изучающих курс "Проектирование электрических машин", а также для студентов других специальностей, выполняющих курсовой проект по электрическим машинам.

Издание в полной мере продолжает традиции московской школы электромеханики, заложенные Г.Н.Петровым. Эти традиции в части проектирования электрических машин были развиты профессорами кафедры электрических машин МЭИ П.С.Сергеевым, Н.В.Виноградовым и Ф.А.Горяновым в их первых послевоенных учебниках по проектированию электрических машин. Суть традиций, как нам представляется, в формировании у проектировщика глубокого осмысления физических процессов, происходящих при электромеханическом преобразовании энергии и ясность их изложения.

Вместе с тем рецензируемый учебник отражает достижения последних лет в сфере проектирования и производства электрических машин переменного и постоянного тока средней мощности. В нем сконцентрирован огромный материал по проектированию электрических машин, накопленный на заводах и НИИ электропромышленности в последние десятилетия. В учебнике приведены все необходимые материалы для курсового и дипломного проектирования как единичной машины, так и отрезка серий асинхронных и синхронных машин и машин постоянного тока.

Учебник содержит объединенные и систематизированные материалы лекций по проектиро-

ванию электрических машин, чем полезен для преподавателей этой дисциплины, а также методики и примеры расчета машин переменного и постоянного тока. Особо отметим, что в соответствующих разделах книги в табличной форме приведены формуляры расчетов параметров и характеристик электрических машин, которым предшествуют исходные данные для расчетов. Это позволяет при желании упростить рутинные расчеты посредством создания простых и наглядных алгоритмов и программ расчета на любом современном ПК. Материалы приложений, где представлены сведения о характеристиках электротехнических сталей, обмоточных проводов, подшипников качения и др., делают книгу самодостаточной при курсовом проектировании, что очень важно для студентов при существующем дефиците и дороговизне соответствующей справочной литературы.

Наконец, несомненным достоинством учебника является его компактность, когда огромный по объему материал систематически и наглядно представлен в одном сравнительно небольшом томе.

К великому сожалению, из авторов второго издания в живых остался только один. В предисловии к учебнику профессор И.П. Копылов пишет, что "ему пришлось весь труд по переизданию принять на свои плечи и постараться в тексте сохранить индивидуальные особенности своих коллег". Представляется, что одному из столпов отечественной электромеханики, каковым, вне сомнения, является И.П. Копылов, его замысел удался в полной мере, а студенты и специалисты-электромеханики получили нужную и своевременную книгу.

И.И.Алиев, проф.

¹ Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2002. 757с. с ил.

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Редактор Т.В. Штанько

Сдано в набор 15.07.2002. Подписано в печать 12.09.2002. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 85

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Правила оформления статей, направляемых в журнал "Электротехника"

1. Объем статьи не должен превышать **12 страниц текста**, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере **через 2 интервала** с полями 2-3 см, и иметь **не более 5 рисунков**.

2. В статье должны быть: сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы и рекомендации.

К статье должна быть приложена аннотация (2-3 предложения) на русском и английском языках. Название статьи также следует дать на русском и английском языках.

3. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.

Желательно, чтобы число авторов **не превышало пяти**. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.

4. Формулы должны быть четко вписаны от руки или набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст). Прописные (заглавные) буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу, а строчные (малые) - двумя черточками сверху. 0 (нуль) и цифра 3 (три) поясняются на полях простым карандашом. Индексы показываются простым карандашом.

5. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.

6. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены четко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.

Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.

7. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.

8. Статью в двух экземплярах следует высыпать в редакцию простой или заказной бандеролью.

9. К статье желательно приложить дискету с набранным текстом.