

10/2  
ISSN 0013-5860

07

# Электротехника

3

1995

## **УЧРЕДИТЕЛИ**

**ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО РАЗВИТИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ КОМИТЕТА РФ ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ (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)  
НИИ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» (г. ЗАПОРОЖЬЕ)**

## **УЧРЕДИТЕЛЬНЫЙ СОВЕТ**

**АРХАНГЕЛЬСКИЙ Ю.Н., ЮТЛАНДОВ Ю.Д., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М.,  
ЩЕРБАКОВ В.Г., КОВАЛЕВ Ф.И., ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.,  
АНДРИЕНКО П.Д.**

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Главный редактор КОЧЕТКОВ В.Д.**

**АЛЕКСАНДРОВ Г.Н., БЕЛКИН Г.С., ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П., ЛУРЬЕ А.И.,  
МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., ПОЗДЕЕВ А.Д., ПРЕСНОВ Ю.Л., РОЗАНОВ Ю.К.,  
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,  
ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н., ХОТИН В.А.**

**Адрес редакции: 123242, Москва, Зоологическая ул., 11, комн. 212  
Телефон: 254-11-52**



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с января 1930 года

№ 3 МАРТ 1995

## СОДЕРЖАНИЕ

### К 50-ЛЕТИЮ ВЕЛИКОЙ ПОБЕДЫ

- Джаноян А.С., Троицкая Т.Б. Электротехническая промышленность в годы Великой Отечественной войны . . . . .  
Юньков М.Г. ВНИИэлектропривод — годы войны . . . . .

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Чувашев В.А., Юргенсон Т.С., Чуванков В.Ю., Железняков А.В., Жук Н.П. Асинхронные взрывозащищенные электродвигатели с повышенной перегрузочной способностью . . . . .  
Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Машкин В.Г., Плужников А.В., Пименов В.Г. Математическое моделирование и автоматизированное проектирование однофазных асинхронных двигателей . . . . .

- Родионов Ю.А., Плохов И.В., Егоров В.Е., Савраев И.Е., Марков А.М. Оценка качества работы щеточного аппарата электрических машин приборами диагностического комплекса ДИАКОР . . . . .

- Ахунов Т.А., Макаров Л.Н., Попов В.И., Петров Ю.Н. Разработка отрезка серии трехфазных двухскоростных лифтовых асинхронных двигателей . . . . .

- Сепп Ю.И. Модели для оценки вибропередающих свойств конструкций электрических машин переменного тока . . . . .

- Афонин А.А., Кисленко В.И., Пашков Н.И. Управляемый торцевой электродвигатель с постоянными магнитами . . . . .

- Олейников А.М. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором . . . . .

- Косыкин Ю.П. Синтез электромеханических преобразователей, совмещенных с электронными компонентами . . . . .

- Косыкин Ю.П., Сепп Ю.И. Системный подход при оценке виброактивности электрических машин . . . . .

- Попов В.И., Петров Ю.Н., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Разработка асинхронных однома-

шинных преобразователей частоты ОПЧС-50/200 Гц . . . . . 39

Бибик Е.В., Войтех А.А., Кисленко В.И., Попович А.Н. Исследование динамических режимов работы асинхронных двигателей малой мощности с учетом их несимметрии, нелинейности предвключенных элементов и нагрузки . . . . . 42

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Коршунов Ю.М., Федоров В.Н., Сысоев В.А. Анализ структур регулирующих элементов дискретных стабилизаторов переменного напряжения . . . . . 44

### ЭЛЕКТРОПРИВОД

Федоров О.В. Особенности структур генеральных совокупностей электроприводов объектов электроэнергетики . . . . . 47

### ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Блиннов С.В., Вицинский С.А., Дивин В.Д., Келлер А.В., Ловчий И.Л., Чекель В.Н., Чудаков Ю.И., Чухнин А.Я. Многоканальная система лазерной компьютерной графики . . . . . 50

Акимов В.В., Годулян В.В., Остапенко Е.И., Трифонов В.З. Перспективы применения полимерных изоляторов в аппаратах высокого напряжения . . . . . 54

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Многофункциональный сварочный источник питания (МИП) — новый этап в сварочном оборудовании . . . . . 56

Компактная «интеллектуальная» система гарантированного электроснабжения СГЭ-0,6 (Offline Smart-UPS) . . . . . 57

### Хроника

Ассоциация инженеров силовой электроники Семинар Ассоциации инженеров силовой электроники . . . . . 58

59

### НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Виктор Дмитриевич Кочетков (60 лет со дня рождения) . . . . . 60

Владимир Максимович Тучкевич (90 лет со дня рождения) . . . . . 61

# **K 50-ЛЕТИЮ ВЕЛИКОЙ ПОБЕДЫ**

## **Электротехническая промышленность в годы Великой Отечественной войны**

**А.С. ДЖАНОЯН, Т.Б. ТРОИЦКАЯ**

В летописи электротехнической промышленности годы героической борьбы нашего народа против фашистских захватчиков наглядно подтверждают беспримерный подвиг тружеников отрасли, ковавших нашу победу на фронтах и в тылу.

В первые дни войны десятки тысяч работников электротехнических предприятий ушли на фронт и в народное ополчение. Опустели цеха большинства заводов, расположенных в промышленных регионах Центра, Украины и Урала. Для выполнения срочных заданий Государственного Комитета Обороны к станкам становились старики, подростки и женщины, самоотверженно работая за тех, кто ушел на фронт.

В невероятно трудных условиях производилась продукция, жизненно необходимая пехоте и артиллерии, авиации и морскому флоту, транспорту и связи,— фронту и тылу.

Указом Президиума Верховного Совета СССР от 22 августа 1941 г., народным комиссаром электропромышленности был назначен И.Г. Кабанов, работавший до этого директором столичного завода «Динамо». (Самостоятельный наркомат электропромышленности был создан в апреле 1940 г. путем выделения из состава наркомата электростанций и электропромышленности). Новый нарком свои недюжинные способности и опыт направил на решение двух главных задач отрасли в начале войны — эвакуацию и переключение предприятий на производство требуемой военной продукции.

В короткие сроки были вывезены в восточные районы страны многие заводы. Эшелоны из Ленинграда, обстреливаемые вражеской авиацией, потянулись на Восток. Электросиловцы эвакуировали в Лысьву, Свердловск и Томск производство турбо- и гидрогенераторов, электрических машин, аппаратуры.

В Свердловск отправил свое оборудование завод «Электроаппарат». Осенью 1941 г. в уральские поселки Нижняя Баранча и Новая Утка прибыло оборудование цеха сварочных машин завода «Электрик».

В это же время началась частичная эвакуация московских заводов.

Демонтировали часть своего оборудования динамовцы, отправляя его в Челябинск, Пермь и

Миасс.

Станки, полуфабрикаты и материалы с «Москабеля» погружали в железнодорожные составы, идущие в Томск, Куйбышев, Свердловск. В те же города шли вагоны с демонтированным кабельным оборудованием из Ленинграда и Киева. В Петропавловске (Казахстан) оказалась значительная часть оборудования московского завода «Изолит», а в Новосибирске — основное оборудование Московского прожекторного завода. Отгрузка оборудования производилась комплектно. Вместе со станками вывозились производственные заделы, научно-техническая документация, запасы материалов и полуфабрикатов, энергетическое и крановое оборудование. Огромные трудности приходилось преодолевать заводским коллективам на новых местах. На станциях отсутствовали подъемные механизмы, здания и помещения в большинстве случаев были мало приспособлены для развертывания промышленного производства. Но несмотря на тяжелые условия, ценой колоссальных усилий на базе эвакуированных электротехнических производств создавались новые заводы. В предельно сжатые сроки они становились в строй действующих и давали продукцию, необходимую армии и флоту. Исключительно показателен в этом отношении пример Харьковского электромеханического завода. Выполняя приказ Наркомата электропромышленности об эвакуации первой очереди завода, директор И.Т. Скиданенко завершил ее в сентябре 1941 г.

Новая прописка ХЭМЗ была проведена одновременно в нескольких городах. Производство взрывобезопасного оборудования развернулось на площадях трамвайного депо и автогаража в г. Кемерово. Выпуск автоматических выключателей был организован в так называемых Торговых рядах г. Ульяновска. Цеха крупных машин были эвакуированы в Свердловск на завод «Уралэлектроаппарат», а производство машин постоянного тока — в Прокопьевск. Цех коммутационной аппаратуры разместился в недостроенном Доме культуры в Уфе, а цех реле и аппаратуры управления для электропривода — в зданиях Клуба строителей, кооперативного техникума и Чувашского педагогического института в Чебоксарах. Паковое производство было развернуто на Боб-

ровском лесотехническом заводе и частично в Баранче. На базе трех хэмзовых цехов и части ленинградского завода «Электрик» за полтора месяца был создан Чебоксарский завод электроаппаратуры, который уже с января 1942 г. начал выпуск новой продукции — электрооборудования для боевых машин.

Организацией и налаживанием производства руководили Д.С. Черничкин, Н.И. Борисенко и А.И. Якунин (будущий директор ХЭМЗ, Герой Социалистического труда). Вскоре были пущены Прокопьевский и Кемеровский электромеханические заводы, Ульяновский и Уфимский заводы электроаппаратуры. На базе ХЭМЗ были созданы пять самостоятельных заводов и несколько филиалов на электротехнических предприятиях Урала.

Эвакуация оборудования, сохранение технического потенциала специалистов позволили в глубоком тылу дать жизнь еще многим предприятиям электротехнической промышленности. Помимо перечисленных детищами военных лет стали заводы «Миассэлектроаппарат», Новоуткинский электросварочного оборудования, саранский «Электровыпрямитель», Куйбышевский завод кабелей связи, медногорский «Уралэлектромотор», Баранчинский электромеханический, Петропавловский завод электроизоляционных материалов. Эта огромная напряженная работа положила начало созданию мощного промышленного потенциала на востоке страны и тем самым приблизила победу над врагом. Новая сложная обстановка требовала быстрой перестройки производства на военный лад. Изменение номенклатуры продукции, выпускаемой электротехническими предприятиями, также произошло в невероятно короткие сроки. Снаряды для гвардейских минометов «Катюша», электродвигатели поворотного устройства танковых башен, запасные части для подводных лодок, боеприпасы для партизанских отрядов — вот такой уже в первые месяцы войны стала номенклатура Ярославского электромашиностроительного завода (ЯЭМЗ), еще накануне изготавливавшего самую мирную продукцию — электрические двигатели мощностью до 100 кВт и низковольтную аппаратуру.

Только исключительная мобильность, гибкость и невиданный трудовой героизм работников тыла смогли преодолеть трудности и успешно решать конкретные, по сути боевые задачи.

В годы войны одним из оплотов осажденного Ленинграда стал завод «Электросила», который продолжал работать, ни разу не останавливая производства все 900 дней блокады. Около полутора тысяч снарядов и четырехсот авиабомб упали на территорию завода. К бедствиям от артиллерийских обстрелов добавился голод, однако и в этих тяжелых условиях не было ни одного

случая отказа от работы или дезертирства с трудового фронта. Как вспоминает Г.Я. Мухин, назначенный осенью 1941 г. директором «Электросилы», завод по постановлению Госкомитета Обороны немедленно приступил к ремонту и выпуску машин постоянного тока для кораблей Балтийского флота. Было отремонтировано около 500 машин, наложен выпуск динамомашин, спаренных с керосиновыми двигателями, более тысячи таких агрегатов было выпущено для нужд Красной Армии. Электросиловцы вправе гордиться своим активным участием в обеспечении осажденного города электроэнергией. В 1942 г. завод освоил выпуск электрических машин и аппаратов для восстановления ленинградских электростанций, водопроводной сети и других жизненных объектов, а в начале 1943 г. заводчане приступили к восстановлению трех гидрогенераторов для Волжской ГЭС, в мае того же года было восстановлено производство турбогенераторов и крупных электрических машин. В тяжелые блокадные дни конструкторы «Электросилы» во главе с Д.В. Ефремовым и В.В. Титовым продолжали работы по созданию мощных турбогенераторов с водородным охлаждением. Особое значение имел комплекс работ электросиловцев по демонтажу, эвакуации, сборке и пуску в эксплуатацию на Челябинской ТЭЦ в декабре 1943 г. первого в мире двухполюсного турбогенератора мощностью 100 МВт. Руководил этими работами выдающийся электротехник Г.К. Жерве, а создатели уникальной машины — Д.В. Ефремов, Е.К. Комар, И.А. Одинг и М.Л. Брицын были удостоены Государственной премии СССР в 1943 г. В том же 1943 г. звание лауреатов Государственной премии СССР было присвоено Н.П. Иванову, В.П. Федорову и А.С. Еремееву за разработку конструкции и технологии производства мощных гидрогенераторов для Рыбинской ГЭС. Активно участвовал в выполнении заданий Ленинградского фронта коллектив завода «Электрик», сумевший в невиданно короткие сроки наладить выпуск головок артиллерийских снарядов и стабилизаторов для реактивных снарядов легендарных «Катюш». Большая заслуга электротехников Ленинграда отмечена в прокладке «Дороги жизни». Завод «Севкабель» под руководством главного инженера С.С. Кулагина выполнил важнейшее боевое задание — изготовил силовой кабель, который затем был общими усилиями под непрерывным обстрелом проложен по дну Ладожского озера для подачи электроэнергии в осажденный город.

Эвакуация оборудования ряда электротехнических предприятий в г. Свердловск сыграла огромную роль в создании военного производства на заводе «Уралэлектроаппарат» (бывший «Уралэлектромаша»). Коллектив возглавил энергичный руководитель В.И. Абакумов. На заводе в

сжатые сроки было освоено производство гвардейских минометов «Катюша» и ракетных снарядов к ним.

При участии талантливых специалистов и организаторов, прибывших с «Электросилы», ХЭМЗ, сразу же началось освоение производства основной номенклатуры электротехнических изделий. Вместе с электротехниками завода — П.И.Дилевым, А.П.Ламановой, А.Г.Неретиной, В.И.Страховым и другими трудились харьковские и ленинградские специалисты — Г.И.Гайм, М.Н.Грузов, В.С.Борушко, С.В.Кискачи, Н.П.Кравцов, Ф.Т.Сухоруков, Н.П.Иванов, К.Ф.Костин, З.Б.Нейман, Н.П.Тугаринов, М.Л.Брицын, М.А.Гашев, Е.Г.Комар, В.Т.Касьянов, Н.С.Стрельцов, И.Д.Урусов, В.К.Федоров, В.П.Федоров, П.А.Фридкин, Д.В.Шапиро, Б.М.Гинзбург, М.И.Динабурский и многие другие. Их самоотверженный труд приблизил нашу победу. Только за один 1943 г. были освоены и выпущены 40 крупных электрических машин, первые вертикальные гидрогенераторы мощностью 1200 кВт, электродвигатели переменного и постоянного тока, металлические ртутные выпрямители, баковые масляные выключатели на 220 кВ. Такие масштабы и сроки освоения производства новых изделий немыслимы и спустя 50 лет.

На Баранчинском электромеханическом заводе сложился дружный коллектив электромашиностроителей, прибывших, в основном, из Харькова и Ленинграда. В их числе такие крупные специалисты, как Э.Д.Кравчик, Б.И.Кузнецов, В.А.Васильев, В.Ф.Новокрещенов, А.Б.Шапиро, В.Н.Евзлин. Была выполнена большая работа по освоению производства асинхронных двигателей свыше 100 кВт (особенно высоковольтных), а также по созданию и освоению новой серии «Урал» асинхронных электродвигателей до 100 кВт. Наркомату электропромышленности было поручено решить одну из важнейших военно-экономических задач — восстановление сложного электрооборудования и их систем управления на эвакуированных промышленных объектах металлургии, оборонпрома, химии, энергетики и других важных отраслей. С этой целью в 1942 г. создается в Новосибирске Государственный проектно-монтажный трест, который под руководством Б.А.Зильберштейна, А.И.Бертикова и П.Г.Чернышева в течение двух лет это задание успешно выполнил.

Истинными гвардейцами проявили себя рабочие, инженеры, ученые предприятий электропромышленности столицы.

В годы войны коллектив завода «Динамо», возглавляемый И.Т.Скиданенко, 15 раз получал переходящее «Красное Знамя» Госкомитета обороны за успешное выполнение заданий по производству снарядов и минометов, большой ио-

менклатуры военной электротехники, а также по ремонту танков. Всего два месяца потребовалось динамовцам, чтобы организовать производство траков для обезвреживания вражеских магнитных мин в морских и речных фарватерах. Прежде всего это нужно было на Волге после Сталинградской битвы для обеспечения безопасности караванов с нефтью из Астрахани. Уже в конце 1942 г. было начато производство рудничных электровозов для Подмосковного угольного бассейна и освобождаемых шахт Донбасса. На протяжении всей войны держал переходящее «Красное Знамя» Госкомитета обороны коллектив завода «Москабель», и оно было передано ему на вечное хранение за бесперебойный выпуск силовых кабелей, телефонных полевых кабелей, освоение производства эмальпроводов и выпуск другой продукции, необходимой фронту и тылу. На базе эвакуированных заводов Украины, Северного Кавказа были организованы предприятия в Свердловске, Ташкенте, Куйбышеве, Томске, Уфе и других городах глубокого тыла. Благодаря целеустремленной и настойчивой деятельности специалистов и руководителей кабельной промышленности были созданы новые высокотехнические изделия для различных видов военной техники Армии и Флота. В этой важной и успешной работе проявили себя П.Н.Горшков, К.Ф.Сафонов, П.Г.Королев, М.С.Куцевол, С.Я.Медлин, А.Т.Ухорский, М.Ф.Еременко.

Научно-технический потенциал московских электротехников был сосредоточен в стенах ВЭИ и его опытно-экспериментального завода, где создавались многие оригинальные конструкции боевой техники. Руководил этим центром во время войны известный специалист М.Ф.Костров. В предельно короткие сроки здесь были разработаны системы освещения всех видов самолетов и морских кораблей. Собственными силами сотрудники ВЭИ оснастили сигнальными и осветительными приборами 35 полков истребительной и бомбардировочной авиации. По заданию Госкомитета обороны были созданы прожекторные углы специального состава, позволившие повысить яркость электрической дуги на 60%, чего не смогли добиться зарубежные специалисты ведущих стран.

За создание новых пеленгаторов, специальных высоковольтных аппаратов военного назначения и другой техники Государственной премии СССР были удостоены В.Л.Грановский, Г.В.Бушкевич, А.М.Бронштейн.

Под руководством директора опытно-экспериментального завода ВЭИ А.Н.Барканова уже в начале войны была разработана и освоена сложнейшая технология изготовления корпусов для реактивных снарядов, затем было организовано производство биноклей ночного видения и специальных «выочных» электростанций для инже-

перно-технических войск.

Решением Наркомата электропромышленности в начале войны был организован экспериментальный завод, директором которого был назначен Андроник Гевондович Иосифян, возглавлявший до этого машиноаппаратную лабораторию в ВЭИ. Уже в ноябре 1941 г. завод, созданный буквально на голом месте, начал выпускать нужную фронту продукцию — это были подрывные динамомашины, противотанковые «прыгающие» мины, переносные электростанции разных типов (мотор-генераторные с приводом от бензодвигателей, а также с ручным и ножным приводом) для питания радиопередатчиков, зарядки аккумуляторов, освещения помещений медицинских и штабных объектов.

Успешно велись работы по преобразованию тепловой энергии в электрическую, завершившиеся созданием термогенераторов. Комбинированные источники питания и радиостанции, созданные на их основе, оказались незаменимыми в партизанских отрядах. Именно в эти годы А.Г. Иосифян в соавторстве с Д.В. Свечарником создали первый в мире бесконтактный сельсин-датчик, питающий одновременно восемь сельсинов-приемников. Бесконтактные сельсины получили массовое применение в авиации. Под руководством профессора К.А. Андрианова был разработан состав самовоспламеняющейся жидкости, широко применявшейся на фронте для борьбы с вражескими танками.

В сжатые сроки были разработаны и изготовлены агрегаты питания для гирокомпасов и специальные электродвигатели для морских торпед, безламповые морские миноискатели и многие другие виды военной техники для фронта.

Только в 1943—1944 г. завод выпустил десятки тысяч постоянных магнитов большой силы для мин. За разработку и оперативное освоение производства серии специальных электрических машин для морского флота Н.А. Оболенский, Т.Г. Амбарцумов и другие специалисты Экспериментального завода были удостоены звания лауреата Государственной премии СССР. Под руководством А.Г. Иосифяна был создан огромный научно-технический потенциал электротехнической отрасли, основой которого стали незаурядные специалисты — конструкторы, технологии, ученые, прошедшие боевую школу Экспериментального завода. Их имена навсегда вписаны в историю отечественной электротехники. Это К.А. Андрианов, А.С. Займовский, А.П. Казанцев, В.В. Усов, Н.Н. Шереметьевский, Б.М. Каган, Н.А. Оболенский, Т.Г. Амбарцумов, Н.Я. Альпер, С.В. Шишкян, П.В. Исаев, Л.Л. Лавринович, А.А. Шотман, М.Т. Геворкян, Т.Г. Сорокер, И.Е. Сахаров, В.В. Алексеевский и многие другие. Ими был создан богатейший научный и конструкторский

задел на перспективу. В числе наиболее значительных разработок — новые конструкционные материалы и сплавы, электроизоляционные материалы (в частности — эмалевая изоляция винифлекс для обмоток электрических машин, электроизолирующие лакоткани на основе лаков без растворителей, теплостойкий лак для стекломиканита). Именно в стенах экспериментального завода были впервые созданы металлокерамические контакты высокой надежности взамен сереброодержащих. В эти трудные, но незабываемые годы сотрудники ВНИИЭМ, фактического научно-технического центра электротехнической промышленности в зоне rationalного использования электроэнергии, обосновали необходимость и начали создание серийных и массовых изделий в соответствии с едиными принципами стандартизации энергетических, эксплуатационных и конструктивных параметров и показателей. Еще в годы войны здесь началось серийное производство электрических машин, в том числе асинхронных двигателей серии Д-2 и Д-3 для станкостроения и обрабатывающей промышленности, а также электроэррозионных установок, положивших начало новой технологии металлообработки. Для нужд столицы завод выпускал специальную серию электродвигателей «Москва». Многое сделал этот коллектив и для восстановления разрушенноговойной народного хозяйства. По инициативе А.Г. Иосифяна на Ереванском заводе Наркомата электропромышленности развернулось серийное производство электрогенераторов для сельских электростанций, сыгравших большую роль при восстановлении сельского хозяйства в освобожденных районах. Разработанные в годы войны столичными электротехниками сельсиноследящие системы, а также двухкаскадные электромашинные усилители (амплидины) стали широко применяться в послевоенный период — в системах автоматизированных электроприводов самого различного назначения.

И в заключение хочется привести слова маршала Г.К. Жукова из его книги «Воспоминания и размышления». Описывая разгром берлинской группировки немецко-фашистских войск, он пишет:

«По сигналу разноцветных ракет вспыхнули 140 прожекторов, расположенных через 200 метров. Более ста миллиардов свечей осветило поле боя, ослепляя противника и выхватывая из темноты объекты атаки для наших танков и пехоты. Картина эта была огромной впечатляющей силы, и, пожалуй, за всю свою жизнь я не помню равного ощущения».

В этих словах маршала отражен результат самоотверженного труда работников электротехнической промышленности. Прожекторы, освещавшие почти 30 км фронта, были изготовлены

на Московском прожекторном заводе. Источником света в них стали светотехнические угли, созданные кудиновским заводом «Электроугли». Разработчики нового вида углей для дуговых прожекторных ламп сверхвысокой интенсивности горения Н.А. Калякин, М.В. Воропанов, В.И. Гаврилин и Ф.М. Малащенко были удостоены Государственной премии СССР.

Таким образом, вклад электротехнической промышленности в нашу победу велик и многоизначителен как по своему содержанию, так и по фактическим результатам.

И сегодня — на пороге самого яркого всенародного праздника — 50-летия Великой Победы мы с глубочайшим уважением вспоминаем тех, кого уже нет с нами.

## ВНИИэлектропривод — годы войны

М.Г. ЮНЬКОВ, доктор техн. наук

Шестого августа 1942 г. распоряжением Государственного Комитета Обороны был создан Государственный союзный проектно-монтажный трест (ПМТ). Трест был укомплектован высококвалифицированными кадрами по электрическим машинам, электроаппаратуре, электроприводу, монтажу и наладке электрооборудования, а также квалифицированными мастерами, обмотчиками, сборщиками и рабочими других специальностей, эвакуированных с ХЭМЗ и завода «Электросила».

Этим распоряжением тресту ПМТ были поручены важнейшие работы по восстановлению электрооборудования, эвакуированного с Украины и других территорий, ставших зоной военных действий.

Шестое августа 1942 г. и является датой рождения организации, носящей ныне название ВНИИэлектропривод.

Уже в первые недели войны основные промышленные районы были оккупированы или оказались в прифронтовой полосе и Советский Союз практически лишился крупной промышленной базы вообще и электротехнической в частности.

Государственный Комитет Обороны предписывал в кратчайшие сроки провести демонтаж оборудования, перемещение его в восточные районы страны, монтаж на новом месте и обеспечение его функционирования.

Создание военно-промышленной базы на Урале и Сибири страны — такова была стратегическая задача обеспечения армии необходимым вооружением.

Деятельность коллектива проектно-восстановительного треста, а затем треста «Электропривод» условно можно разделить на три периода:

I. Восстановительные работы эвакуированного электрооборудования в Восточных районах страны (1942—1944 гг.).

II. Восстановительные работы электрооборудо-

вания на освобожденной территории (1943—1948 гг.).

III. Монтаж и наладка электрооборудования, полученного по reparациям (1945—1948 гг.).

В первый период коллектив треста сосредоточил свои усилия в первую очередь на работах по восстановлению эвакуированного электрооборудования металлургического производства на Урале и в Сибири.

В первые месяцы войны металлургические заводы Приднепровья, Донбасса, Центральной части, Ленинграда оказались в зоне оккупации и военных действий. Из 37 мощных механизированных доменных печей и 15 блюмингов, работавших в СССР перед началом войны, 27 доменных печей и 9 блюмингов оказались в этой зоне и прекратили работу.

Из 370 крупных прокатных электрических двигателей черной металлургии СССР (не считая специальных трубопрокатных станов) общей мощностью около 600 тыс. л. с. в зону оккупации и военных действий попало 235 двигателей общей установленной мощностью 350 тыс. л. с.

Большое количество другого электрооборудования оказалось в таком же положении.

Через несколько недель после начала военных действий эвакуировали электрооборудование строящихся металлургических агрегатов, в том числе: главные приводы блюмингов заводов «Криворожсталь» и «Азовсталь», толстолистовых станов Мариупольского и других заводов. Из действующих станов в первую очередь эвакуировали электрооборудование новых станов; импортное электрооборудование блюминга завода имени Дзержинского, прокатных станов заводов «Днепропресссталь», «Запорожсталь», Макеевского. Следует отметить, что демонтаж и отправка на Восток проходили в прифронтовой обстановке, часто под артиллерийским обстрелом и бомбежками. Поэтому эвакуированное электрооборудование в

большинстве случаев было разрознено и не укомплектовано многими необходимыми деталями. Электрооборудование в местах эвакуации грузилось на открытые платформы в спешке, без упаковки, подвергаясь всем видам атмосферного влияния. В конечных пунктах разгрузки электрооборудование хранилось, как правило, под открытым небом. Часто узлы и детали электрооборудования оказывались далеко от мест назначения и их приходилось длительное время разыскивать, а часть просто пропадала.

Восстановление электрооборудования проходило непосредственно на строительных площадках, в неприспособленных помещениях, а во многих случаях под открытым небом, обычно у мест установки электрооборудования.

Это было время великой творческой импровизации электротехников в необычайно тяжелых условиях работы каждого участника процесса восстановления электрооборудования, его монтажа, наладки и пуска. За время первого этапа было восстановлено эвакуированное электрооборудование, на его основе разработан проект и осуществлен пуск электроприводов прокатного стана Новосибирского металлургического завода, реконструирован блюминг № 3 Магнитогорского металлургического комбината для прокатки танковых броневых листов и т. д.

Было восстановлено и осуществлен монтаж электрооборудования для доменных и мартеновских печей, ремонт и монтаж крупных преобразовательных агрегатов для питания электролизных ванн на сооружающихся алюминиевых и магниевых заводах Сибири и Урала, а также выполнено много других неотложных работ.

При этом следует иметь в виду, что главными объектами деятельности коллектива были восстановление, монтаж и наладка наиболее сложного и уникального электрооборудования, где требовалось не только технические знания и опыт, но и умение в невероятно тяжелых условиях правильно организовать свой труд и труд коллектива.

Государственный Комитет Обороны высоко оценил труд коллектива треста. Многие работники за самоотверженный труд были награждены орденами и медалями, среди них А.И. Бертинов, Б.А. Зильберштейн, П.Г. Чернышев, Н.А. Тищенко, А.А. Будяков, В.В. Гиршберг, В.С. Тулин и др.

Самоотверженно трудились на восстановлении, монтаже и наладке электрооборудования Б.Р. Гендельман, И.В. Неручев, Г.И. Суворов, Н.М. Филин, В.С. Александров и многие другие.

Второй этап деятельности коллектива треста начался после освобождения временно оккупированных территорий. В первую очередь восстановительные работы проводились на заводах черной и цветной металлургии, угольных шахтах, Вологодская областная универсальная научная библиотека

объектах энергетики.

Сразу же после освобождения Сталинграда в феврале 1943 г. началось восстановление электрооборудования прокатных станов завода «Красный Октябрь». Это была исключительно сложная и необычная задача, так как повреждения электрооборудования были настолько велики, что в обычных условиях такое оборудование восстановить невозможно.

Так, прокатный двигатель блюминга мощностью 7000 л.с., 50/120 об/мин находился в завалах, имел снарядные и бомбовые, а также пулевые попадания, в том числе и в коллектор. Устройство управления и другое электрооборудование практически полностью было разрушено. Трудности восстановительных работ усугублялись тем, что в районе завода «Красный Октябрь», да и во всем Сталинграде, не сохранилось ни одного здания, где можно было бы немедленно разместить ремонтно-восстановительные мастерские. А зима в тот год в Сталинграде стояла суровая. Поэтому пришлось начинать работу со строительства мастерской и ее оборудования, со строительства жилья.

Несмотря на все трудности, коллектив треста за два с половиной года к августу 1945 г. восстановил электрооборудование блюминга, листопрокатного стана «2200», тонколистового стана, стана «1700», обжимного стана «325», проволочного стана «265» листоотделочного цеха и других объектов, что позволило начать работу всем цехам завода. Кроме того, коллектив треста проводил восстановительные работы и на других предприятиях Сталинграда — тракторном, химическом, на электростанциях.

В течение 1943—1945 гг. было восстановлено электрооборудование семи крупных доменных печей Донбасса и Приднепровья.

С освобождением Запорожья тресту было поручено провести восстановительные работы на заводе «Запорожсталь». Разрушения на этом заводе были не меньше, чем на заводе «Красный Октябрь», а объем восстановительных работ в шесть раз больше.

Восстановлению подлежало электрооборудование, оставшееся после оккупации и резактивированное с Урала и Сибири, которое пролежало там под открытым небом и было частично разукомплектовано.

Несмотря на огромные разрушения и трудности, с которыми пришлось столкнуться, коллектив треста выполнил государственную задачу. В 1947 г. было восстановлено электрооборудование для слябинга, тонколистового стана, стана непрерывной холодной прокатки, и они былипущены в эксплуатацию.

За восстановление завода «Запорожсталь» группа работников треста награждена орденами и ме-

далями, среди них: Б.М. Эпштейн, Ю.А. Маслов, Н.А. Тищенко, А.И. Бобров, И.Г. Нестеренко, С.В. Хмельницкий, Н.М. Филин и др.

Кроме того, работники треста принимали активное участие в восстановлении главных производов блюмингов заводов Макеевского, им. Дзержинского. Здесь самоотверженно работали В.С. Александров, О.В. Слежановский, И.В. Неручев, И.А. Могилевцев и др.

Исключительно важная роль отводилась тресту при восстановлении шахт Донбасса. Известно, что до Отечественной войны Донбасс был основным угледобывающим районом Советского Союза. На его долю приходилось 52% всей добычи угля и 75% добычи коксующихся углей.

Во время оккупации и при отступлении фашисты практически разрушили все шахты Донбасса, взорвали и затопили горные выработки, уничтожили все энергетические и промышленные сооружения на поверхности. Предстоял колоссальный объем восстановительных работ шахт и шахтного хозяйства. Только по электроэнергетике надо было ввести более 1000 трансформаторных подстанций, требовалось большое количество разного рода электрооборудования общепромышленного и взрывозащищенного исполнения. Такого количества электрооборудования в военное время страна не могла дать Донбассу. Необходимо было использовать восстановленное электрооборудование, а темпы его восстановления должны были значительно опережать темпы восстановления сооружений.

В первую очередь было восстановлено электрооборудование насосов для откачки воды из шахт, затем электрооборудование (2000 комплектов) стационарных установок на поверхности шахт. И, наконец, восстановили электрооборудование подземных механизмов стационарного и передвижного типа.

До 1947 г. было отремонтировано и сдано в эксплуатацию крупных электрических машин более 5000 единиц, трансформаторов более 1200 единиц.

При восстановлении шахт Донбасса инженеры и рабочие проявили много творческой инициативы, что позволило значительно ускорить темпы восстановления Донецкого бассейна, за что в 1948 г. была присуждена Государственная премия. Лауреатом Государственной премии стал В.С. Тулин — главный инженер треста. Многие работники из числа непосредственно принимавших участие в этих работах были награждены орденами и медалями и другими знаками отличия. Среди них — А.Г. Ефанов, В.Е. Католиков, В.С. Громов, И.С. Моцхейн, В.М. Берловский, В.С. Криц, Е.А. Шклярук и др.

Восстановление предприятий металлургической и угольной промышленности и других от-

раслей, разрушенных оккупантами в южных районах СССР, потребовало опережающими темпами восстановить энергетическое хозяйство этих районов. Когда еще части Советской Армии вели тяжелые бои по освобождению Донбасса, Государственный Комитет Обороны в сентябре 1943 г. создал специальную комиссию по обследованию масштабов разрушения и определения объемов работ по восстановлению энергетики.

Непосредственное участие в работе комиссии принимал представитель треста Ю.А. Маслов. За короткий срок были обследованы Зуевская, Кураховская, Штеровская, Ворошиловоградская, Лисичанская, Шахтинская, Артемовская ГРЭС и др. Ремонтно-восстановительные работы начались уже в процессе работы комиссии. Разрушения электроэнергетического оборудования были исключительно велики. Решением Народного комиссариата электропромышленности коллективу треста были поручены работы по восстановлению, ремонту и монтажу турбогенераторов и крупных электрических машин. При восстановлении каждой машины приходилось решать, как правило, самые неожиданные задачи большой технической и производственной сложности.

Для изготовления многих разрушенных деталей приходилось непосредственно на месте разрабатывать чертежи, используя для этой цели обломки деталей, так как на импортное оборудование чертежи были утеряны. Несмотря на огромные трудности, коллектив треста совместно со специалистами смежных профессий восстановил и сдал в эксплуатацию турбогенераторы общей мощностью около 2,5 млн. кВт.

Среди этих работ особое место занимает восстановление турбогенераторов Зуевской ГРЭС мощностью 100,0 тыс. кВт, поставки ХТГЗ и двух турбогенераторов мощностью по 50,0 тыс. кВт фирмы «Метро-Виккерс». Были также восстановлены три турбогенератора мощностью по 10,0 тыс. кВт каждый на Баксанской ГЭС.

Кроме того, коллектив треста принимал непосредственное участие в восстановлении электрооборудования на Днепрогэсе, на Артемовской, Кураховской и других станциях. В марте 1945 г. тресту поручили восстановление турбогенераторов Варшавской электростанции. Пять турбогенераторов по 5,0 тыс. кВт каждый фирмы АЭГ и два по 22,0 тыс. кВт фирмы BBC были восстановлены до конца 1945 г.

За восстановление электростанций Донбасса, Приднепровья и юга России многие инженеры, монтажники, наладчики и рабочие других специальностей были награждены орденами и медалями СССР. Среди них следует отметить: Д.А. Можинского, А.И. Каторгина, А.В. Деблера, Г.Я. Шапиро, Н.И. Дьякова, Г.П. Гладухова, Е.В. Сытниковой, Н.В. Голованова и др.

За участие в восстановительных работах в г. Варшаве польскими орденами и медалями были награждены Г.П. Гладухов, Б.А. Зильберштейн, П.Н. Царьков, В.В. Гиршберг и др.

С конца войны и в первые послевоенные годы трест наряду с восстановлением разрушенного и резактивированного электрооборудования осуществлял монтаж и наладку электрооборудования, вывезенного в 1945 г. из Германии и Маньчжурии в целях репараций для частичной компенсации ущерба, нанесенного войной СССР.

Такое оборудование было установлено и введено в эксплуатацию на Днепровском алюминиевом заводе, на Ангарском комбинате, на Magnitogorskem и Челябинском металлургических заводах, на заводе им. Дзержинского и других предприятиях. Это был период освоения электротехники передовых иностранных фирм, внедрение ее в производство, как правило, без чертежей и квалифицированных консультаций.

Однако опыт предыдущих лет помог коллективу специалистов треста найти решение и в этом случае. Практически все электрооборудование, полученное по репарациям, было целесообразно использовано при восстановлении раз-

рушенного войной народного хозяйства. В статье перечислена самая малая часть проделанного коллективом треста.

Оглядываясь на пройденный путь, можно сказать, что рожденная в самые тяжелые месяцы Великой Отечественной войны организация выполнила поставленную перед ней задачу, внесла свой вклад в решение общей военно-экономической задачи, в дело победы над врагом.

В те трудные годы коллектив треста укреплялся и развивался и в конце войны это был многотысячный высококвалифицированный коллектив научных работников, инженеров, техников, монтажников, наладчиков со своим производством в различных регионах страны — в Москве, Запорожье, Донбассе, Александрии, Харькове, Ангарске.

В послевоенный период коллектив треста постепенно переключился на новые разработки по электроприводам для ведущих отраслей промышленности и сельского хозяйства.

И сегодня ВНИИЭлектропривод — АО «Электропривод» продолжает активно работать в лучших традициях, заложенных старшим поколением в годы Великой Отечественной войны.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### Асинхронные взрывозащищенные электродвигатели с повышенной перегрузочной способностью

В.А. ЧУВАШЕВ, Т.С. ЮРГЕНСОН, кандидаты техн. наук,  
В.Ю. ЧУВАНКОВ, А.В. ЖЕЛЕЗНИКОВ, Н.П. ЖУК, инженеры

Интенсификация горных работ по добыче ископаемых источников энергии заставляет ученых совершенствовать конструкции горных комбайнов. Взрывозащищенные короткозамкнутые асинхронные двигатели (ВАД) являются основой электропривода очистных комбайнов, машин и механизмов угольной промышленности. Требования к ним, их значимость и роль неуклонно возрастают. Особую остроту приобретают проблемы увеличения мощности и энергетических показателей отечественных комбайновых и струговых ВАД, снижения их материалоемкости и трудоемкости, повышения эксплуатационной надежности. Поэтому основным направлением деятельности НПО «Взрывозащищенное электрооборудование» и его головной структурной единицы УкрНИИВЭ (г. Донецк) с опытно-экспериментальным производством является создание, модернизация и совершенствование электрических машин во взрывозащищенном и рудничном исполнении.

Вологодская областная научная библиотека

исполнении, предназначенных для использования в горнодобывающей, нефтяной, газовой, нефтехимической отраслях промышленности.

В последние пять лет существенно обновлено взрывозащищенное электрооборудование и внедрены в производство более совершенные и надежные серии электрических машин.

В статье кратко рассказано о работе по совершенствованию и модернизации серий ВАД на примере ЭКВ 4-160.

Предварительный анализ конструкции, механических характеристик, тепловых мощностей и концепций проектирования ВАД зарубежного и отечественного производства и исследование влияния вариаций режимов очистных комбайнов и стругов на характеристики ВАД позволили оценить пути повышения перегрузочной способности и вращающих моментов ВАД, совершенствовать методы их проектирования при учете максимального теплового использования материалов.

Обычные характеристики АД рассчитываются исходя из активных сопротивлений обмоток при так называемой расчетной рабочей температуре согласно ГОСТ 183-74, т. е. в нагретом состоянии. При этом расчетная рабочая температура изоляции обмоток классов нагревостойкости F и H независимо от фактических значений температуры окружающей среды, степени загрузки двигателя и интенсивности его охлаждения принимается равной 115°C.

Это значение температуры соответствует примерно среднестатистическим значениям температуры обмоток двигателей общего назначения со средним уровнем использования активных частей, т. е. двигателей с воздушным охлаждением и необдуваемых, при разработке которых отсутствуют жесткие ограничения предельно-допустимых габаритных размеров.

Неучет взаимовлияния реальной температуры, активных сопротивлений и потерь энергий в обмотках на технические характеристики приводит к значительным погрешностям в расчетах двигателей с интенсивными способами охлаждения и ограниченными габаритами, например, с водяным охлаждением статора, применяемым в электрических машинах для взрывоопасных производств. При этом затрудняется объективная оценка весомости некоторых улучшающих факторов, важным из которых является замена литой алюминиевой обмотки ротора литой из сплавов повышенной электропроводности.

Исследования показали целесообразность изготовления короткозамкнутой литой обмотки ротора из меди. Заливка роторов медью затруднена из-за наличия массивного сердечника ротора, малой массы заливаемой меди, низкой жидкотекучести и высокой окисляемости расплавленной меди. Была разработана оригинальная технология производства литых медных короткозамкнутых обмоток для роторов ВАД [1], учитывающая, что сердечник ротора представляет собой часть литьей формы, и обеспечивающая заполнение расплавленной медью по всей длине ротора. Особое внимание уделялось качеству сборки сердечника ротора и его опрессовке.

Использовался статический способ заливки с наклонным расположением ротора и индукционной плавкой меди. Это позволяет быстро получать расплав и легко вводить в его состав специальные добавки, предупреждающие окисление металла. Электромагнитное перемешивание обеспечивает интенсивную дегазацию расплава. Сердечник ротора, напихтованный на оправку, нагревают и устанавливают в форму для заливки, при этом литник и выпор расположены на заливочных формах короткозамыкающих колец.

Расплавляют медь, снимают пленку флюса с зеркала расплава и быстро монтируют струей за-

ливают металл в форму. Заливка прекращается когда выпор наполняется медью. Плавка ведется с расчетом одновременной готовности к заливке металла и формы, покрытой специальным защитным слоем.

После окончания заливки форма и сердечник ротора остывают и примерно через 30—40 мин разъединяются. С короткозамыкающих колец удаляются литник и выпор. С каждой плавки берут пробу для химического анализа.

Предложенный технологический процесс позволяет получить качественные отливки роторно-обмотки ВАД. По плотности и свойствам сплава меди в короткозамкнутой обмотке ротора превосходит катодную медь.

Дальнейшее совершенствование ВАД было связано с воздействием на его механическую характеристику для получения ее рациональной формы.

Из основных соотношений для асинхронных электродвигателей:

$$M_k = \frac{3U_\Phi^2}{\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}]} ; \quad (1)$$

$$s_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_p^2}} , \quad (2)$$

где  $M_k$  — критический момент двигателя;  $U_\Phi$  — фазное напряжение;  $\omega_0$  — синхронная частота вращения;  $R_1$  и  $X_1$  — активное и индуктивное сопротивление обмотки статора;  $R_2'$  и  $X_2'$  — приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора;  $X_p$  — индуктивное сопротивление двигателя в рабочем режиме;  $s_k$  — критическое скольжение ротора, видно, что увеличение вращающих моментов электродвигателя возможно путем уменьшения сопротивления роторной обмотки.

Этого можно достигнуть применением роторов с различными формами пазов, материалами короткозамкнутой обмотки и способами ее изготовления.

Расчеты показали, что максимум врачающего момента и возможность уменьшить или полностью устраниТЬ пропуски в механической характеристике асинхронного двигателя при уменьшении номинального скольжения и некотором увеличении номинальной мощности можно получить при соблюдении равенства

$$\frac{R_2'}{s_k} = \sqrt{R_1^2 + X_p^2} . \quad (3)$$

Обычно это условие выполняется при  $M=M_k$  и  $s=s_k$ . При скольжении  $s$ , не равном критическому  $s_k$ , баланс левой и правой частей нарушается. Так, изменение скольжения от 1 до  $s_k$  вызывает уменьшение левой части, а при скольжении, которое находится в зоне от  $s_k$  до 0 — левая часть больше правой.

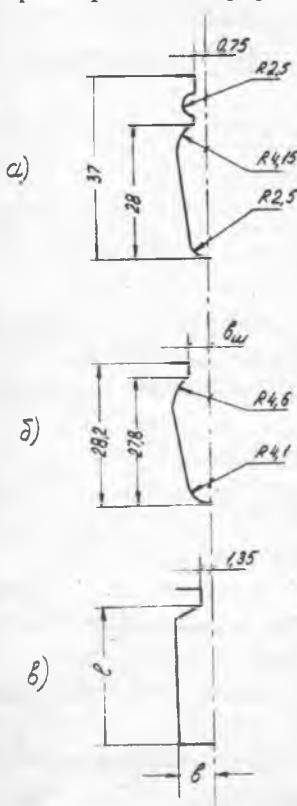
Провалы механической характеристики имеют место в зоне изменения скольжения от 1 до  $s_k$ . Поэтому можно утверждать, что у двигателя с двухклеточным ротором или с глубокими пазами ротора провал механической характеристики имеет место при условии, когда левая часть равенства (3) в наибольшей степени отличается от его правой части. Провал отсутствует, когда разница между правой и левой частями равенства (3) стремится к нулю.

Расчетными и экспериментальными методами были улучшены механические характеристики, увеличены мощности, перегрузочные способности, КПД и коэффициент мощности путем подбора сочетаний стержней и пазов ротора, применения глубоких пазов при относительно небольшой высоте стержней роторной обмотки и оригинальной технологии изготовления литой медной клетки ротора из отходов производства (медного лома) [2].

Покажем совершенствование серийного ВАД типа ЭКВ 4-160 с водяным охлаждением мощностью 160 кВт, напряжением 660 В с синхронной частотой вращения 1500 об/мин.

Отмена в 1988 г. стандарта на ограничение начального пускового тока ВАД в связи с переходом на новую аппаратуру в шахтной сети позволила поднять напряжение ВАД до 1140 В, увеличить начальный пусковой ток до 1900 А и тем самым повысить критический врачающий момент и перегрузочную способность ВАД.

Для решения поставленной задачи были изготовлены роторы с разными формами (рисунок)



и размерами пазов, а их обмотки из разных материалов и разными способами. В табл. 1 даны размеры паза, материал обмотки и способ ее изготовления.

Для оценки варианта использовались следующие критериальные функции:

$M_n$  — номинальный момент ВАД в заданном режиме работы;  $\eta$  — КПД;  $\cos\varphi$  — коэффициент мощности;  $s$  — скольжение номинальное;  $\theta_{ct}$  — превышение температуры обмотки статора;

$k_d = \frac{M_{n,p} + M_k}{I_{n,p}}$  — коэффициент добротности ВАД, где

$M_{n,p}$  и  $I_{n,p}$  — начальные пусковые момент и ток;  $G = c(P_1/n)^{2/3}$  — показатель массы ВАД, где  $P_1$  — потребляемая мощность ВАД;  $n$  — частота вращения;  $G$  — масса;  $c$  — коэффициент пропорциональности, для 1990 г.  $c=4$ ;  $Q$  — металлоемкость и стоимость изготовления короткозамкнутой обмотки ротора ВАД.

Таблица 1

Управляющие факторы поиска

Вариант	Форма паза (рисунок)	Размеры, мм			Материал обмотки ротора	Технология изготовления обмотки ротора
		$b_{ш}$	$l$	$b$		
1	a	—	—	—	Алюминий	Литье
2	b	0,75	—	—	Медь	Литье
3	b	0,75	—	—	Медь	Литье
4	b	0,75	—	—	Алюминий	Литье
5	b	1,5	—	—	Медь	Литье
6	b	—	22	2,3	Медь	Сварка
7	b	—	19	2,7	Медь	Сварка

В табл. 2 приведены критериальные функции в поиске оптимального варианта.

Оптимизационная задача выбора наилучшего варианта в условиях противоречивости и множества критериев решена методом разработки процедур, ориентированных не на решение поставленной математической задачи, а на последовательное выявление предпочтений проектировщиком вместе с определением допустимого множества действий. При этом эффективно использован метод построения многомерных таблиц испытаний, который позволяет судить, насколько плотно расположены точки испытаний в пространстве поиска по каждому из критериев, каков сравнительный диапазон изменения функций, и дает возможность построить иерархические ряды предпочтений. В табл. 3 показаны места, которые занимают варианты по каждому из критериев в иерархическом ряду качества.

Таблица 2

## Критериальные функции

Функция, размерность	Вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
$M_H$ , Н·м	1048	1039	1035	1050	1032	1049	1050
$\eta$ , %	91.2	92.8	92.6	91.8	93.0	91.04	91.1
$\cos \varphi$ , о.е.	0.73	0.83	0.83	0.83	0.817	0.804	0.83
$s$ , %	2,64	1,37	1,6	2,57	1,2	2,76	2,82
$\theta$ , °C	131	110	109	123	103	130	115,5
$k_D$ , о.е.	4,2	4,03	4,06	4,55	4,87	4,77	4,72
$G$ , о.е.	0,97	0,52	0,956	0,964	0,952	0,98	0,972
$Q$ , о.е.	1,0	1,05	1,05	1,0	1,05	1,31	1,31

Таблица 3

## Распределение мест

Критерий	Вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
$M_H$	3	4	5	1	6	2	1
$\eta$	5	2	3	4	1	7	6
$\cos \varphi$	5	1	1	2	3	4	2
$s$	5	2	3	4	1	6	7
$\theta$	7	3	2	5	1	6	4
$k_D$	5	7	6	4	1	2	3
$G$	4	1	2	3	1	5	6
$Q$	1	2	2	1	2	3	3
$\Sigma$	35	22	24	24	16	35	39

Матрица компромиссного решения выглядит так:

Вариант ВАД	5	2	3; 4	1; 6	7
Сумма мест $\Sigma$	16	22	24	35	39

Лучший вариант ВАД в данной задаче — вариант 5, так как он занял высокие места по большинству критериев.

Созданный ВАД имеет конструкцию и технологию изготовления роторной обмотки, которая обеспечивает увеличение критического врачающего момента в 1,5 раза по сравнению с базовым электродвигателем и рациональную форму механической характеристики. Несмотря на увеличение стоимости изготовления затраты окунаются снижением расходов на ремонт и убыток от простоев производства.

## Список литературы

1. А.с. 1072344 СССР. Способ изготовления литых короткозамкнутых обмоток роторов электродвигателей / В.Г. Костица, В.А. Чувашев, И.Г. Ширнин и др. // Открытия. Изобретения. 1984. № 5.
2. Чувашев В.А. Асинхронные двигатели угольных комбайнов с повышенной перегрузочной способностью // Тр. МЭИ. 1994. Вып. 665. С. 109—119.

## Математическое моделирование и автоматизированное проектирование однофазных асинхронных двигателей

Е.М. ЛОПУХИНА, Г.А. СЕМЕНЧУКОВ, В.Г. МАШКИН, кандидаты техн. наук,  
А.В. ПЛУЖНИКОВ, В.Г. ПИМЕНОВ, инженеры

Проектирование — итерационный процесс, при котором каждый синтезируемый проектировщиком вариант объекта проектирования (в данном случае однофазного синхронного двигателя) анализируется на модели, абстрактной или физической. Автоматизированное проектирование на всех своих этапах использует наиболее мобильную форму модели — математическую. В зависимости от конкретных задач используются как теоретические модели, основанные на сочетании различных методов теории цепей и расчета магнитного поля [1], так и информационные, полученные путем математической обработки результатов эксперимента на физических моделях.

Расчетные задачи, решаемые при автоматизированном проектировании однофазных асинхронных двигателей малой мощности, по своим целям те же, что и при проектировании трех-

трических машин других типов:  
оптимизационные расчеты;  
новерочные электромагнитные, тепловые и механические расчеты;  
расчеты, определяющие конструктивную структуру;  
оценка влияния технологического разброса;  
оценка надежности;  
расчет вибраакустических показателей.

Однако особенности однофазных асинхронных двигателей по-иному расставляют акценты, усиливая роль отдельных проблем. В частности, характерная для них асимметрия усиливает влияние высших гармонических на электромагнитный момент, в результате провалы в механической характеристике, колебания пускового момента могут достигать недопустимых значений. Для машин малой мощности существенно возрастает роль

технологического разброса, что заставляет обратить особое внимание на его математическую оценку.

На рис. 1 показан состав программного обеспечения, разработанного на основе предлагаемой многоуровневой математической модели. Оно охватывает наиболее распространенные схемы включения в однофазную сеть двухфазных и трехфазных обмоток асинхронных микродвигателей.

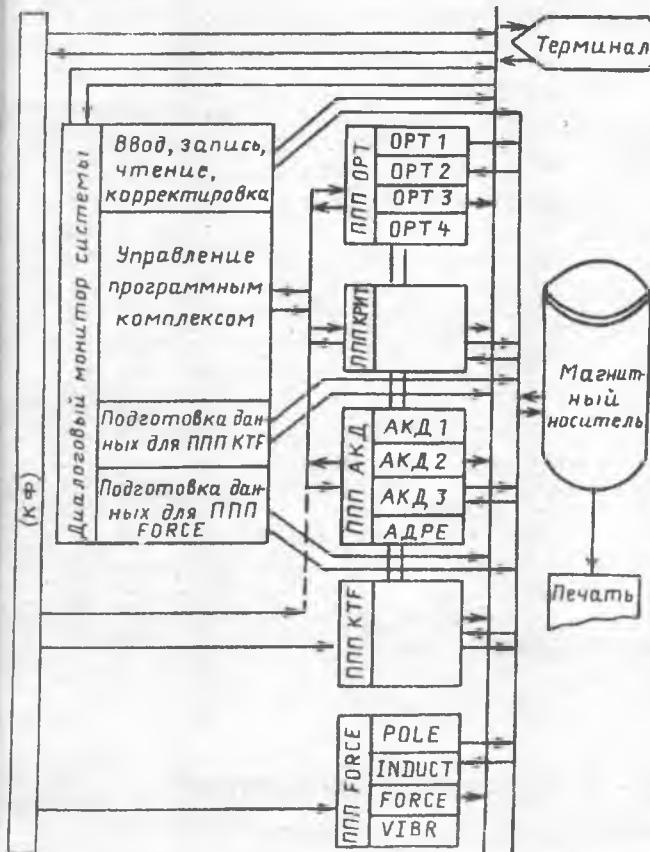


Рис. 1. Состав программного обеспечения автоматизированного проектирования одноФазных асинхронных двигателей. Оптимизационные (ОРГ, КРИТ) и поверочные (АКД, АДРЕ) расчеты для разных схем включения:  
1 и 2 — параллельная и последовательная схемы; 3 — трехфазная обмотка, включенная по схеме Штейнмеза;  
4 — обмотка с пусковой фазой

При поиске оптимального варианта электромагнитной подсистемы проектируемого двигателя программное обеспечение поддерживает технологию принятия решения проектировщиком, включающую в себя следующие этапы:

автоматическая однокритериальная предварительная оптимизация;

автоматизированные многокритериальные оптимизационные исследования в заданной области пространства независимых переменных;

пробные поверочные расчеты вариантов, синтезированных проектировщиком.

Состав и последовательность выполнения этих этапов могут быть произвольными по усмотрению проектировщика. При однокритериальной оптимизации синтез вариантов, их анализ и принятие

решения полностью выполняются машиной. Большое количество рассматриваемых вариантов предопределило использование упрощенной математической модели со следующими дополнительными допущениями:

расчет ведется по основной пространственной гармонической, высшие учитываются с помощью дифференциального рассеяния;

не учитывается неравномерность насыщения по осям, вызванная эллиптичностью магнитного поля;

уровень насыщения одинаков во всех режимах работы.

Кроме того, для обеспечения плавного характера поверхности отклика критерия оптимальности и ограничителей при варьировании независимых переменных принята непрерывная шкала диаметров обмоточных проводов. Все это заставляет считать полученный оптимальный вариант предварительным, своего рода отправной точкой для дальнейшего поиска.

Расчет электромеханических характеристик на последующих этапах выполняется с учетом высших пространственных гармонических магнитного поля, неравномерности насыщения по осям магнитной системы. Система уравнений токов для наиболее распространенного параллельного включения двухфазных обмоток, записанная на основе метода симметричных составляющих, имеет вид:

$$\begin{aligned} & J_{A1} [r_{SA} + j(x_{SA} + x_{m11} + \sum_{\nu} x_{mv1})] + J_{A2} [r_{SB} + \\ & + j(x_{SB} + x_{m12} + \sum_{\nu} x_{mv2})] + j(L_{R11} x_{m11} + \\ & + \sum_{\nu} L_{R1\nu} x_{mv1}) + j(L_{R12} x_{m12} + \sum_{\nu} L_{R2\nu} x_{mv2}) = U; \\ & jL_{A1} [r_{SB} + j(x_{SB} + k^2 x_{m11} + k^2 \sum_{\nu} x_{mv1} - x_C)] - \\ & - jL_{A2} [r_{SB} + j(x_{SB} + k^2 x_{m12} + k^2 \sum_{\nu} x_{mv2} - x_C)] - \\ & - k^2 (L_{R11} x_{m11} + \sum_{\nu} L_{R1\nu} x_{mv1}) + k^2 (L_{R12} x_{m12} + \\ & + \sum_{\nu} L_{R2\nu} x_{mv2}) = U_B k; \end{aligned}$$

$$jL_{A1} x_{m11} + L_{R11} \left[ \frac{r_{RA1}}{s_{11}} + j(x_{RA1} + x_{m11}) \right] = 0;$$

$$jL_{A2} x_{m12} + L_{R12} \left[ \frac{r_{RA1}}{s_{12}} + j(x_{RA1} + x_{m12}) \right] = 0;$$

$$jL_{A1} x_{m11} + L_{R\nu1} \left[ \frac{r_{RA\nu}}{s_{\nu 1}} + j(x_{RA\nu} + x_{m\nu1}) \right] = 0;$$

$$jL_{A2} x_{m12} + L_{R\nu2} \left[ \frac{r_{RA\nu}}{s_{\nu 2}} + j(x_{RA\nu} + x_{m\nu2}) \right] = 0.$$

Индуктивные сопротивления взаимной индукции обмоток статора и ротора и рассеяния закрытого паза ротора для токов прямой и обратной последовательности неодинаковы и определяются Вологодская областная научная библиотека

на основе магнитных характеристик, приведенных на рис. 2. При некоторых допущениях они оказываются равными тангенсам отмеченных углов  $\alpha_{m1}$  и  $\alpha_{m2}$ ,  $\alpha_{\sigma1}$  и  $\alpha_{\sigma2}$  (рис. 2).

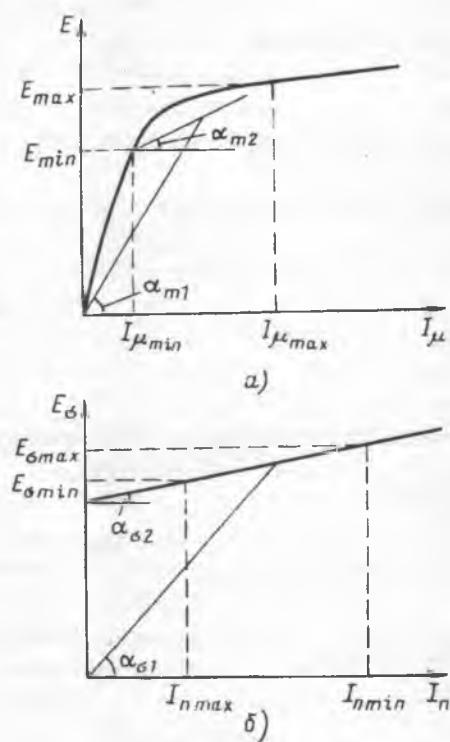


Рис. 2. Магнитные характеристики поля взаимной индукции обмоток статора и ротора (а) и поля рассеяния мостика закрытого паза (б)

Разработанное программное обеспечение дает возможность выполнять расчет характеристик однофазных асинхронных двигателей как в установленных режимах, так и в динамических, с учетом быстроизменяющихся сопротивлений, например, позисторов, и квазиустановившихся с переменной нагрузкой [2].

Большой технологический разброс выходных характеристик двигателя потребовал проведения их статистического анализа, определения информационной матрицы влияния на них входных конструкторско-технологических факторов. Использованные математические методы позволяют также оценить и влияние качества электроэнергии (отклонений напряжения и частоты).

Сильнее всего различного рода асимметрия оказывается у явнополюсных асинхронных микродвигателей, что проявляется в индуктивных связях контуров по ортогональным осям, контуров прямой и обратной последовательности и контуров ротора для гармонических различных порядков. Это значительно усложняет систему уравнений токов и расчет электромагнитного момента [3].

Для однофазных асинхронных двигателей весьма важной является задача математического мо-

делирования электромагнитных сил и моментов с учетом высших гармонических и токов расщепления между стержнями [4]. Анализ моментов от высших гармонических особенно важен для оценки показателей пускового режима, в первую очередь, провалов в механической характеристике и колебаний пускового момента. На рис. 3 и 4 приведены экспериментальные и расчетные механические характеристики и кривые изменения пускового момента двигателя АИРЕ56А2 при различных вариантах обмоток: однослойной и одно-двухслойной. Они дают возможность оценить точность предлагаемой математической модели, иллюстрируют эффективность одного из способов борьбы с колебаниями пускового момента.

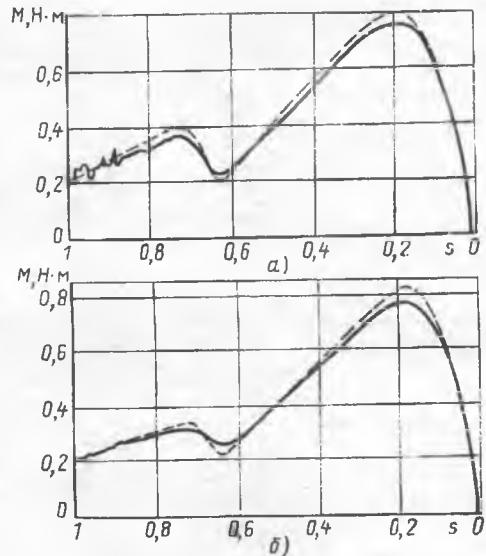


Рис. 3. Механическая характеристика двигателя АИРЕ56А2 с однослойной (а) и одно-двухслойной (б) обмотками (— расчет, - - - эксперимент)

Используемые методы анализа позволили получить аналитические выражения и для электромагнитных сил, действующих на каждый зубец статора.

Электромагнитные силы, действующие на  $i$ -й зубец статора:

тангенциальные при взаимодействии контуров статор-ротор:

$$F_{it} = \frac{p Z_2 D}{16} \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\hat{\psi}_v \omega_v (\nu-k) \hat{\psi}_i(\nu-k)}{Z_{\nu,-k}} \cos(k p \Omega t + \varphi_v - \varphi_{i(\nu-k)} + \varphi_{\nu,-k}) + \frac{\hat{\psi}_v \omega_v (\nu+k) \hat{\psi}_i(\nu+k)}{Z_{\nu,k}} \cos(k p \Omega t - \varphi_v + \varphi_{i(\nu+k)} - \varphi_{\nu,k}) - \frac{\hat{\psi}_v \omega_v (-\nu+k) \hat{\psi}_i(-\nu+k)}{Z_{\nu,-k}} \cos(k p \Omega t + \varphi_v + \varphi_{i(-\nu+k)} + \varphi_{\nu,-k}) - \frac{\hat{\psi}_v \omega_v (-\nu-k) \hat{\psi}_i(-\nu-k)}{Z_{\nu,k}} \times \right. \\ \left. \times \cos((k p \Omega + 2\omega)t - \varphi_v - \varphi_{i(-\nu-k)} - \varphi_{\nu,k}) \right\};$$

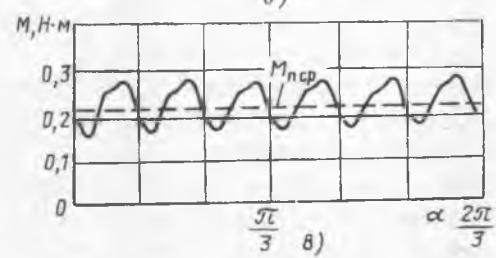
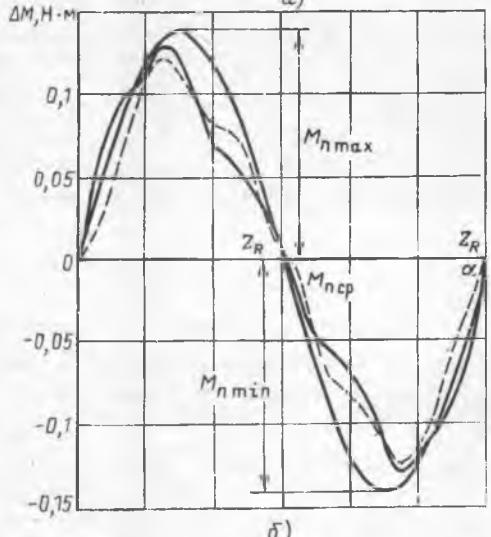
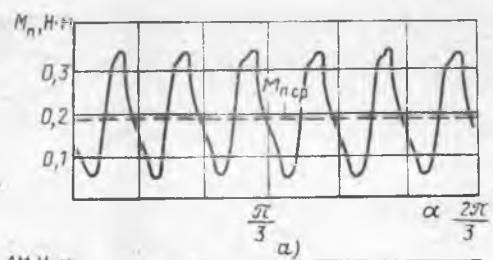


Рис. 4. Колебания пускового момента двигателя АИРЕ56А2 с однослойной (а, б) и одно-двуслойной (в) обмотками (— — расчет, — — эксперимент)

радиальные при взаимодействии контуров статор-ротор:

$$F_{IR} = \frac{Z_2}{8} \sum_k \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \left\{ \hat{\psi}_{\nu} \omega_{\nu} \frac{\partial \hat{\psi}_i(\nu-k)}{\partial \delta} \sin(kp\Omega t + \varphi_{\nu} - \varphi_{i(\nu-k)} + \varphi_{\nu,-k}) - \frac{\hat{\psi}_{\nu} \omega_{\nu} \frac{\partial \hat{\psi}_i(\nu+k)}{\partial \delta}}{Z_{\nu,k}} \sin(kp\Omega t - \varphi_{\nu} + \varphi_{i(\nu+k)} - \varphi_{\nu,k}) + \frac{\hat{\psi}_{\nu} \omega_{\nu} \frac{\partial \hat{\psi}_i(-\nu+k)}{\partial \delta}}{Z_{\nu,-k}} \sin((kp\Omega - 2\omega)t + \varphi_{\nu} + \varphi_{i(-\nu+k)} + \varphi_{\nu,-k}) - \frac{\hat{\psi}_{\nu} \omega_{\nu} \frac{\partial \hat{\psi}_i(-\nu-k)}{\partial \delta}}{Z_{\nu,k}} \sin((kp\Omega + 2\omega)t - \varphi_{\nu} - \varphi_{i(-\nu-k)} - \varphi_{\nu,k}) \right\};$$

радиальные при взаимодействии контуров статор-статор:

$$F_{IS} = \frac{1}{2} I_{Si}^2 \frac{\partial (L_{ih} + L_{jh})}{\partial \delta} (1 - \cos 2(\omega t - \varphi_i)) + \frac{1}{2} I_{Si}^2 \times \\ \times \sum_{h=1}^{\infty} \frac{\partial (L_{ih} - L_{jh})}{\partial \delta} \left[ \cos hZ_2 \left( \Omega t - \frac{(i-1)}{Z_1} 2\pi \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos \left( (hZ_2 \Omega + 2\omega)t - 2\varphi_i - \frac{hZ_2(i-1)}{Z_1} 2\pi \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cos \left( (hZ_2 \Omega - 2\omega)t + 2\varphi_i - \frac{hZ_2(i-1)}{Z_1} 2\pi \right) \right].$$

Неравномерность распределения магнитного поля (рис. 5) обусловила важность решения этой задачи. Амплитуды действующих на зубцы статора вибровозмущающих сил могут отличаться в несколько раз (рис. 6), поэтому ориентация расположения обмотки относительно опор оказывает заметное влияние на виброакустические показатели [4].

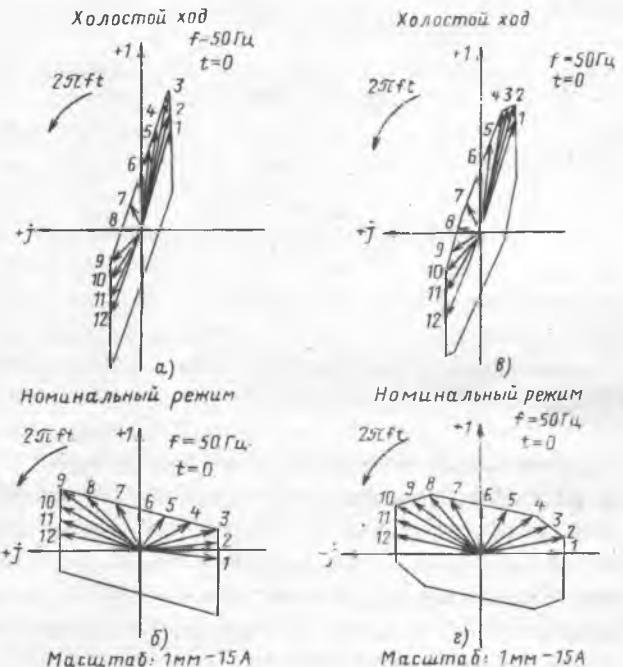


Рис. 5. Векторные диаграммы МДС зубцовых контуров статора двигателя АИРЕ56А2 с однослойной (а, б) и одно-двуслойной (в, г) обмотками

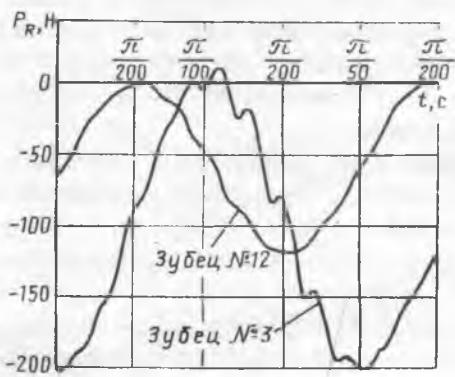


Рис. 6. Изменение мгновенных значений радиальных для зубцов статора двигателя АИРЕ56А2, испытывающих наибольшее и наименьшее воздействие в режиме холостого хода

**Информационные модели, полученные методами планирования эксперимента, используются для оценки показателей механической характеристики неуправляемых асинхронных двигателей, регулировочных свойств исполнительных двигателей [5].**

Разработанные математические модели применяются при создании САПР асинхронных двигателей малой мощности.

#### Список литературы

1. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Многоуровневая математическая модель и перспективы развития САПР асин-

хронных двигателей бытового назначения. // Электротехника. 1986, № 9.

2. Исследование квазистабилизированного режима работы асинхронного конденсаторного двигателя для герметичного роторного компрессора холодильника / Е.М. Лопухина, А.Хадж Ахмад, А.А. Овакимян, Г.А. Семенчуков // Электротехника. 1992, № 8.

3. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Чуев С.Г. Универсальная математическая модель асинхронного двигателя с экранированными полюсами // Электричество. 1986, № 4.

4. Лопухина Е.М., Машкин В.Л., Семенчуков Г.А. Расчеты электромагнитных моментов и вибровозмущающих сил несимметричных асинхронных двигателей методом индуктивных коэффициентов // Электричество. 1991, № 6.

5. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высшая школа, 1980.

## Оценка качества работы щеточного аппарата электрических машин приборами диагностического комплекса ДИАКОР

Ю.А. РОДИОНОВ, И.В. ПЛОХОВ, В.Е. ЕГОРОВ, И.Е. САВРАЕВ, кандидаты техн. наук, А.М. МАРКОВ, инж.

Псковский политехнический институт

Одним из наиболее ответственных узлов электрической машины является ее щеточно-контактный аппарат (ЩКА), который во многом определяет качество работы и срок службы машины в целом. Практика эксплуатации крупных электрических машин показывает, что надежная работа ЩКА может быть достигнута только при осуществлении регулярного контроля за его работой и проведении своевременных профилактических мероприятий. Однако в настоящее время на предприятиях промышленности и энергетики ощущается недостаток средств контроля за работой ЩКА. В связи с этим в Псковском политехническом институте в течение 1991–1994 гг. был разработан, изготовлен и испытан диагностический комплекс ДИАКОР [1], предназначенный для оценки качества работы ЩКА крупных электрических машин, например, двигателей и генераторов прокатных станов, турбогенераторов тепловых и атомных электростанций и т. д.

Комплекс ДИАКОР содержит в себе следующие средства контроля:

профилометр ПРОФИЛЬ, предназначенный для измерения рельефа рабочей поверхности коллектора (контактного кольца);

прибор КОНТРОЛЬ для измерения токов отдельных щеток;

прибор ПИКОН для определения стабильности контактирования щеток с коллектором (кольцом);

прибор ТЕРМИКС для измерения распределения температуры по поверхности коллектора (кольца).

Все измерения, выполняемые с помощью ком-

плекса ДИАКОР, проводятся бесконтактными методами без остановки электрической машины.

Состояние вращающейся контактной поверхности — один из основных факторов, влияющих на надежность ЩКА. В настоящее время состояние контактной поверхности оценивается обычно с помощью индикаторов часового типа, которые вследствие своей большой инерционности не могут обеспечить достаточную точность измерений при номинальных частотах вращения, составляющих 3000 об/мин для турбогенераторов и 375 об/мин для мощных двигателей и генераторов постоянного тока. Профилометр ПРОФИЛЬ предназначен для контроля качества контактной поверхности коллектора (кольца) на любых частотах вращения. Первичный преобразователь прибора представляет собой разомкнутый магнитопровод с обмоткой, который закреплен в специальной экранированной конструкции и подводится к исследуемой вращающейся поверхности либо с помощью микрометрического винта, либо с помощью сервопривода. Сигнал с обмотки пропорционален расстоянию от первичного преобразователя до контактной поверхности. Тарировка профилометра производится один раз за весь период эксплуатации прибора. Влияние вибраций на работу профилометра сведено к пулью специальными гасящими прокладками. Разрешающая способность прибора — 0,2 мкм.

В качестве примера на рис. 1 показана полная профилограмма коллектора генератора постоянного тока главного привода класти КВАРТО прокатного стана 5000 Санкт-Петербургского метал-

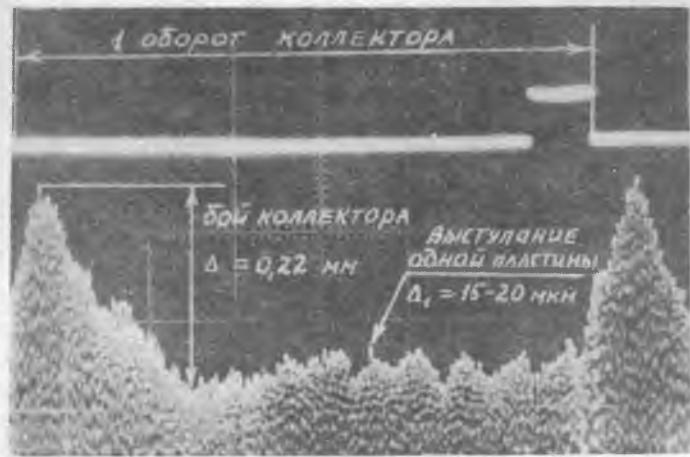


Рис. 1

лургического завода «Ижорасталь». Частота вращения коллектора 375 об/мин. Анализ профилограммы дает возможность определить бой коллектора  $\Delta=0,22$  мм, западание и выступание отдельных коллекторных пластин на  $\Delta_1=15\div20$  мкм. Профиль контактной поверхности можно наблюдать на экране осциллографа либо целиком, либо по частям для более подробного анализа состояния отдельных участков рельефа. На рис. 2 показаны фрагмент профиля коллектора, состоящий примерно из 70 коллекторных пластин, а также выступание отдельной коллекторной пластины на  $\Delta_1=20$  мкм. Аналогичные исследования профиля коллектора проводились на машинах ГП-8500 и ГП-9500 Магнитогорского металлургического комбината и волгоградского металлургического завода «Красный Октябрь».

Профилометр ПРОФИЛЬ может быть использован также для контроля за состоянием поверхности контактных колец турбогенераторов. Профилометр был испытан на турбогенераторах мощностью 500 МВт Смоленской АЭС, 220 МВт Кольской АЭС, 300 и 165 МВт Черепетской ГРЭС, 300 МВт Харьковской ТЭЦ-5, 200 МВт Псковской ГРЭС. На профилограмме контактного кольца

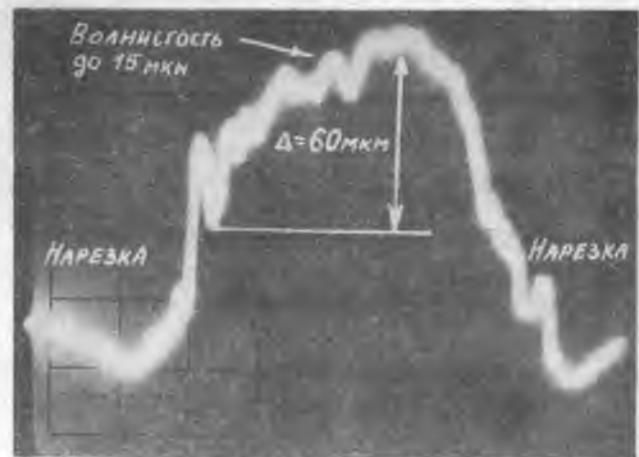


Рис. 3

ца турбогенератора ТВВ-220 (рис. 3) видны все особенности рельефа, показаны бой кольца  $\Delta=60$  мкм, волнистость, достигающая 15 мкм, декомпрессионная канавка на поверхности кольца (нарезка).

Один из основных показателей нормальной работы ЩКА — степень равномерности токораспределения по параллельным щеткам. В соответствии с инструкциями по эксплуатации ЩКА электрических машин токораспределение регулируется путем установки одинаковых нажатий на щетки. Однако, как показывает практика эксплуатации, даже при одинаковых нажатиях на щетки ток между ними может распределяться настолько неравномерно, что токоведущие канатики отдельных щеток или места их заделки выгорают из-за перегрузки, в то время как другие щетки могут быть практически выключены из работы. Следовательно, регулировка щеточного аппарата должна заключаться не в установке одинаковых нажатий на щетки, а в установке равных токов по ним.

Прибор КОНТРОЛЬ служит для оценки качества токораспределения по параллельно работающим щеткам с целью регулировки токов отдельных щеток. Датчик прибора выполнен в виде «крючка», позволяющего захватывать канатики щетки. Прибор снабжен индикатором, фиксирующим значение тока. Процесс измерения токов всех щеток обоих контактных колец занимает примерно 15—20 мин. В табл. 1 представлены результаты измерений токов щеток турбогенератора ТВВ-500 Смоленской АЭС. Сумма токов всех отрицательных щеток, измеренных прибором КОНТРОЛЬ, составила 2,709 кА, сумма токов всех положительных щеток — 2,803 кА. Действительный ток ротора по данным БЩУ был равен 2,66 кА. Таким образом, погрешность измерения токов щеток прибором КОНТРОЛЬ не превысила 6%. На основании данных табл. 1 в табл. 2 приведены основные характеристики токораспределения. Из этих данных следует, что средний ток щеток турбогенератора (41 А) в два с лишним раза

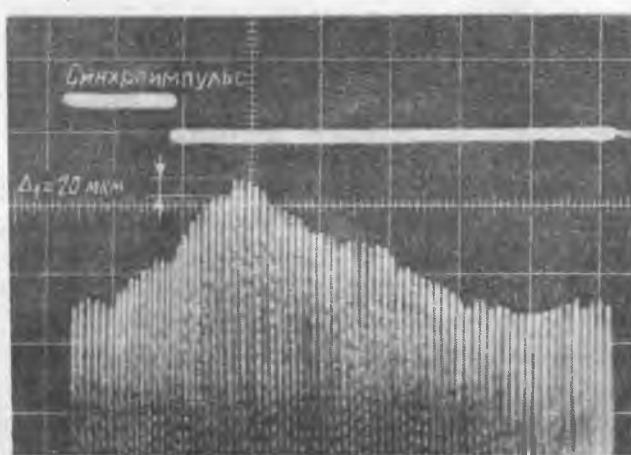


Рис. 2

меньше номинального (96 А). Отношение  $I_{\max}/I_{\min}$  для обоих колец больше рекомендуемого значения 4:1. Однако из-за значительной недогрузки щеточного аппарата это не приводит к отрицательным последствиям, так как данная рекомендация относится к щеточному аппарату, работающему в номинальном режиме. Значительное снижение тока щеток (достигаемое увеличением их количества) объясняется стремлением обслуживающего персонала снизить напряженность работы щеточного аппарата, тем самым повысить его надежность. Однако при этом ЩКА турбогенератора в режиме сброса нагрузки имеет тенденцию к сильному разогреву и «наплыwu» щеточного материала на кольцо. Это приводит к резкому увеличению переходного сопротивления между щеткой и кольцом и при последующем набросе нагрузки — к сильному искрению, стремящемуся перейти в круговой огонь. Основным средством борьбы с этим явлением должно быть снижение общего количества щеток, т. е. увеличение плотности тока.

Таблица 1

**Токи щеток турбогенератора ТВВ-500  
Смоленской АЭС, А**

Номер щеточного бракета	Отрицательное кольцо (щетки ЭГ-2АФ)					Положительное кольцо (щетки 611 ОМ)				
	Номер щетки					Номер щетки				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	14	17	21	30	35	50	27	21	67	46
2	70	28	40	83	40	27	37	27	61	22
3	28	54	30	17	19	26	27	38	35	42
4	63	104	53	35	14	31	62	30	43	42
5	17	118	59	50	53	77	73	61	94	57
6	36	20	43	73	129	29	46	58	91	80
7	32	35	66	107	75	38	41	29	33	43
8	17	58	17	16	53	18	21	50	38	26
9	168	34	46	27	50	91	70	27	26	24
10	13	16	45	25	23	41	26	35	67	43
11	15	15	20	31	16	68	33	27	67	29
12	23	13	14	113	27	34	26	21	40	46
13	4	14	10	33	36	48	47	22	52	29

Таблица 2

**Характеристики токораспределения по щеткам турбогенератора ТВВ-500 Смоленской АЭС**

Параметр	Отрицательное кольцо	Положительное кольцо
Средний ток щетки, А	41	41
Номинальный ток щетки, А	96	96
Максимальный ток щетки $I_{\max}$ , А	168	94
Минимальный ток щетки $I_{\min}$ , А	10	8
Отношение $I_{\max}/I_{\min}$	16,8:1	5,2:1
Рекомендуемое значение отношения $I_{\max}/I_{\min}$ не более	4:1	4:1
Коэффициент вариации тока $K_W \%$	79	47

Отношение  $I_{\max}/I_{\min}$  недостаточно полно характеризует токораспределение, так как является характеристикой только двух щеток. Более полной характеристикой токораспределения является коэффициент вариации тока  $K_B$ :

$$K_B = \frac{\sigma}{I_{cp}} \cdot 100\%,$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение тока;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{щ}}-1} \sum (I_i - I_{cp})^2},$$

$N_{\text{щ}}$  — количество щеток на каждом контактном кольце,  $N_{\text{щ}}=65$ ;  $I_i$  — ток  $i$ -й щетки;  $I_{cp}$  — средний ток щетки.

Многолетние наблюдения за работой ЩКА турбогенераторов показывают, что по критерию коэффициента вариации токораспределение может быть оценено по пятибалльной шкале согласно табл. 3.

Таблица 3

**Оценка токораспределения**

Коэффициент вариации тока	Оценка токораспределения
0—25%	5 (отлично)
25—50%	4 (хорошо)
50—100%	3 (удовлетворительно)
Свыше 100%	2 (неудовлетворительно)

Согласно табл. 3 токораспределение по щеткам положительного кольца турбогенератора следует признать хорошим ( $K_B=47\%$ ), по щеткам отрицательного кольца — удовлетворительным ( $K_B=75\%$ ). Это кольцо требует к себе повышенного внимания со стороны обслуживающего персонала, систематического измерения токов прибором КОНТРОЛЬ с последующей регулировкой.

В настоящее время ведутся работы по созданию на базе прибора КОНТРОЛЬ системы автоматизированного непрерывного контроля за токораспределением.

Опыт эксплуатации крупных электрических машин свидетельствует, что иногда даже при хорошем профиле врачающегося коллектора (контактного кольца) и хорошем токораспределении ЩКА работает неудовлетворительно. Это может выражаться в сильных вибрациях щеток, опасном искрении, высоком износе щеток и коллектора (кольца), сколах на поверхностях щеток и т. д. Это вызывается рядом скрытых причин, например, неправильным выбором марки щеток, неточной установкой щеткодержателей, их некачественным креплением к щеточной траверсе и т. п. Результатом этого может быть неустойчивое контактирование щетки с коллектором (кольцом), сопровождающееся частыми отрывами щетки от поверхности.

В [4] в качестве критерия устойчивости работы щеток предложен коэффициент относительной неустойчивости (КОН)  $K_H$ :

$$K_H = \frac{t}{T} \cdot 100\%,$$

где  $t$  — время открыта щетки от контактной поверхности;  $T$  — время измерения.

Таким образом, КОН определяет, сколько процентов времени составляют интервалы отсутствия контакта (бестоковая пауза) от общего времени измерения.

Процесс измерения заключается в охвате токоведущего канатика щетки датчиком, выполненным в виде «крючка», и в фиксации результатов измерений по цифровому табло прибора.

Прибор ПИКОН измеряет значение коэффициента  $K_H$  либо за один оборот коллектора (кольца), либо за определенный промежуток времени. Прибор ПИКОН может быть использован как для контроля за стабильностью контактирования работающей машины, так и при научно-технических исследованиях щеточного аппарата, например, для подбора марки щеток, определения оптимальных контактных пар, лучших конструкций щеткодержателей. Например, на Магнитогорском металлургическом комбинате в обжимном цехе № 1 обслуживающим персоналом длительное время отмечалась значительная разница в работе между щеточными аппаратами двух одинаковых генераторов постоянного тока ГП-9500. Основное различие между ними заключалось в том, что генератор Г-1 снабжен щеткодержателями с рулонной пружиной постоянного нажатия, а генератор Г-2 — щеткодержателями с нажимным курком. Степень искрения щеток генератора Г-1 не превышала 1,5 балла, а щеток машины Г-2 достигала 2—2,5 баллов. Измерения, выполненные прибором ПИКОН, показали, что для всех щеток генератора Г-1 коэффициент относительной неустойчивости не превышал 1—2%, а для щеток генератора Г-2 составлял 10—20%. В качестве первого шага в направлении улучшения работы ЩКА генератора Г-2 было предложено заменить жесткие нажимные пружины с усилием нажатия 40 Н более мягкими с усилием 25 Н. После этого КОН всех щеток генератора Г-2 снизился до 5—7%, а искрение уменьшилось до 1,5—2 баллов. В дальнейшем было предложено заменить щеткодержатели с нажимным курком

щеткодержателями с рулонной пружиной.

В процессе работы электрической машины ее коллектор (контактное кольцо) подвергается термическим воздействиям, влияние которых на работу ЩКА определяется токовой нагрузкой, потерями на трение щеток и условиями теплоотдачи. При эксплуатации машин следует стремиться к равномерному распределению тепла по телу коллектора (кольца), без местных перегревов, которые могут вызывать механические деформации, например, в виде выступания отдельных пластин.

Прибор ТЕРМИКС позволяет измерять распределение температуры по рабочей поверхности коллектора (кольца) непосредственно в процессе работы машины. Оптический термодатчик прибора измеряет температуру поверхности, на которую он направлен. Работа прибора синхронизирована с вращением поверхности так, что он измеряет температуру только одного участка вращающейся поверхности. Температурные поля щеток на результаты измерений не влияют. Точность измерения — 0,5°C. Использование прибора ТЕРМИКС позволяет получить полную картину распределения температуры, установить местоположение и оценить интенсивность источников повышенного тепловыделения.

## Вывод

Опыт эксплуатации диагностического комплекса ДИАКОР на предприятиях промышленности и энергетики показал, что он позволяет объективно и с высокой инженерной точностью оценивать качество работы щеточно-контактных аппаратов электрических машин.

## Список литературы

1. Диагностический комплекс ДИАКОР для контроля за работой щеточного аппарата турбогенератора / Г.М. Хорецкий, Р.К. Шабаев, И.В. Плохов // Электрические станции. 1993. № 12.
2. Диагностический комплекс ДИАКОР для контроля за работой щеточного аппарата и коммутаций электрических машин / Ю.А. Родионов, В.Е. Егоров, И.В. Плохов, А.М. Марков // Тезисы докладов VII научно-технической конференции «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока». Омск, 1993.
3. Родионов Ю.А., Плохов И.В., Марков А.М. Промышленные испытания диагностического прибора ПИКОН // Тезисы докладов VII научно-технической конференции «Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных машин постоянного тока». Омск, 1993.
4. Нэллин В.И., Богатырев Н.Я., Ложкин Л.В. Механика скользящего контакта. М.: Транспорт, 1966.

# Разработка отрезка серии трехфазных двухскоростных лифтовых асинхронных двигателей

Т.А. АХУНОВ, Л.Н. МАКАРОВ, В.И. ПОПОВ, Ю.Н. ПЕТРОВ

Ярославский электромашиностроительный завод  
Волжский инженерно-педагогический институт

Трехфазные двухскоростные лифтовые асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором выполняются всегда с двумя раздельными разнополюсными обмотками на статоре, так как они не должны терять питание при переходе с одной синхронной скорости на другую [1]. Отличительной их особенностью является работа с повышенными скольжениями  $s_n$  для каждой полюсности при высоких кратностях пускового и максимального моментов, превосходящих показатели нормальных односкоростных АД [2–4]. Характерные для современных серий лифтовых двухскоростных АД числа полюсов  $2p=4$  или 6 – для быстроходной и  $2p=16 \div 24$  – для тихоходной обмотки; проектируемые АД имеют числа полюсов  $2p=4$  и 16.

Получение повышенных перегрузочных способностей по моменту лифтовых АД связано с уменьшением индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток, что может достигаться при их проектировании, в основном, выбором большего числа пазов статора и ротора по сравнению с односкоростными АД. При этом стремятся получать целое число пазов на полюс и фазу для многополюсной обмотки. Это возможно при  $q=1$  и не всегда реально выполнимо при  $q=2$  из-за ограничений по размерам зубцового деления  $t_1$  и ширины зубца  $b_{31}$  статора, минимальные значения которых (по условиям технологической выполнимости и надежности штампов) для АД с высотами оси вращения  $h \geq 132$  мм должны быть не менее 4,0–4,5 для  $b_{31}$  и 9,0–9,5 мм для  $t_1$ . Трехфазные дробные обмотки со значениями  $1 < q < 1,5$  не нашли применения в выполненных сериях лифтовых АД из-за известных их недостатков [1–4], связанных с повышенным дифференциальным рассеянием. Поэтому серии лифтовых двухскоростных АД имеют обычно многополюсную обмотку с  $q=1$ , выполняемую однослоиной, что предопределяет ухудшение показателей машины для этой полюсности из-за высокого содержания зубцовых гармонических в кривой МДС и чрезмерно большого дифференциального рассеяния.

Вместе с тем имеется возможность существенного улучшения электромагнитных свойств трехфазных симметричных дробных обмоток (при  $1 < q < 1,5$ ) путем снижения их дифференциального рассеяния, применение которых позволяет в значительной мере повышать показатели лифтовых

двухскоростных АД.

Для проектируемого отрезка серии лифтовых АД используется базовая асинхронная машина серии 4АН-160 при числах пазов статора  $Z_1=60$  и ротора  $Z_2=70$ ; параметры магнитопровода для полюсностей  $p=2$  и  $p=8$  приведены в табл. 1, в которой длины сердечников 110, 140 и 180 мм соответствуют мощностям 5,0/1,25; 6,8/1,7; 10,0/2,5 кВт.

Аксиальные вентиляционные каналы на роторе трапециoidalного вида (по типу ротора лифтового АД фирмы KONE):  $n_k=29$ ,  $b_k=(7,3+4,0)/2=5,65$  мм;  $h_k=15,0$  мм при эквивалентном диаметре канала  $d_{k2}=10,35$  мм. Размеры короткозамыкающих колец:  $h_{kl}=17,5$  мм,  $l_{kl}=17,0$  мм,  $q_{kl}=297,5$  мм<sup>2</sup>,  $D_{kl}=166,0$  мм.

Материал заливки ротора – алюминиевый сплав повышенного сопротивления марки АКМ 12-4 при  $\gamma_{k115}=10,0$  м/(Ом·м<sup>2</sup>).

Таблица 1

Параметры	Статор (рис. 1)	Ротор (рис. 2)
Диаметр сердечника, мм: наружный $D_H$	273,0	183,8
внутренний $D$	185,0	60,0
Расчетные значения: зубцовое деление $t$ , мм	9,69	8,25
ширина зубца $b_3$ , мм	4,3	4,1
высота зубца $h_3$ , мм	26,1	14,0
высота спинки $h_C$ , мм	18,0	41,0
площадь паза $Q_{\Pi}/Q_{\Pi}$	173,9/134,0	44,887 = $q_{ct}$
длина линии в спинке $L_C$ , мм	100,2*	45,1*
	25,0**	11,3**
Коэффициент индукции: в спинках $K_C=B_C/B_\delta=$ $=D/(p h_C K_{ct})$	2,65*	1,16*
в зубцах $K_3=B_3/B_\delta=$ $=t/(b_3 K_{ct})$	0,66**	0,29**
	2,32	2,07
Масса зубцов/спинки статора $G_3/G_C$ , кг/кг, при длине сердечников $l_1=l_2$ , мм:		
110	5,6/11,9	—
140	7,1/15,2	—
180	9,2/19,5	—
Скос пазов ротора $b_{ck}/\beta_{ck}$ , мм/–, при $l_1=l_2$ , мм:		
110	—	8,0/0,97
140	—	8,0/0,97
180	—	0/0
Коэффициент воздушного зазора $K_\delta$		1,183
Коэффициент геометрии $K_A=t/(9,55 \delta K_\delta)$	1,43	1,217

\*  $2p=4$ .

\*\*  $2p=16$ .

При  $Z_1=60$  быстроходная  $2p=4$ -полюсная обмотка имеет  $q=5$  и для двухобмоточного статора заданного габарита ее целесообразно выполнять одно-двухслойной или однослоиной. Одно-двухслойную обмотку предложено выполнять с неравновитковыми концентрическими катушками в каждой катушечной группе (табл. 2), где значение  $x$  выбирается в пределах  $0,20 \leq x \leq 0,30$ , при этом каждый паз содержит одинаковое число витков ( $2w_K$ ) этой обмотки. Ее обмоточный коэффициент  $K_{ob}$ , средний шаг катушек по пазам  $y_{p,cr}$  и коэффициент дифференциального рассеяния  $\sigma_{d\%}$  (по многоугольнику МДС) равны: при  $x=0$  (равновитковая известная обмотка)  $K_{ob}=0,9099$ ;  $y_{p,cr}=11,6$  и  $\sigma_{d\%}=0,401$ ; при  $x=0,25$   $K_{ob}=0,9203$ ,  $y_{p,cr}=11,8$  и  $\sigma_{d\%}=0,378$ , т. е. неравновитковое выполнение катушек повышает обмоточный коэффициент (в  $0,9203/0,9099$ ) и снижает дифференциальное рассеяние (в  $0,401/0,378=1,061$  раза) при незначительном увеличении среднего шага катушек по пазам.

Таблица 2

Шаг катушки $y_p$	Число витков
14	$2w_K$
12	$(1+x) w_K$
10	$w_K$
8	$(1-x) w_K$

Однослоиная обмотка при  $q=5$  характеризуется следующими показателями: при выполнении «вразвалку» с шагами концентрических катушек  $y_p=15, 13, 11$  для подгрупп с нечетными номерами и  $y_p=13, 11$  для подгрупп с четными номерами ( $y_{p,cr}=12,6$ )  $K_{ob}=0,9567$  и  $\sigma_{d\%}=0,643$  (по многоугольнику МДС в виде правильного шестиугольника); при цепной укороченной обмотке с шагом катушек  $y_p=13$   $K_{ob}=0,9358$  и  $\sigma_{d\%}=0,681$  (по многоугольнику МДС в виде деформированного несимметричным образом, вследствие чего в кривой МДС возникают четные гармонические, увеличивающие дифференциальное рассеяние). Предложено однослоиную обмотку при  $q=5$  выполнять концентрической (по типу обмотки «вразвалку») с шагами катушек  $y_p=15, 13, 9$  для нечетных подгрупп и  $y_p=13, 9$  для четных подгрупп ( $y_{p,cr}=11,8$ ), для которой  $K_{ob}=0,9149$  и  $\sigma_{d\%}=0,617$  (по многоугольнику МДС, деформированному симметричным образом при смещении всех вершин шестиугольника к центру; четные гармонические в кривой МДС отсутствуют и дифференциальное рассеяние уменьшается).

Таким образом, обе предлагаемые обмотки при  $q=5$  превосходят известные схемы по гармоническому составу кривой МДС и по расходу меди (однослоиная), что показывает целесообразность

и эффективность их применения в лифтовых двухскоростных АД.

Тихоходная  $2p=16$ -полюсная обмотка при  $Z_1=60$  пазах статора имеет  $q=5/4=1,25$  и выполняется двухслойной с группировкой катушек по числовому ряду 2 1 1 1 (повторяющему  $3p/2=3 \cdot 8/2=12$  раз для всей обмотки). Предложено выполнять такую обмотку с неравновитковыми катушками; для первой группировки (группы с номерами от 1Г до 4Г) одной повторяющейся части обмотки числа витков катушек приведены в табл. 3, где оптимальное значение  $x$  соответствует пределам  $0,40 \leq x \leq 0,50$ , при этом каждый паз содержит одинаковое число витков ( $2w_K$ ) этой обмотки. С учетом чисел витков, шагов катушек и углов сдвига осей катушечных групп фазы обмоточный коэффициент  $K_{ob}$  и средний шаг катушек по пазам определяются как:

$$K_{ob}=0,9099+x \cdot 0,04158; y_{p,cr}=3+x \cdot 0,2.$$

Таблица 3

Катушечная группа	Шаг катушки $y_p$	Число витков
1Г	4 2	$(1-x) w_K$
2Г	3	$w_K$
3Г	3	$(1+x) w_K$
4Г	3	$w_K$

При  $x=0$   $K_{ob}=0,9099$ ,  $y_{p,cr}=3,0$  и  $\sigma_{d\%}=10,203$  (по многоугольнику МДС), что соответствует известной обмотке с равновитковыми катушками; при  $x=0,4$   $K_{ob}=0,9265$ ,  $y_{p,cr}=3,08$  и  $\sigma_{d\%}=6,289$ ; при  $x=0,5$   $K_{ob}=0,9307$ ,  $y_{p,cr}=3,10$  и  $\sigma_{d\%}=6,356$ , т. е. предлагаемая дробная обмотка имеет более высокий обмоточный коэффициент и значительно меньшее дифференциальное рассеяние (в  $10,203/6,289=1,62$  при  $x=0,4$ ) по сравнению с известной обмоткой равновитковой, что в существенной мере улучшает показатели лифтового АД для полюсности  $2p=16$ .

В двухскоростных лифтовых АД один и тот же магнитопровод используется на разные, значительно отличающиеся числа полюсов, поэтому расчет их магнитной цепи для каждой полюсности характеризуется рядом особенностей, связанных с необходимостью учета потока рассеяния статора  $\sigma_1=x_1/X_m$ , пропорционального квадрату числа пар полюсов  $p^2$ , где  $x_1$  — индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора, а  $X_m$  — индуктивное сопротивление намагничивающей ветви схемы замещения.

Результаты расчета магнитной цепи лифтового АД при  $l=180$  мм (табл. 1) по методикам [2, 4] с учетом потока рассеяния статора (коэффициентом  $K_{\phi 1}=1+\sigma_1 K_{\phi 1}$  по [4]) сведены в табл. 4 для режимов холостого хода и нагрузки.

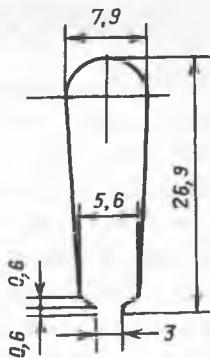


Рис. 1

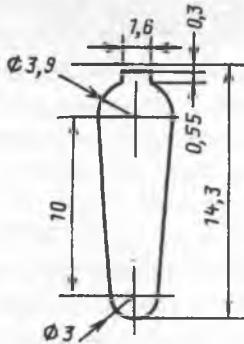


Рис. 2

Таблица 4

Расчетные параметры магнитной цепи	Режим холостого хода		Режим нагрузки	
	2p = 4	2p = 16	2p = .	2p = 16
ЭДС фазы $E_1$ , В $K_{\Phi 1}$ по [4]	213,9 1,0	187,6 1,099	201,0 1,0	175,7 1,055
Магнитные индукции, Тл:				
$B_\delta$	0,604	0,718	0,568	0,673
$B_{31}=K_{\Phi 1} K_{31} B_\delta$	1,401	1,840	1,318	1,643
$B_{32}=K_{32} B_\delta$	1,250	1,486	1,176	1,393
$B_{c1}=K_{\Phi 1} K_{c1} B_\delta$	1,600	0,521	1,505	0,469
$B_{c2}=K_{c2} B_\delta$	0,700	0,208	0,659	0,195
МДС, А:				
$F_\delta$	343	408	323	382
$F=F_\delta+F_{ct}$	520	505	450	440
Ток намагничивания $I_M$ , А	8,03	10,58	6,95	9,22
$X_M$ , Ом	26,62	17,73	29,01	19,06
$\sigma_1=x_1/X_M$	0,0282	0,1624	0,0259	0,1511
$\rho_1=r_1/(x_1+X_M)$	0,0256	0,1291	0,0235	0,1213
$P_{ст.о}$ , Вт	294	182	—	—
$I_{c.a.n}$	—	—	0,60	1,30
$I_{c.p.n}$	—	—	6,95	9,22

Таким образом, если для нормальных односкоростных АД можно ограничиваться расчетом магнитной цепи в режиме холостого хода, то для двухскоростных лифтовых АД обязателен такой расчет и при номинальной нагрузке с учетом изменения потока рассеяния статора (особенно для многополюсной обмотки). Эти соображения подтверждаются экспериментальными исследованиями [5].

#### Список литературы

1. Краново-металлургические электродвигатели / Н.М.Баталов и др. М.: Энергия, 1967.
2. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978.
3. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик и др. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В.И. Радин и др. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Попов В.И., Макаров Л.Н. К экспериментальному определению параметров схемы замещения асинхронной машины // Электричество. 1993. № 1. С. 49–52.

## Модели для оценки вибопереходящих свойств конструкций электрических машин переменного тока

Ю.И. СЕПП

Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет

Магнитные источники вибрации, формирующиеся и локализующиеся, в основном, в рабочей зоне зазора электрической машины (ЭМ) традиционного исполнения при работе ЭМ в составе электропривода, включающего полупроводниковые преобразователи, содержат компоненты, связанные с тангенциальными воздействиями поля, существенно изменяющими общую картину вибрации ЭМ [1]. Модели, учитывающие подобные составляющие, как показывает анализ [2], достаточно запутаны и основаны на некорректных физических допущениях.

В [3] показано, что в рассматриваемых ЭМ происходит преобразование первичных потоков колебательной энергии, поступающих в конструкцию от внутренних магнитных источников через коронки зубцов, в зоне расположения зубцов и обмотки. Из сказанного следует необходимость разработки новых моделей оценки трансформации колебательной энергии в конструкциях подобных машин, составной частью которых являлся бы учет преобразования обозначенной энергии в зубцовой зоне машины.

Будем считать, что касательные компоненты

тензора максвелловских напряжений на поверхностях, воспринимающих эти напряжения конструктивных элементов, являющиеся характеристиками внутренних источников вибрации, представляются в виде:

$$\tau(\theta, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \cos(n\theta - \omega_n t - \varphi_n^t), \quad (1)$$

где  $\theta$  — угловая координата рассматриваемой точки поверхности;  $t$  — время;  $\tau_n$  — амплитуды гармоник;  $n$  — их пространственные порядки;  $\omega_n$  — круговые частоты гармоник;  $\varphi_n^t$  — начальные фазы.

**Основные уравнения метода.** Анализ линейных дифференциальных уравнений свободных колебаний отдельных конструктивных элементов, представляемых стержнями, пластинами, круговыми цилиндрическими оболочками, приводит к тому, что решения этих уравнений могут быть записаны в матричной форме [4]:

$$\hat{Y}(\xi) = \hat{B}(\xi) \hat{C}, \quad (2)$$

где  $\hat{Y}(\xi)$  — вектор-столбец параметров состояния конструктивного элемента в его сечении;  $\hat{B}(\xi)$  — матрица перехода от произвольных постоянных к параметрам элемента в его сечении с координатой  $\xi$  (зависит от геометрии элемента и характеристик его материала);  $\hat{C}$  — вектор-столбец произвольных постоянных;  $\xi$  — безразмерная координата сечений рассматриваемого конструктивного элемента ( $0 \leq \xi \leq 1$ ).

Из условий равновесия участка конструктивной среды в интервале от  $\xi$  до  $\xi + d\xi$  нетрудно получить уравнение:

$$\frac{d\hat{Y}}{d\xi} + \hat{G}(\xi) \hat{Y}(\xi) = \hat{\psi}(\xi), \quad (3)$$

где

$$\hat{G}(\xi) = \hat{B}(\xi) \frac{d\hat{B}(\xi)}{d\xi}; \quad (4)$$

$\hat{\psi}(\xi)$  — вектор-столбец, координаты которого характеризуют амплитуды распределенной нагрузки, действующей на рассматриваемый конструктивный элемент.

Интегрирование уравнения (3) дает:

$$\hat{Y}(1) = \hat{Y}(0) - \hat{G}^0 \hat{Y} + \hat{\psi}, \quad (5)$$

где

$$\hat{G}^0 = \int_0^1 \hat{G}(\xi) d\xi, \quad (6)$$

а чертой обозначены средние по  $y$  значения соответствующих величин.

**Модель зубцовой зоны машины.** Каждый зубец статора асинхронной и синхронной неявнополюсной машины может быть рассмотрен в виде тонкой полосы, имеющей толщину  $2h=b_{Z1}$ , длину

$L=L_s$  и ширину  $l=h_{Z1}$  ( $b_{Z1}$  — средняя толщина зубца;  $L_s$  — аксиальная длина активного ядра;  $h_{Z1}$  — высота зубца статора), жестко заделанной со стороны спинки и свободной со всех остальных сторон [3].

Порождаемые тангенциальными нагрузками (1) волны изгиба подобной полосы описываются решениями уравнения Жермен-Лагранжа [5]:

$$D \left( \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(y, z; t). \quad (7)$$

В (7) принято, что ось  $Oy$  — направлена вдоль оси машины, а ось  $Oz$  — по радиусу;  $w(y, z; t)$  — прогиб полосы;  $\rho$  — плотность материала;  $q(y, z; t)$  — внешняя нагрузка, приходящаяся на единицу длины  $L$ ;  $D=Eh^3/12(1-\sigma^2)$  ( $E$  и  $\sigma$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона).

Полагая, что нагрузкой является контактная реакция обмотки, заполняющей пазы, и представляя решение и нагрузку на частоте  $\omega_n$  в точке с угловой координатой расположения зубца  $\theta_k$  ( $k=1, 2, \dots, Z_1$ ;  $Z_1$  — число зубцов статора) выражениями:

$$w_m(y, z; t) = Y_m(y) \cos \frac{m\pi z}{L} \cos(n\theta_k - \omega_n t - \varphi_n^t); \\ q_m(y, z; t) = \psi_m(y) \cos \frac{m\pi z}{L} \cos(n\theta_k - \omega_n t - \varphi_n^t), \quad (8)$$

решения однородного уравнения (7) находим в виде (2). При этом

$$\xi = y/l; \quad \hat{C} = \hat{C}_m; \\ \hat{Y}(\xi) \equiv \hat{Y}_m(\xi) \equiv (Y_m, Y_m, M_m, Q_m)^T, \\ \hat{B}(\xi) \equiv B_{3m}(\xi) = F_{3m} B_{3m}^0(\xi), \quad (9)$$

где  $M_m$  — изгибающий момент в сечении;  $Q_m$  — перерезывающая сила;

$$\hat{F}_{3m} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{\sigma m^2 \pi^2 D}{l^2 l^2} & 0 & D/l^2 & 0 \\ 0 & -2(2-\sigma) \frac{m^2 \pi^2}{L^2} D & 0 & D/l^2 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\hat{B}_{3m}^0(\xi) = \begin{pmatrix} \operatorname{ch} \lambda \xi & \operatorname{sh} \lambda \xi & \cos \nu \xi & \sin \nu \xi \\ \lambda \operatorname{sh} \lambda \xi & \lambda \operatorname{ch} \lambda \xi & -\nu \sin \nu \xi & \nu \cos \nu \xi \\ \lambda^2 \operatorname{ch} \lambda \xi & \lambda^2 \operatorname{sh} \lambda \xi & -\nu^2 \cos \nu \xi & -\nu^2 \sin \nu \xi \\ \lambda^3 \operatorname{sh} \lambda \xi & \lambda^3 \operatorname{ch} \lambda \xi & \nu^3 \sin \nu \xi & -\nu^3 \cos \nu \xi \end{pmatrix},$$

а в выражениях (10)

$$\frac{\lambda}{l} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \omega_n \left(\frac{\rho h}{D}\right)^{1/2}}; \\ \frac{\nu}{l} = \sqrt{\omega_n \left(\frac{\rho h}{D}\right)^{1/2} - \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2}. \quad (11)$$

Так как полоса возбуждается однородным

вдоль оси Oz воздействием, то средние значения искомых характеристик должны мало отличаться от значений, получаемых при оценке изгиба консольной балки, возбуждаемой сосредоточенной на свободном конце силой  $T_m$  при одновременном действии равномерно распределенной вдоль Оу нагрузки  $P_m$ . Поэтому для среднего по у момента  $M_m$  и средней перерезывающей силы  $\bar{Q}_m$  имеем [6]:

$$\bar{M}_m = \frac{l}{2} \left( T_m - P_m \frac{l}{3} \right); \quad \bar{Q}_m = T_m - P_m \frac{l}{2}. \quad (12)$$

На зубец со стороны  $y=0$  действует приходящаяся на единицу длины  $L$  сосредоточенная сила

$$T_n(\theta_k) = \frac{\tau_n}{n} \sin n \frac{b_c}{2R_c} \cos(n\theta_k - \omega_n t - \varphi_n^\tau), \quad (13)$$

где  $\tau_n$  находится из (1);  $R_c$  — радиус расточки статора;  $b_c = 2\pi R_c / Z_1 - b_{w1}$  ( $b_{w1}$  — открытие паза статора).

Поэтому необходимо считать, что

$$T_m = \begin{cases} T_n(\theta_k) & \text{при } m=0; \\ 0 & \text{при } m \neq 0, \end{cases} \quad (14)$$

а также  $Q_m(0)=T_m$ .

Будем полагать, что распределенная вдоль боковой поверхности зубца нагрузка связана исключительно с контактными напряжениями между полосой и проводниками обмотки в пазах. из контактной теории Герца [7, 8] следует, что в этом случае

$$P_m = \alpha_m \bar{Y}_m^{3/2}; \quad \alpha_m = v_n E' \sqrt{\frac{R}{k_\delta^3}}, \quad (15)$$

где  $\bar{Y}_m$  — среднее по  $y$  значение прогиба зубца;  $v_n$  — число проводников в пазу, контактирующих с боковой поверхностью зубца и приходящихся на единицу площади этой поверхности;  $R$  — радиус проводника в пазу;

$$E' = \frac{E'_1 E'_2}{E'_1 + E'_2}; \quad E'_i = \frac{E_i}{1 - \sigma_i}, \quad (16)$$

( $i=1, 2$ ;  $E_i$  — модули упругости материалов зубца и проводника;  $\sigma_i$  — коэффициенты Пуассона указанных элементов), а  $k_\delta$  находится из таблиц [8].

Предполагая выполнимость для каждого момента времени уравнения механического равновесия, состоящего в уравновешивании упругой реакции изогнутой полосы и контактной нагрузки, а также уравнения энергетического баланса, устанавливающего, что энергия упругой деформации консоли определяется работой изгибающего момента на взаимном угловом перемещении двух ее сечений, находим из этих уравнений:

$$\bar{Y} = (D/\alpha_m)^2; \quad \bar{Y}_m = \rho \omega_n^2 \bar{Y}_m^2 / \bar{M}_m. \quad (17)$$

Уравнения (9)–(17) полностью определяют все параметры представления (2), а следовательно,

и линейной системы уравнений (5), рассматриваемой относительно неизвестных значений изгибающего момента  $M_m(l, z; t)$  и перерезывающей силы  $Q_m(l, z; t)$  у основания зубца. При этом необходимо считать, что  $\hat{\psi}_m = (0, 0, 0, P_m)^T$

Окончательные значения передаваемых на спинку значений момента и силы получаются с помощью принципа суперпозиции:

$$M(l, z; t) = \sum_{m=0}^N M_m(l, z; t); \quad Q(l, z; t) = \sum_{m=0}^N Q_m(l, z; t), \quad (18)$$

где число членов суммирования находится из условия [9]

$$|W^N - W^{N-1}| \leq \varepsilon W^{N-1} \quad (19)$$

при  $\varepsilon > 0$ , определяющем относительную точность расчета, а также при условии, что

$$W^N = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^N Y_m^2(0) \cos^2 \frac{m\pi z}{L}. \quad (20)$$

Полученные модель и алгоритм позволяют находить передаваемые через каждый зубец значения изгибающего момента и перерезывающей силы, действующих непосредственно в окрестности основания зубцов.

После расчета результатирующие величины находятся в виде

$$f_{kn}(t) = f_{0n}(z) \cos(n\theta_k - \omega_n t - \varphi_n^\tau). \quad (21)$$

Представление подобных дискретно распределенных по внутренней поверхности спинки статора нагрузок непрерывно распределенными  $f_n(\theta, t)$ , осуществляемое путем обычного разложения в ряд Фурье, приводит к выражению:

$$f_n(\theta, t) = \frac{a_0}{2} - \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos i\theta, \quad (22)$$

где

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \frac{f_{0n}}{R_c + h_{Z1}} \cos(\omega_n t + \varphi_n^\tau);$$

$$a_i = \frac{f_{0n}}{\pi(R_c + h_{Z1})} \frac{\sin i\Delta}{i\Delta} [1 + 2 \cos \pi i(R_c + h_{Z1})] \times$$

$$\times \cos(\omega_n t + \varphi_n^\tau), \quad (23)$$

причем  $\Delta = \pi/Z_1 - b_{2c}/(R_c + h_{Z1})$  ( $b_{2c}$  — ширина паза у его основания).

## Выводы

- Получена достаточно простая модель преобразования характеристик первичного возбуждения при прохождении его энергии через зубцовую зону конструкций ЭМ.

- Представленный алгоритм показывает, что каждая пространственная гармоника первичных

нагрузок порождает в спинке статора бесконечный спектр соответствующих пространственных нагрузок на данной частоте.

3. Использование полученных уравнений позволяет получить достаточно простые и эффективные расчетные схемы и модели для преобразования колебательной энергии в системе «спинка статора—корпус» машин традиционного исполнения, а также для анализа конструкций машин беспазового исполнения.

#### Список литературы

1. Зубренков Б.И., Каплин А.И. О вибрациях асинхронных двигателей, питающихся от преобразователей частоты // Тр. ВНИИЭМ. 1988. Т. 86. С. 135—146.

2. Сепп Ю.И., Дмитриев Ю.Л. Оценка виброактивности магнитных источников, связанных с гармониками тангенциальной составляющей индукции в зазоре асинхронного двигателя // Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов. Тезисы докл. VI Всес. науч.-техн. конфер. Бишкек. 1991. Ч. 1. С. 43—44.

3. Сепп Ю.И. Влияние зубцов на механическое сопротивление статора при его радиально-изгибных колебаниях // Тр. МЭИ. 1991. Вып. 633. С. 85—90.

4. Ивович В.А. Переходные матрицы в динамике упругих систем. М.: Машиностроение, 1981.

5. Артоболевский И.И., Бобровницкий Ю.И., Генкин М.Д. Введение в акустическую динамику машин. М.: Наука, 1979.

6. Детинко Ф.Н., Загородная Г.А., Фастовский В.М. Прочность и колебания электрических машин. Л.: Энергия, 1969.

7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965.

8. Галахов М.А., Бурмистров А.Н. Расчет подшипниковых узлов. М.: Машиностроение, 1988.

9. Сепп Ю.И. Некоторые математические аспекты задачи оценки виброактивности магнитных источников в электрических машинах переменного тока. Деп. в Информэлектро 20.05.94, № 26-ЭТ94.

## Управляемый торцевой электродвигатель с постоянными магнитами

А.А. АФОНИН, В.И. КИСЛЕНКО

ИЭД НАН Украины

Н.И. ПАШКОВ

Дивногорский филиал ВНИИЭП

В настоящее время одним из перспективных направлений электромашиностроения является развитие и совершенствование конструкций торцевых асинхронных электродвигателей на основе статоров с активным распределенным слоем [1—3], в которых размеры зубцов статора весьма малы и в предельном случае равны толщине пластины электротехнической стали. Такие технические решения позволяют не только реализовать малоотходную технологию массового производства с повышенным использованием объема электрической машины, обусловливающим снижение расходов электротехнической стали и обмоточной меди, но и создать двигатели с высокими технико-экономическими показателями.

В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможность создания на базе торцевых конструкций с активным распределенным слоем регулируемого электропривода для диапазона скорости  $D=20:1$ , удовлетворяющего значительное число производителей бытовых машин и приборов.

В качестве базового образца выбран торцевой асинхронный двигатель ДАК 120-4, статор которого имеет две пары полюсов и выполнен намоткой ферронаполненных катушечных групп с ферромагнитными пластинами клинообразной формы, а ярмо его — намоткой ленты электротехнической стали с последующей сборкой с ферронаполненными катушечными группами с помощью kleевого слоя. Ротор изготовленного

образца управляемого двигателя выполнен из высоконапористических постоянных магнитов типа Нм28Ди4Р пластинчатой формы толщиной  $\delta_\mu = 3 \cdot 10^{-3}$  м, наклеенных на диск из конструкционной стали Ст3. Магнитные характеристики постоянных магнитов следующие: остаточная индукция  $B_r = 1,2$  Тл, коэрцитивная сила соответственно по индукции —  $H_c^B = 850$  кА/м и по намагниченности —  $H_c^J = 1200$  кА/м.

Конструктивная схема изготовленного двигателя показана на рис. 1. Двигатель содержит статор 1 с активным распределенным слоем, на котором на разных пространственных уровнях размещены обмотки управления двух фаз  $2_1$  и  $2_2$ , и ротор дискового типа с двумя парами полюсов, образованными группами секторов посто-

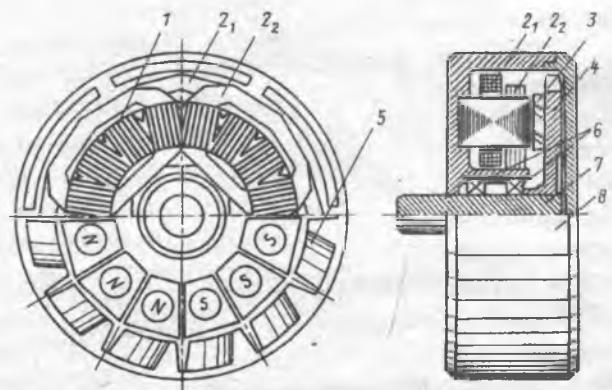


Рис. 1

яных магнитов 3, закрепленных на подложке в виде ферромагнитного диска 4. При этом сохранен штатный для двигателя ДАК 120-4 осевой вентилятор 5 с числом лопаток  $Z_L=12$ , подшипниковый узел с разнесенными подшипниками 6, выходной вал 7 и пластмассовый корпус двигателя 8. Двигатель оснащен датчиком положения ротора, генерирующим сигналы управления полупроводниковым коммутатором в зависимости от взаимного положения полюсов статора и ротора. В качестве коммутирующего элемента используется диск с прорезями, жестко закрепленный на валу двигателя; сигнальными элементами служат оптоэлектронные пары. Кроме того, каждая фаза двигателя имеет дополнительную оптоэлектронную пару, предназначенную для запирания силовых ключей мостов инверторов в моменты, когда ЭДС достигает определенных величин. За счет этого предотвращается протекание к больших импульсов тока, так и токов, наличие которых не вносит вклада в создание полезного момента электромеханическим преобразователем.

Полупроводниковый преобразователь обеспечивал возможность управления скоростью двигателя как с помощью использования режима управляемого выпрямителя, так и посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом обеспечивалась возможность изменения несущей частоты ШИМ от сотен герц до ультразвукового диапазона частот — 40 кГц.

Узел формирования управляющих сигналов формирует для мостов инверторов каждой фазы две последовательности импульсов частотой  $f_{H1}=f_{H2}=120$  кГц, которые стробируются сигналами как от датчиков положения, так и от дополнительных оптопар. Последовательности импульсов  $f_{H1}, f_{H2}$  поступают на соответствующие усилители мощности в виде реверсивных мостовых инверторов и импульсные трансформаторы, работающие в однотактных режимах. На базу каждого силового транзистора в мосте подаются перекрывающиеся во времени импульсы от двух трансформаторов, которые, суммируясь после выпрямительных диодов, обеспечивают непрерывность тока. Управляющие сигналы для силовых ключей имеют передние и задние фронты длительностью  $200 \cdot 10^{-9}$  с, определяемой временами рассасывания транзисторов и индуктивностями обмоток импульсных трансформаторов. Предусмотрена защита от сквозных токов в ключах мостов инверторов. Источник питания обеспечивает регулирование напряжения в диапазоне 10–200 В с коэффициентом пульсаций не более 2%. Предусмотрены защиты от превышения тока: медленно действующая — от повышения тока свыше 2 А с переводом источника напряжения в режим источника тока на уровне 2,2 А и быстродействующая, обеспечивающая при корот-

ком замыкании режим источника тока. Управляемый выпрямитель состоит из последовательно включенных выпрямителя, тиристора с регулируемыми углами включения и фильтра. Блок управления содержит собственно узел управления, узлы обратных связей по току и напряжению, гальванически изолированные устройства формирования стабилизованных уровней напряжения.

Характеристики двигателя снимались на специальном стенде, оснащенном электромагнитным тормозом, создающим изменяемый в широких пределах момент нагрузки, измерителем скорости вращения вала двигателя, приборами для измерения электрических величин на входе и выходе полупроводникового преобразователя, системой мониторинга для компьютеризированной обработки измеряемых величин. Испытания проводились как для широкого диапазона изменения напряжения на выходе преобразователя  $U_B=\text{var}$  при постоянстве частоты вращения вала двигателя  $n_1=\text{const}$  и регулируемом моменте нагрузки  $M_H=\text{var}$ , так и при различных фиксированных уровнях напряжения  $U_j=\text{const}$  и переменных моментах нагрузки  $M_H=\text{var}$ . Измерялись токи и напряжения на входе и выходе преобразователя, моменты нагрузки, скорость двигателя. Потребляемая и полезная мощности, а также значения КПД рассчитывались по измеренным значениям. Определялись предельные значения частоты вращения, моменты нагрузки и напряжения, при которых обеспечивается устойчивый, плавнорегулируемый по скорости режим работы привода.

Механические характеристики двигателя  $n=\varphi_1(M_H)$  для случая постоянства приложенного к двигателю напряжения  $U_j=\text{const}$  показаны на рис. 2, а зависимость развиваемой полезной механической мощности от скорости  $P_M=\varphi_2(n)$  — на рис. 3. При этом отметим, что полезную мощность  $P_M=120$  Вт двигатель развивает при скорости  $n_1=850$  об/мин, а максимум полезной мощности  $P_{M\max}=145$  Вт двигатель обеспечивает при скорости  $n_2=600$  об/мин.

Результаты испытаний, проведенных при по-

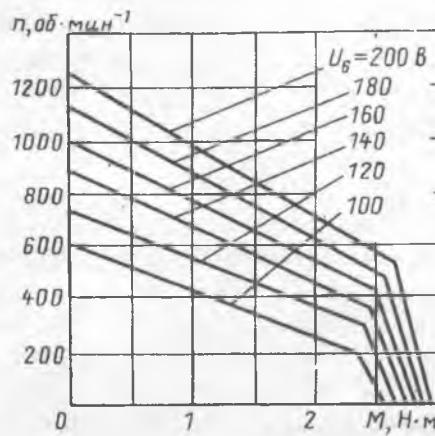


Рис. 2

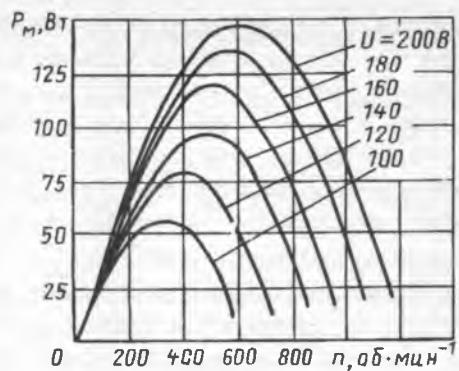


Рис. 3

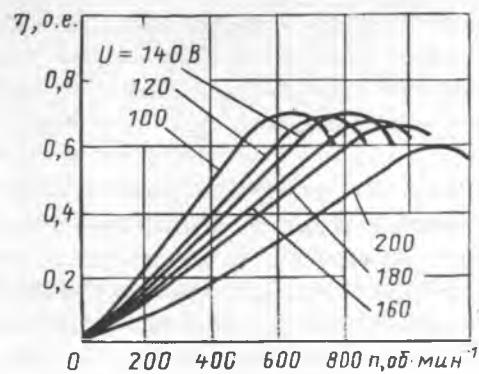


Рис. 5

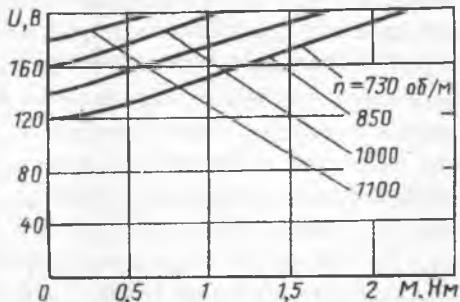


Рис. 4

стоянной скорости двигателя  $n=730, 850, 1000, 1100$  об/мин, обеспечиваемой регулированием подводимого напряжения питания, показаны на рис. 4. При этом выполняется практически линейная зависимость развиваемого двигателем момента от приложенного напряжения.

Исследования привода в широком диапазоне приложенного к полупроводниковому преобразователю напряжения  $U_n=(10\div 200)$  В подтвердили возможность обеспечения высокого КПД привода, достигавшего значений  $\eta=0,7$  во всех режимах. Некоторые из кривых зависимости  $\eta=\varphi_3(n)$  показаны на рис. 5. При этом следует отметить, что испытуемый образец имел значительный запас по нагреву по сравнению с прототипом, обусловленный не только отсутствием потерь в роторе, но и пониженными ввиду большой ЭДС значениями токов в фазах статора. Повышение же

напряжения свыше 200 В ограничивалось классом напряжения использованных транзисторов.

Таким образом, проведенные исследования управляемого вентильного двигателя и результаты сопоставления их с асинхронным конденсаторным двигателем ДАК 120-4 показывают возможность создания на основе последнего регулируемого электропривода, имеющего при тех же массогабаритных показателях двигателей повышенный на 20–30% КПД и увеличенную на 40–60% развивающую полезную мощность. При этом обеспечивается устойчивый плавнорегулируемый режим работы двигателя при скоростях от  $n_{min}=60$  об/мин до  $n_{max}=1200$  об/мин и рост электромагнитного момента при низких скоростях до  $M_{em}=(2,5\div 3,0)$  Н·м, а также высокий КПД энергопреобразования, в том числе при низких скоростях.

#### Список литературы

1. Игнатов В.А., Вильданов К.Я. Торцевые асинхронные электродвигатели интегрального изготовления. М.: Энергатомиздат, 1988.
2. Казанский В.М., Пашков Н.И. Потенциал развития малых электрических машин с ферронаполненными обмоточными структурами // Техническая электродинамика. 1994. № 3. С. 49–53.
3. Проектирование четырехполюсных асинхронных двигателей малой мощности торцевого исполнения / В.И. Кисленко, В.Н. Оноприч, Н.И. Пашков, А.В. Салан // Техническая электродинамика. 1993. № 5. С. 32–37.

# Асинхронные двигатели с двухслойным ротором

А.М. ОЛЕЙНИКОВ

Севастопольский военно-морской институт

Известные достоинства асинхронных двигателей (АД) с обмоткой ротора в виде беличьей клетки — простота конструкции, малые габариты и значительные удобства в эксплуатации сделали эту машину доминирующей среди различных типов электромеханических преобразователей как в промышленном производстве, так и в автономных электроэнергетических системах современных кораблей и подводных лодок.

Однако присущие этим двигателям недостатки ограничивают, а в ряде случаев и полностью исключают возможность их применения. В области эксплуатации к ним относятся:

низкая добротность пуска (большой пусковой ток и малый пусковой момент, рис. 1, кривые 1), большие потери энергии при переходных режимах, значительные провалы напряжения в сети при пуске мощных двигателей);

низкая надежность в электроприводах динамического режима работы (с частыми пусками, реверсами, торможениями). В промышленных и судовых системах имеют место случаи массового выхода короткозамкнутых двигателей из строя;

сложность плавного регулирования частоты вращения;

повышенные вибрации и шумы магнитной

природы.

В области технологий:

наличие брака при заливке роторов, снижающее качество и надежность двигателей;

большие отходы высокодефицитной электротехнической стали.

В настоящее время в нашей стране и в ряде зарубежных стран наряду с развитием двигателей с короткозамкнутым ротором большое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям двигателей с массивным ротором различной конструкции, среди которых наиболее перспективными представляются двигатели с массивным двухслойным ротором (АДДР).

Конструкция двухслойного ротора предельно проста (рис. 2). Он имеет наружный массивный цилиндр 1, объединяющий функции магнито- и токопровода, шихтованный (или силошной) сердечник 2 для замыкания магнитного потока, торцевые магнитозамыкающие кольца 3 из меди и вал 4, объединяющий все элементы ротора. Такой ротор отличается высокой надежностью в работе, но главное — характеристики двигателя приобретают ряд важнейших преимуществ перед обычными короткозамкнутыми АД.

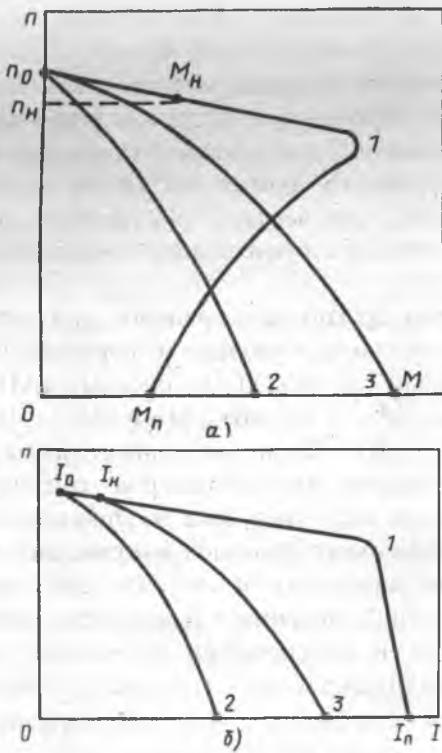


Рис. 1. Сравнительные характеристики АД с различными роторами:

1 — короткозамкнутый ротор; 2 — массивный ротор;  
3 — двухслойный ротор

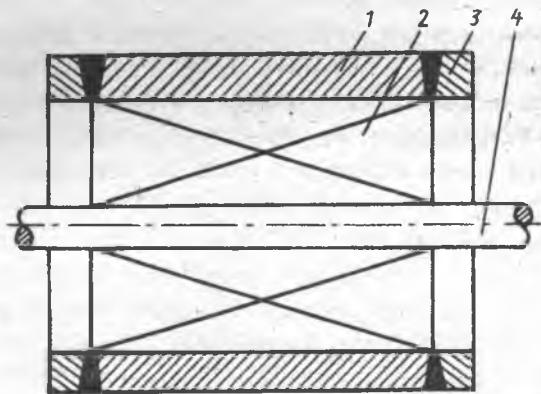


Рис. 2. Двухслойный ротор

Прежде всего уменьшается пусковой ток, а пусковой момент увеличивается (рис. 1), что снижает влияние пуска на сеть и потери энергии при переходных процессах. Мягкая механическая характеристика АДДР позволяет использовать простейшие и весьма надежные устройства для изменения частоты вращения двигателя (дроссели насыщения, реакторы), а отсутствие пазов на роторе, демпфирующее действие роторных токов значительно снижают шумы и вибрации двигателя электромагнитной природы. Именно эти

свойства делают АДДР весьма эффективным для использования в установках со специфическими режимами и условиями эксплуатации.

Остановимся на основных результатах научных разработок, положенных в основу новой машины.

1. Самым принципиальным явилось обоснование необходимости применения для ротора материала, обладающего вполне определенными (оптимальными) значениями магнитной проницаемости  $\mu_r$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$ , при которых одновременно обеспечиваются наилучшие энергетические показатели ( $\eta$  и  $\cos\varphi$ ) при номинальной нагрузке и минимальные потери энергии при переходных процессах. Эти величины должны иметь следующие значения:  $\mu_r = 20 \div 50$  (при  $H \approx 10^4$  А/м),  $\rho = 0,7 \div 1,0 \cdot 10^{-7}$  Ом·м — для машин малой мощности;  $\rho = 1,4 \div 2,0 \cdot 10^{-7}$  Ом·м — для машин большой мощности.

2. Получены материалы с требуемыми свойствами. Это литые сплавы на основе меди и железа (сталь—меди), которые имеют высокую прочность, относительно невысокую стоимость и легко подвергаются всем видам механической обработки.

Разработаны также новые композиционные материалы, получаемые по весьма простой технологии прессования и последующего спекания порошков железа и меди.

3. Кардинальным является переход от массивного сплошного ротора к двухслойному. Толщина массивного цилиндра  $h_{\text{ц}}$  должна находиться в строго определенном соотношении с глубиной проникновения  $\Delta$  магнитного поля в тело ротора при установленвшемся режиме работы,  $h_{\text{ц}} = 0,9\Delta$ .

4. Разработаны методики однозначного определения параметров ротора и магнитной проницаемости  $\mu_r$  ротора при произвольных значениях скольжения.

5. Решены уравнения электромагнитного поля в прямоугольных или цилиндрических координатах применительно к различным конструкциям роторов ( массивный, двухслойный, многослойный с произвольными соотношениями параметров слоев, сегментированный с магнитной анизотропией рабочего слоя) и к различным задачам, что позволило получить формулы мощности для любых частных случаев.

Решены уравнения поля для ротора с магнитной анизотропией массивного цилиндра.

6. Разработаны методы расчета и способы уменьшения добавочных потерь, что позволило увеличить КПД на 4–7% в зависимости от типа и мощности двигателя.

7. В заводских и лабораторных условиях отработаны технологические процессы литья, прессования, термической и механической обработки, изготовления роторов различной конструкции;

Вологодская областная универсальная научная библиотека

включающие процессы прессования и сборки, специальные способы сварки и пайки элементов ротора, балансировки, нанесения на поверхность ротора тонких наружных покрытий, капсулирования пазов и лобовых частей обмотки статора.

8. Исследованы характеристики двигателей с двухслойным ротором в самых разнообразных режимах работы применительно к электроприводам специального, общепромышленного и судового назначения, имеющим проблемы пуска, регулирования, ограничения вибрации и некоторые другие.

На МШЗ (г. Москва) в электроприводе (ЭП) с частыми пусками (более 300 пусков в час) был установлен АД с двухслойным ротором мощностью 125 кВт. Исходный двигатель мог работать не более 1–1,5 месяцев и выходил из строя из-за перегорания обмотки статора. При замене ротора двухслойным добротность пуска увеличилась в 2,7 раза, а потери энергии в обмотке снизились в пять раз и соответственно увеличилось допустимое по нагреву обмотки число пусков по сравнению с исходным двигателем. Существенно повысилась надежность ЭП. Установленный двигатель безаварийно проработал в течение 6 лет.

В середине 70-х годов на судах Балтийского морского пароходства начался массовый выход из строя трехскоростных АД, установленных в ЭП палубных грузоподъемных механизмов. Основными причинами отказов явились обрывы или выплавление стержней короткозамкнутой обмотки ротора из-за больших температурных и электромеханических напряжений при переходных режимах. Попытки ремонта роторов оказались безуспешными. Применение же двухслойных роторов не только полностью решило проблему повышения надежности двигателей, но и позволило увеличить допустимое число операций в единицу времени, повысить производительность механизмов.

Проблемы другого рода решены при установке АДДР в отдельных судовых и корабельных ЭП с единичными, но тяжелыми пусками (АН 92 – 73 кВт, 4А132 – 11 кВт, МАФ 81 – 55 кВт, А111 – 115 кВт). Пуск этих двигателей в обычном исполнении от генераторов соизмеримой мощности или затруднен, или вообще невозможен из-за недопустимых провалов напряжения в сети. В подобных установках применение двухслойного ротора не только повышает надежность двигателя в целом, но и обеспечивает улучшение вибродинамических характеристик, условия обитаемости, снижает провалы напряжения в сети, увеличивает допустимое число пусков.

Во всех испытаниях ЭП отчетливо проявились также высокие качества АДДР в динамических режимах — снижение пускового тока при более

высоком пусковом моменте и, как следствие, уменьшение потерь энергии, увеличение допустимого числа пусков, реверсов, торможения, времени стоянки под пусковым током, снижение влияния пуска на сеть, уменьшение электромагнитных переходных моментов.

Для ЭП продолжительного режима работы коэффициент использования габаритной мощности  $K_p = 80 \div 100\%$  для АДДР, КПД  $= 75 \div 80$ . Коэффициент мощности АДДР остается ниже, чем в АДКР, на 0,05–0,08, что связано главным образом с необходимостью увеличения воздушного зазора.

В регулируемых ЭП корабельных турбомеханизмов использование дросселей насыщения или тиристорных регуляторов повышает эффективность АДДР в среднем в 1,6–1,8 раза по сравнению с короткозамкнутым АД.

В ЭП специального назначения решающее значение имеет снижение спектральных вибраций на зубцовых частотах от 8 до 35 дБ, общего уровня вибрации на 4–9 дБ, шума — на 2–3 дБ.

В заключение отметим, что характеристики двигателя с двухслойным ротором еще не до-

ведены до предельно возможных, что требует дальнейшего изучения электромагнитных процессов и совершенствования технологии.

#### Список литературы

1. Могильников В.С. Асинхронные электродвигатели с массивными и двухслойными роторами. Симферополь: Таврия, 1967. С. 93.
2. Могильников В.С. Оптимальное значение магнитной проницаемости массивного ротора асинхронного электродвигателя // Электричество. 1963. № 8. С. 42–45.
3. Олейников А.М. Электромагнитные и геометрические соотношения в многослойных роторах АД // Электричество. 1986. № 3.
4. Олейников А.М. Физические процессы и соотношения в двухслойном роторе с магнитной анизотропией в верхнем слое // Электричество. 1987. № 8.
5. Олейников А.М. Исследование добавочных потерь от высших гармонических намагничивающей силы статора в массивном роторе АД // ИВУЗ. Электромеханика. 1975. № 1. С. 25–30.
6. Олейников А.М., Стрельников А.Н. Практические рекомендации к изготовлению двухслойных роторов из маломагнитных сплавов // Электротехника. 1975. № 10. С. 27–30.
7. Могильников В.С., Олейников А.М., Стрельников А.Н. Асинхронные электродвигатели с двухслойным ротором и их применение. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 119.

## Синтез электромеханических преобразователей, совмещенных с электронными компонентами

Ю.П. КОСЬКИН

Санкт-Петербургский электротехнический университет

Электронизация электромашиностроения — одно из направлений развития электротехники, основанное на совмещении электромеханических преобразователей (ЭМП) с электронными компонентами (ЭК), обеспечивающими преобразование рода тока и параметров электрического тока, управление, диагностику и защиту. Происходящее при этом функциональное и конструктивное объединение энергетических и информационных процессов в одном техническом устройстве приводит к созданию модификаций электрических машин (ЭМ), отличающихся от обычных ЭМ повышенными управляемостью и быстродействием, прецизионностью, диагностируемостью и другими улучшенными или новыми качествами.

Достижения и высоко оцениваемые перспективы развития, открываемые при использовании новых материалов (сверхпроводниковых, редкоземельных магнитов и др.), позволяют инженерам рассчитывать на создание новых и дальнейшее совершенствование известных моделей ЭМ.

Особое значение электронизация приобретает в малом электромашиностроении, что обусловлено

ростом потребности в исполнительных устройствах и устройствах преобразования информации для систем автоматики, обладающих повышенными надежностью и гибкостью управления, способных широко взаимодействовать с элементами вычислительной техники, в том числе микропроцессорной.

В то же время опыт электронизации показывает, что простое электрическое или конструктивное соединение ЭМП с ЭК без предварительной оптимизации их параметров не позволяет получить заданные выходные показатели при минимальной стоимости, размерах и т.п. Иными словами, введению в состав ЭМ электронных компонентов должны предшествовать расчеты и проектные оценки, использующие соответствующие критерии и направленные на поиск оптимальных вариантов: по числу витков, фаз и параллельных ветвей якорных обмоток, сечению меди и размерам сердечников ЭМП, по способам получения информации о скорости и положении врачающегося ротора, по типам полупроводниковых преобразователей и коммутирующим элементам.

таторов и т. д.

Во многих случаях требуется выполнение многовариантных расчетов с использованием уточненных математических моделей, описывающих функционально объединенные ЭМП и ЭК.

Решение задач оптимальной электронизации ЭМ требует разработки и применения специальных теорий и технологий, основанных на правильном использовании апробированных теорий и технологий электромеханики, электроники и кибернетики.

Совокупность физических представлений, методов разработки схем и расчета характеристик, а также новые технологии производства и испытания ЭМП, совмещенных с ЭК, в настоящее время образовали самостоятельное научно-техническое направление, получившее название «электромеханотроника» [1–3]. Электрические машины, отвечающие формуле  $\text{ЭМ} = \text{ЭМП} + \text{ЭК}$ , называются электромеханотронными преобразователями (ЭМТП) [4].

**Критерии оптимизации.** Совмещение ЭМП с электроникой улучшает его характеристики и технико-экономические показатели. Более того, ЭМ приобретают качества, которые не могут быть получены в электрической машине без электроники: прецизионность и стабильность показателей, быстродействие, регулируемость, повышенную надежность. В качестве примеров можно привести следующие: ликвидация щеточно-коллекторного узла в вентильных машинах привела к повышению долговечности; применение электронных схем стабилизации потока возбуждения вращающихся трансформаторов и асинхронных тахогенераторов в несколько раз снизило влияние технологических погрешностей на точность передачи информации; совмещение электромеханических датчиков с аналого-цифровыми преобразователями позволило создать информационные машины с выходным сигналом в цифровой форме и большой точностью измерения угла поворота.

Электроника, улучшая показатели электрических машин, в то же время заставляет отойти от обычных способов оценки и выбора машин только по традиционным статическим характеристикам (зависимости КПД, частоты вращения, коэффициента мощности, потребляемого тока от полезной мощности на валу двигателей; внешние и регулировочные характеристики у генераторов и др.).

Первостепенное значение приобретают такие динамические характеристики (ДХ), как время разгона и останова, устойчивость работы при сбросах и набросах нагрузки, точность и время позиционирования и др.

Для расчета статических характеристик ЭМТП могут использоваться обычные методики, применяемые при проектировании электрических ма-

шин. Расчет динамических характеристик приходится вести с использованием теории автоматического управления и методик, разработанных при создании электроприводов [5, 6].

Современные и перспективные ЭМТП с точки зрения оценки конструкции и расчета ДХ можно подразделить на две основные группы: ЭМТП постоянной структуры, к которым относятся преобразователи с не изменяющимися в рабочих режимах активными размерами и схемами включения обмоток, и ЭМТП переменной структуры, получаемой прежде всего путем переключения в схемах обмоток. В обеих группах осуществляется как глубокое регулирование параметров питающего напряжения, частоты тока, частоты вращения, так и изменение и поддержание выходных показателей в узких, но с высокой точностью пределах.

В качестве обобщенного критерия статической эффективности при проектировании ЭМТП целесообразно использовать критерий:

$$K_c(\xi) = K_c^0 [\Pi_c(\xi)], \quad (1)$$

где  $\Pi_c$  — энергетические показатели качества ЭМТП: масса, размеры модулей, номинальные значения КПД и коэффициентов мощности, перегрузочная способность, виброактивность, нагрев и другие;  $\xi$  — параметры ЭМП, полупроводниковых преобразователей (ПП), устройств диагностирования (УД), защиты (УЗ) и управления (УУ).

Основное значение в этом случае имеют электромагнитные нагрузки материалов ЭМП, размеры и масса ЭМТП. В качестве такого рода критериев в современной практике используются приведенная стоимость, отношения выходной полезной мощности к массе и размерам ЭМТП.

Динамические характеристики вводятся в расчетную модель в виде ограничений  $O_d(\Pi_d)$ , где  $\Pi_d$  — динамические показатели качества ЭМТП, к которым в первую очередь относятся базовые постоянные времени, учитывающие параметры обмоток ЭМП и ПП, основной магнитный поток и потоки рассеяния, вихревые токи и момент инерции, а также значения безразмерных коэффициентов, учитывающих краевые эффекты, кратности пусковых токов или токов короткого замыкания и реакцию якоря.

Связь  $\Pi_d$  и ДХ осуществляется с помощью структурных схем и динамических моделей [2].

Для ЭМТП с переменной структурой чаще используется целевая функция, в качестве которой применяется обобщенный критерий динамической эффективности:

$$K_d(\xi) = K_d [\Pi_d(\xi)]. \quad (2)$$

В качестве  $K_d$  могут использоваться как интегральные показатели в виде отношения полной

энергии, преобразованной в механическую работу динамических сил, к энергии, затраченной на полезную работу, так и отдельные показатели: чувствительность, или разрешающая способность, системы, максимальные значения выходной динамической переменной (скорости, ускорения, провалы напряжения и др.), время разгона или реверса, скорости движения при заданной нагрузочной диаграмме и т. д.

Статические характеристики в этом случае вводятся в расчетную модель в виде ограничений  $O_{cj}(\xi_c)$ .

Выразив критерии и ограничения в уравнениях (1) и (2) в виде функций варьируемых аргументов  $\xi_j$ , можно получить уравнения вида

$$K_c^*(\xi, \nu_{0j}) = K_c(\xi) + \sum_{j=1}^J \nu_{0j} O_{dj}(\xi); \quad (3)$$

$$K_d^*(\xi, \nu_{0j}) = K_d(\xi) + \sum_{j=1}^J \nu_{0j} O_{cj}(\xi); \quad (4)$$

а затем системы уравнений

$$\frac{\partial K^*(\xi, \nu_{0j})}{\partial \xi_j} = 0, \quad j=1, 2, \dots, \nu,$$

которые совместно с сопряженными системами ограничений  $O_{di}^*(\xi)=0$  или  $O_{ci}^*(\xi)=0$ , где  $i=1, 2, \dots, i$ , позволяют получить обобщенные системы из  $(\nu+i)$  уравнений, решаемых известными способами [2].

Проектирование, оптимизация и синтез ЭМТП с учетом требований по ДХ в обеих группах ведутся с применением ЭВМ в такой последовательности:

выполняется обычный расчет ЭМП, ПП и УУ и определяются параметры  $\xi_j$ , позволяющие рассчитывать показатели  $P_c$  и  $P_d$  в первом исходном приближении;

составляются структурные схемы и динамические модели, с применением которых определяются  $P_c$  и  $P_d$ ; значения последних сопоставляются с заданными;

осуществляется расчет  $K_c^*$  (или  $K_d^*$ ) с перебором значений критериев эффективности.

**Выбор и согласование характеристик ЭК и ЭМП.** Особенности работы и свойства ЭМТП определяют необходимость согласования характеристик устройств электроники и ЭМП на стадиях выбора и проектной оценки вариантов ЭМП и электронных компонентов энергетической и информационной подсистем. Это осуществляется путем функционального и конструктивного сопоставления вариантов ЭМП и ЭК, а также алгоритмов их взаимодействия и программного обеспечения.

Использование ПП делает необходимым учет особенностей их работы при проектировании

ЭМП и решении задач электромагнитной и конструктивной совместимости ЭМП и ПП.

Большинство ЭМТП в настоящее время характеризуется дискретным управлением вентиляй в ПП. Главная особенность ПП в ЭМТП с дискретным управлением — ключевой характер работы вентиляй — транзисторов или тиристоров. Следствием этого является наличие интервалов неуправляемости, т. е. отрезков времени, в течение которого выходное напряжение ПП не зависит от входного сигнала. Значение и характер изменения интервалов неуправляемости, зависящие от схемы и способа управления ПП, во многом определяют динамические показатели ЭМТП. Чем меньше интервал неуправляемости по сравнению с постоянными временем ЭМП, тем меньше дискретность ПП сказывается на динамических характеристиках ЭМТП.

В быстродействующих ЭМТП с малоинерционными ЭМП целесообразно применять ПП с малыми интервалами неуправляемости, т. е. ПП с естественной коммутацией, включаемые в автономную сеть повышенной частоты (400—1000 Гц), или ПП с искусственной коммутацией. При этом наибольшей гибкостью обладают ПП с искусственной коммутацией, изменяющие характер и параметры силовой цепи в зависимости от режима работы [5, 6].

При согласовании принципиальных схем и параметров ЭМП и ПП необходимо также учитывать влияние характера нагрузки и способа возбуждения ЭМП. Например, использование в ЭМП постоянного тока независимого возбуждения при обеспечении больших перегрузок по моменту сопровождается пропорциональным задаваемой перегрузке увеличением тока в якоре. На увеличенную токовую нагрузку необходимо рассчитывать вентили, дроссели, конденсаторы ПП, что приводит к увеличению их массогабаритных показателей. Казалось бы, что в этом случае лучше использовать ЭМП последовательного возбуждения, у которых ток якоря при перегрузках оказывается меньшим, чем у ЭМП независимого возбуждения. Однако у ЭМП последовательного возбуждения резко возрастает индуктивность якорной цепи за счет включения в нее обмотки возбуждения. С одной стороны, это уменьшает пульсации тока в якорной цепи ЭМП при питании его от ПП и потери, но с другой — ухудшает быстродействие ЭМТП.

Интервалы неуправляемости в ПП однозначно зависят от тактовой частоты — частоты питающей сети или частоты коммутации. Для ПП с естественной коммутацией или широтно-импульсной модуляцией интервалы неуправляемости постоянны; для преобразователей с частотно-импульсной модуляцией они зависят от входного сигнала. В то же время пульсации динамических

переменных ЭМТП зависят от соотношения интервалов неуправляемости и параметров ЭМП. При несогласованности этих величин пульсации могут достигать существенных значений, что приводит не только к увеличению потерь и ухудшению точности, но и к таким специфическим явлениям, как положительный статизм (повышение средней частоты вращения якоря ЭМП при росте момента нагрузки), ограничивающий минимально достижимую частоту вращения, а также удары динамического тока, требующие упраеждающего токоограничения.

Рассмотрение и согласование характеристик энергетических ЭК и ЭМП выявило целесообразные области их применения и наилучшего функционального совмещения. В вентильных двигателях переменного тока питание коллекторных ЭМП лучше осуществлять через транзисторные и тиристорные выпрямительные устройства (ВУ) с широтно-импульсной модуляцией. Транзисторные ВУ целесообразно использовать с ЭМП мощностью до 500–800 Вт и с низковольтными ЭМП, тиристорные ВУ – в высоковольтных и более мощных ЭМТП.

Выбор схемы ВУ определяется мощностью ЭМП и требованиями к качеству выходного напряжения. Однофазные ЭМТП находят ограниченное применение – преимущественно в роботехнике для приводов небольшой мощности, с невысокими требованиями к качеству движения. Более широко используются трехфазные нулевые ВУ [5].

В приводах большей мощности, с высокими требованиями к качеству движения, особенно при малых скоростях, применяются мостовые трехфазные схемы. При больших нагрузках ЭМТП, как правило, работают в режиме непрерывного выпрямленного тока, при малых – ток становится прерывистым, а внешние характеристики ВУ – нелинейными.

В расчетах динамических характеристик тиристорное ВУ как элемент ЭМТП может представляться нелинейным импульсным элементом или звеном чистого запаздывания. При этом время запаздывания принимается равным времени неуправляемости ВУ, которое зависит от схемы. Приближенно при относительно увеличенной инерционности системы импульсно-фазового управления тиристорами ВУ может быть представлено апериодическим звеном. При низкой полосе пропускания ВУ может описываться даже безинерционным звеном [5].

При использовании в цепях возбуждения ЭМП вращающихся ВУ появляется необходимость защиты вентилей от перенапряжений, возникающих в обмотке возбуждения при несинхронных режимах работы: при асинхронных пусках синхронных двигателей и выпадении из синхронизма

синхронных генераторов в обмотках возбуждения наводятся большие асинхронные ЭДС. Защита вентилей в таких случаях может осуществляться с помощью стабилитронов, варисторов, тиристоров.

В большинстве случаев вращающиеся ВУ выполнять целесообразно неуправляемыми на основе кремниевых диодов с повышенной механической прочностью – вентилей таблеточного типа со специальными прочными гибкими мембранными, рассчитанными на работу при центробежных ускорениях 5000г и более.

Применение транзисторных широтно-импульсных ВУ позволяет создавать ЭМТП, отличающиеся хорошими динамическими характеристиками, широкой полосой пропускания (до 100 Гц), большим диапазоном регулирования скорости (до 1:100000). Кроме того, они отличаются слабым влиянием на питающую сеть и, следовательно, отсутствием необходимости во введении дополнительных индуктивностей в ЭПС [5].

В частотно-регулируемых асинхронных двигателях небольшой мощности целесообразно применять двухзвенные преобразователи частоты (ПЧ), т. е. ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока. Их достоинством является возможность получения напряжения любой требуемой частоты и амплитуды, недостатком – двукратное преобразование энергии, что снижает КПД и увеличивает массогабаритные показатели ЭМТП [6].

При использовании ПЧ с непосредственной связью происходит однократное преобразование энергии, что увеличивает КПД и уменьшает размеры ЭМТП. Но при этом появляются недостатки: низкий коэффициент мощности со стороны питающей сети, усиливается влияние высших гармоник на работу ЭМП, усложняется система управления и ограничивается максимальное значение частоты тока на входе ЭМП.

Частотно-регулируемые синхронные двигатели относятся к ЭМТП, включающим в свой состав ПЧ и синхронные ЭМП. Если такой ЭМТП не имеет обратной связи по положительному ротора, т. е. является разомкнутым, то он представляет собой колебательное звено с частотой собственных колебаний, зависящей от угловой характеристики, момента инерции и демпфирующих свойств ЭМП. С ростом синхронной частоты вращения коэффициент демпфирования уменьшается из-за относительного увеличения потоков рассеяния. Так как электропривод, включающий в себя ЭМТП и рабочий механизм, обычно имеет переменный момент инерции, то при переменной частоте свободных колебаний разомкнутого ЭМТП это приводит к невозможности обеспечения требуемого качества регулирования.

В этом смысле более предпочтительными яв-

ляют я бесконтактные двигатели, т.е. ЭМТП с синхронными ЭМП, но замкнутые по положению ротора. Обычно такие ЭМТП имеют небольшую мощность и небольшое число фаз в статоре синхронного ЭМП. Для получения более плавного движения, особенно в области низких частот вращения, необходимо изменять напряжение на обмотках ЭМП по закону, максимально приближенному к синусоидальному, т.е. применять инвертор с широтно-импульсной модуляцией [5].

В шаговых двигателях (ШД) для обеспечения движения ротора ЭМП путем последовательного включения обмоток статора целесообразно применять многоканальные переверсивные инверторы, элементы которых работают в ключевом режиме, число каналов инвертора принимать равным числу фаз обмотки статора ЭМП, а в качестве ключевых элементов использовать транзисторы и тиристоры. Инвертор ШД должен включать в себя взаимосвязанные усилитель мощности и регулятор напряжения. Регулятор обеспечивает импульсное изменение напряжения на ШД при изменении частоты импульсов путем формирования процессов нарастания и спада тока в моменты коммутации фаз.

Способ коммутации определяет точность и устойчивость движения ротора ШД, его нагрузочную способность. Простейшим и наиболее распространенным является способ последовательного переключения (перебора) одной или группы возбужденных фаз, получивший название естественной коммутации [5]. Последняя может быть симметричной, когда число тактов равняется числу фаз ЭМП, и несимметричной, при которой число тактов можно увеличить вдвое и тем самым уменьшить шаг двигателя в два раза по сравнению с вариантом симметричной коммутации.

При симметричной коммутации обеспечивается неизменное значение момента ШД в каждом такте, что обуславливает меньшие колебания скорости и угла. В случае применения четырехфазных ШД целесообразно использовать парную коммутацию фаз, увеличивающую устойчивость движения и момент двигателя (примерно в  $\sqrt{2}$  раз) по сравнению с поочередной коммутацией [5].

Несимметричную коммутацию фаз целесообразно применять для повышения устойчивости движения ШД в зоне собственных частот, соответствующих электромеханическому резонансу, и при уменьшенных шагах.

Однако оба способа коммутации не исключают колебательности движения на низких и средних частотах управления.

Наилучшие динамические характеристики обеспечивает способ управления ШД, получивший название электрического дробления шага. Он основан на введении дополнительной модуляции

фазных токов внутри основного периода коммутации [6]. При этом сочетаются шаговый принцип перемещения магнитного потока статора и возможность его фиксации в требуемом положении с принципами плавного перехода потока из одной точки в другую.

Этот способ управления эквивалентен увеличению числа фаз ШД и особенно эффективен для малофазных ШД. Электрическое дробление шага позволяет уменьшить шаг ЭМП в целое или дробное число раз, а также получить низкие и сверхнизкие скорости движения с высоким качеством.

Сопоставление известных вариантов транзисторных инверторных (ИУ) устройств показывает, что ЭМТП, включающие в себя ИУ с нулевым выводом, являются конструктивно более простыми, так как все их транзисторные ключи могут быть выполнены с общим нулевым потенциалом, с использованием которого реализуется схема управления. В мостовых схемах целесообразно применять управление потенциально разделенное, например с помощью оптронных гальванических развязок.

Сопоставление вариантов ЭМТП, в которых синхронные ЭМП имеют одинаковые магнитный поток, допустимую мощность потерь и сечения обмоток статора, показывает, что выходная мощность ЭМТП, определяемая по значению среднего момента, и пульсации момента на валу ЭМП непосредственно связаны со схемой ИУ: пульсации момента доходят до 57% при использовании двухсекционных ЭМП и ИУ с нулевым выводом (двуухпульсная схема), уменьшаются до 21% в трехсекционных ЭМП, до 11% — в четырехсекционных ЭМП. Наименьшими (до 5%) являются пульсации момента в ЭМТП с пятисекционными ЭМП и ИУ с нулевым выводом, а также при использовании мостовых ИУ.

Наихудшее использование по мощности имеют ЭМТП с нулевыми схемами ИУ — относительное значение среднего момента составляет 45–64%. В ЭМТП с мостовыми схемами оно поднимается до 64–78%.

По изложенным причинам ЭМТП с двух- и трехсекционными ЭМП и ИУ с нулевым выводом применяются при номинальных мощностях, не превышающих 100 Вт, при мощности 100 Вт — ЭМП с четырех- и шестисекционными обмотками или мостовые схемы ИУ, при мощности, превышающей 1000 Вт, — ИУ с комбинацией тиристоров и транзисторов [2, 3, 5].

Поскольку транзисторы не могут воспринимать напряжения в обратном направлении, их нельзя использовать в инверторах тока. Для предотвращения появления недопустимых обратных напряжений в инверторах напряжения необходимо предусматривать высокочастотные шунтирующие диоды.

Электронные компоненты, используемые в информационных подсистемах (ИПС) электромеханических преобразователей, можно разбить на две группы. К первой следует отнести ЭК, обеспечивающиестыковку узлов и работу ЭМТП на уровне его принципа действия. Ко второй — ЭК, добавляемые к компонентам первой группы и обеспечивающие работу ЭМТП в составе электропривода, генераторного агрегата и т. п.

При выборе ЭК первой группы и согласовании их характеристик с характеристиками ЭМП и ЭК энергетической подсистемы целесообразно учитывать опыт и использовать методики, апробированные в автоматизированном электроприводе и системах автоматического управления. Аналогично с использованием указанных трудов и опыта создания комплектных электроприводов и устройств робототехники следует вводить в состав преобразователей ЭК второй группы.

Ориентация на использование в ИПС электронных компонентов предопределяет тем самым целесообразность применения в ЭМТП устройств с программным управлением, работающих в функции времени с обратной связью по переменной состояния.

Устройства с управлением в функции времени целесообразно применять в тех ЭМТП, где процессы протекают всегда по одной и той же временной диаграмме, или в тех преобразователях, где показатели процесса не могут быть измерены или измеряются с большими технико-экономическими трудностями. К ЭМТП такого вида можно отнести регулируемые асинхронные и синхронные двигатели, различные ЭМТП бытовой электротехники. Такие УУ относительно просты в изготовлении и дешевы.

Однако более предпочтительными для ЭМТ являются УУ, обеспечивающие управление в функции состояния процесса и приспособление выполняемой программы к случаям сбоя. В этих УУ очередная комбинация управляющих сигналов вырабатывается после того, как достигнуты определенные критерии в протекающем процессе, фиксируемые с помощью датчиков положения состояния. Подобные УУ применяются в вентильных двигателях и генераторах (бесконтактных машинах), синхронных генераторах с самовозбуждением.

Электронные УУ с программным управлением могут выполняться жестко программируемыми и с запоминающими устройствами.

В жестко программируемых УУ функции ЭК определяются функциями элементов ЭМТП и связями между ними. Само УУ собирается из элементов, блоков и модулей широкого назначения, соединяемых в соответствии с условиями конкретной задачи, реализуемой в ЭМТП. Время срабатывания ЭК в таких УУ является малым.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

(порядка  $10^{-6}$  с), изменение функций осуществляется аппаратными средствами.

В устройствах с программным управлением от запоминающего устройства функция управления реализуется в соответствии с инструкцией, заложенной в память УУ, УД и УЗ. ЭМТП с запоминающими устройствами являются проблемно независимыми, обладают внутренней памятью и вполне могут называться интеллектуальными. Время срабатывания ЭК в этих системах относительно велико (порядка  $10^{-3}$  с) и зависит от набора операций в программе. Изменение функций осуществляется путем изменения программного обеспечения.

В программируемых ЭМТП используются цифровые и цифроанalogовые УУ, реализуемые на цифровых и аналоговых ЭК.

К аналоговым ЭК, и прежде всего аналоговым ИМС, относятся приборы и схемы, предназначенные для обработки и преобразования аналоговых электрических сигналов. К последним относятся сигналы, в которых переносимая информация кодируется в непрерывных (плавных) изменениях какого-либо параметра (амплитуда, частота, фаза и т. д.) электрического тока или напряжения.

К цифровым ЭК относятся приборы, например цифровые ИМС и микропроцессоры, используемые для преобразования и обработки цифровых сигналов, получаемых путем дискретизации аналоговых сигналов.

Использование аналоговых УУ в ЭМТП по возможности следует ограничивать из-за необходимости переналадки системы при изменении параметров управления, требующей замены установок подстроек потенциометров и замены отдельных элементов, вследствие температурного дрейфа и старения аналоговых ЭК, из-за отсутствия гибкости, позволяющей расширять функциональные возможности УУ без изменения аппаратного обеспечения [3].

В случае применения цифроанalogовых УУ внешние контуры регулирования ЭМТП выполняются цифровыми, а внутренние контуры, включая усилительно-преобразовательные устройства, реализуются на основе аналоговых регуляторов и импульсно-фазовых устройств [3]. Цифроанalogовые УУ с микропроцессорами менее подвержены влиянию помех, старению и появлению погрешностей, связанных с температурным дрейфом, так как указанные факторы на параметры программного обеспечения не действуют. С помощью специализированного программного обеспечения в ЭМТП с цифроанalogовыми УУ и УД повышается эксплуатационная надежность и сокращается время поиска и устранения неисправностей.

Цифровые УУ предполагают цифровое управ-

ление всеми контурами ИПС в ЭМТП. При прямом цифровом управлении исполнительными элементами непрерывного типа [3] усложняются алгоритмы управления и предъявляются повышенные требования к быстродействию управляющей ЭВМ, вводимой в состав ЭМТП.

Динамические свойства ЭМТП в значительной степени зависят от способов и алгоритмов управления ЭМП и улучшаются при использовании в ИПС локальных обратных связей [3]. При этом обратные связи должны обеспечивать формирование управляющих команд, осуществляющих изменение как способа управления, так и алгоритмов коммутации обмоток ЭМП. Например, в современных ШД целесообразно предусматривать ЭК, обеспечивающие формирование циклограммы естественного переключения обмоток, электрическое дробление шага, коммутацию и формирование фазных токов обмоток [3]. В бесконтактных и вентильных двигателях ЭК дополнительно должны обеспечивать управление узлами связи и обработку их входной и выходной информации.

Очевидно, что для повышения эксплуатационных показателей в ЭМТП целесообразно применять бесконтактные исполнительные элементы и упрощать конструкцию ЭМП. При этом становится рациональным преимущественное использование импульсных сигналов в информационных и энергетических (ЭПС) подсистемах ЭМТП.

Перенос формирования высших уровней ин-

формационного обеспечения из ЭПС в ИПС позволяет предельно упростить ЭМП и повысить динамические показатели ЭМТП [3]. Наилучшие возможности создаются при использовании в ИПС микропроцессоров, позволяющих совместить задание алгоритмов функционирования, стабилизации и регулирования с максимальными скоростями протекания процессов электромеханического преобразования энергии в ЭПС.

**Вывод.** Представленные соображения по синтезу электромеханотронных преобразователей соответствуют современной элементной базе, приборам и устройствам. Появление новых материалов, ЭК и ЭМП, а также дальнейшие научные разработки безусловно могут изменить некоторые из рекомендаций.

#### Список литературы

1. Коськин Ю.П. Электромеханотроника и электромеханотронные преобразователи. Санкт-Петербург: ЛДНТИ, 1991.
2. Коськин Ю.П. Введение в электромеханотронику. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское изд-ние, 1991.
3. Герман-Галкин С.Г. Некоторые вопросы классификации устройств электромеханотронику // Изв. Вузов. Электромеханика. 1989. № 10.
4. Домрачев В.Г., Смирнов Ю.С. Цифроаналоговые системы позиционирования (электромеханотронные преобразователи). М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Сафонов Ю.М. Электроприводы промышленных роботов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. изд-ние, 1985.

## Системный подход при оценке виброактивности электрических машин

Ю.П. КОСЬКИН, Ю.И. СЕПП

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Ужесточение требований по вибровибрации, предъявляемых к вновь проектируемым электрическим машинам (ЭМ), неуклонное возрастание числа принципиально и в деталях отличающихся друг от друга конструкторских решений узлов ЭМ, ее элементов и машины в целом приводит ко все расширяющейся тенденции применения при решении задачи оценки вибровибрации в ходе проектирования ЭМ декомпозиции машины на основе разнообразных средств математического моделирования динамических процессов в конструкции. С точки зрения системологии сказанное свидетельствует о том, что процесс оценки виб-

роактивности в последнее время приобретает черты системы «организованной сложности», которая, если следовать К. Болдингу [1], представляет собой систему второго порядка сложности.

Однако указанные мероприятия оказываются эффективными при проектировании лишь в том случае, если придерживаться при их реализации одного из основных принципов системного анализа — принципа целостности. Согласно этому принципу [2] сложная система должна рассматриваться как единое целое, а значит декомпозиция системы — членение ее на поддающиеся более простому изучению части — и последующая ком-

позиция системы — объединение отдельных изученных ее частей — должны осуществляться в направлении генерирования информации, характеризующей систему, более высокого качества. Следовательно, эффективность оценки возрастает при росте ее организованности.

Сочетание принципа целостности с необходимостью обеспечения максимальной эффективности оценки требует разработки принципиально новой технологии проектирования малошумных ЭМ с помощью систем 3-го порядка сложности по Боулдингу — **систем автоматизированного проектирования (САПР) ЭМ с учетом требований по вибративности**, включающих в себя в качестве элементов как сам процесс оценки, так и его организацию.

Сказанное означает необходимость разработки и создания особого класса систем — **систем автоматизированной оценки вибративности (САОВ) ЭМ**, включающих в себя в качестве элементов модели процессов, определяющих вибративность; программные средства воссоздания моделей в ЭВМ; средства информационной взаимосвязи моделей; схемы, алгоритмы и средства управления оценкой на различных стадиях проектирования ЭМ [3, 4].

Заменив частично, а в ряде случаев даже полностью натурный эксперимент вычислительным, САОВ ЭМ выступает в качестве средства новой, информационной технологии оценивания вибративности ЭМ в ходе их проектирования с помощью САПР, эффективного средства интенсификации процесса оценки.

С точки зрения методологии разработки сложных технических систем [2] при переходе от низших уровней проектирования к высшим результат оценки последовательно выступает в качестве одного из физически измеримых критериев (обоснованного в рамках адекватной физической теории инварианта, зависящего от физических свойств системы), от значения которого зависит общий критерий эффективности ЭМ, а также в качестве технических требований, ограничений, налагаемых на параметры, определяющие критерий эффективности ЭМ, и самостоятельный функциональный критерия, служащего для оценки варьируемых конструкторских решений. Таким образом, функциональное и информационное назначение САОВ как элемента САПР ЭМ меняется в ходе проектирования и определяется морфологией, функциональной и информационной структурами САПР [2, 5, 6]. В связи с этим при разработке САОВ ЭМ следует придерживаться комплексного подхода, учитывающего связи САОВ с другими подсистемами САПР.

В то же время оценка вибративности машины осуществляется по собственным, внутренне замкнутым алгоритмам. Поэтому САОВ ЭМ,

пользуясь результатами работы других подсистем САПР как входными потоками данных, является относительно самостоятельным ее элементом. Значит оказывается возможной ее разработка в виде обособленной системы при максимальном учете вероятных связей САОВ в САПР и корректировки этих связей на различных стадиях комплексной отладки программ функционирования системы.

Последним условиям можно удовлетворить, если строго придерживаться обоснованного в системологии тезиса о необходимости организовывать все циклы САПР на основе физически измеримых критериев [2], а также разрабатывая САОВ автономно, модульного принципа проектирования сложных систем (этот принцип подразумевает декомпозицию системы при максимальном удовлетворении принципу целостности [7]).

Первое из указанных требований означает, что в основу оценки в качестве критерия должен быть положен такой инвариант адекватной реальной ЭМ физической теории вибративности, который зависит только от переменных состояния ЭМ и полностью вибративность ЭМ определяет. Кроме того, оцениваемая величина должна удовлетворять принципу релятивизма (т. е. не изменяться при изменении масштабов времени в описании вибраакустических процессов, [2]), а также удовлетворять принципу целенаправленности (т. е. быть чувствительной к изменениям конструкции в ходе проектирования и указывать пути для этого изменения [1, 2, 5]). Выполненный анализ [4] показывает, что данным требованиям удовлетворяют обобщенные системообразующие критерии, основанные на энергетических представлениях.

Следование второму из указанных требований представляет собой основную трудность в проектировании САОВ. Это связано с тем, что в силу принципа целостности функциональная, морфологическая и информационная структуры САОВ находятся в состоянии иерархической соподчиненности, взаимной органической обусловленности и дополнительности. Данное утверждение составляет содержание принципа единства и соподчинения указанных структур.

Действительно, в качестве одной из основных подсистем САОВ ЭМ выступает система математических моделей вибративности ЭМ (под математической моделью (ММ) вибративности ЭМ понимается приближенное описание данного свойства, качества ЭМ, выраженное с помощью математической символики), каждая из которых представляет собой совокупность функциональных связей между характеристиками машины, определяющими последнюю как техническое изделие (функционирующий заранее заданный и вполне

определенный технический объект), с одной стороны, и характеристиками, определяющими вибраактивность ЭМ, рассматриваемую как полностью определенное и явно проявляющееся качество [4], с другой стороны. Таким образом, ММ вибраактивности ЭМ представляют собой такое функциональное описание машины, при котором показатели (критерии) вибраактивности выступают в качестве функций параметров, определяющих существование и функционирование ЭМ как технического изделия.

Поскольку подобное функциональное описание с помощью составляющих его функций определяет правила преобразования одной информации (о состоянии ЭМ как заданного и функционирующего технического объекта) в другую информацию (о характерном для функционирующей ЭМ ее качестве — вибраактивности), то всякая ММ вибраактивности ЭМ порождает и алгоритмы (точные предписания, задающие вычислительные процессы, начинающиеся с произвольных исходных данных и направленные на получение полностью определяемых этими исходными данными результатов) оценки вибраактивности, выступающие при этом в качестве носителей функций и отношений, реализующих определенные способы действия по достижению значений этих функций. Таким образом, структура алгоритмов, порождаемая структурой ММ, как функциональной, выступает по отношению к последней в виде морфологической.

Конечной целью построения САОВ является автоматизация процесса оценки, осуществляемая с помощью ЭВМ. Поэтому окончательное закрепление морфологической структуры САОВ происходит в структуре ее программной реализации.

Из сказанного следует, с одной стороны, подчиненное значение морфологической структуры САОВ по отношению к ее функциональной структуре (иначе говоря, к структуре системы ММ вибраактивности ЭМ).

С другой стороны, в силу принципа целенаправленности (под целенаправленностью понимается функциональная тенденция, направленная на достижение системой некоторого состояния либо на усиление, сохранение некоторого процесса; при этом система оказывается способной противостоять внешнему воздействию, а также использовать среду и случайные события [2]) процесс оценки становится более эффективным, если в его основе лежат зависимости между данными, присущие решаемой проблеме, а не условия, dictуемые вычислительной средой. Если проект системы разработан на достаточно детальном уровне, допускающем моделирование основных процессов обработки данных, количество ошибок, возникающих на стадии реализации, резко снижается

[6].

Поэтому окончательная конфигурация системы определяется уже на этапе построения ее функциональной структуры, именно на этом этапе должна планироваться также программная реализация системы (в основный, главных ее, эскизных чертках). Последнее может быть успешно осуществлено только в том случае, если в ходе разработки функциональной структуры САОВ использовать методы проектирования структур программных систем [6].

Аналогичное положение складывается и с взаимоотношением функциональной структуры САОВ и ее информационной структуры, поскольку состав и организация входных потоков данных определяются уже математическим описанием ЭМ на стадии формирования ее ММ, а основные процессы (имеются в виду программные процессы обработки данных) связаны с обработкой функций. Внутренние информационные потоки САОВ определяются формой представления информации о характеристиках процессов, описываемых ММ вибраактивности, а специфические процессы, связанные с сопровождением данных и порождаемые данными в ходе их обработки, либо строятся с использованием уже существующего математического обеспечения, либо путем разработки специальных модулей на стадии проектирования программных средств системы.

Представленные принципы и особенности их взаимодействия положены в основу концепции автоматизации процесса оценки вибраактивности ЭМ в ходе их проектирования, а также проектирования систем, содержащих ЭМ в качестве элементов. На базе указанной концепции в СПб ГЭТУ разработаны и разрабатываются новые информационные технологии оценки вибраактивности ЭМ (и систем, включающих ЭМ в качестве элементов) при их создании.

#### Список литературы

1. Конторов Д.С. Теоретические концепции системотехники // Проблемы системотехники. Материалы IV Всеобщего симпозиума по проблемам системотехники. Л.: Судостроение, 1980. С. 102–104.
2. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985.
3. Математическое и программное обеспечение проектирования малошумных асинхронных двигателей / П.Г. Бильникис, Ю.П. Коськин, М.А. Непомнящий, Ю.И. Сепп. Киншинев: Штирица, 1987.
4. Сепп Ю.И. Разработка метода оценки вибраактивности магнитных источников в электрических машинах по потокам колебательной энергии // Техническая акустика. 1993. Т. 11. Вып. 2(4). С. 47–53.
5. Хубка В. Теория технических систем. М.: Мир, 1987.
6. Зиглер К. Методы проектирования программных систем. М.: Мир, 1985.
7. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. М.: Советское радио, 1962.

# Разработка асинхронных одномашинных преобразователей частоты ОПЧС-50/200 Гц

В.И. ПОПОВ, Ю.Н. ПЕТРОВ, Т.А. АХУНОВ, Л.Н. МАКАРОВ

Волжский инженерно-педагогический институт  
Ярославский электромашиностроительный завод

Асинхронные одномашинные преобразователи частоты (ОПЧ) представляют собой совмещение в общем магнитопроводе магнитных систем двух разнополюсных асинхронных машин; машина с полюсностью  $p_1$  работает в режиме двигателя со скольжением  $s_1=0,03-0,06$ , а машина с полюсностью  $p_2$  — в режиме электромагнитного тормоза (условно — генератора) со скольжением  $s_2 = 1 + (1-s_1)p_2/p_1 > 1$ . Разрабатываемые ОПЧС-50/200 Гц на мощности 4,0 и 5,5 кВ·А выполнены в конструкции асинхронного двигателя серии RA 132-4 (производства ЯЭМЗ), содержат на статоре две раздельные взаимоиндуктивно независимые трехфазные обмотки полюсностей  $p_1=1$  и  $p_2=3$ , а на фазном роторе — обмотку совмещенного типа с выводами ее трехфазных  $2p_2$ -полюсных зажимов на контактные кольца (рис. 1). Статорные обмотки подключаются к перв-

раторной  $p_2=3$  полюсностям приведены в табл. 1, где коэффициенты магнитной индукции в спинках и зубцах определяются по выражениям  $K_c=B_c/B_\delta=D/(2ph_cK_{ct})$  и  $K_3=t/(b_3K_{ct})=B_3/B_\delta$  при коэффициенте заполнения стали сердечников  $K_{ct}=0,97$ . Изоляция пазов ОПЧС принята по пазовой изоляции базовой машины (класс F при толщине изоляции 0,25 мм); площадь поперечного сечения паза  $Q_p$ , занимаемая обмотками, определялась с учетом пазовой изоляции, клина и припусков на сборку сердечников (по 0,2 мм по ширине и высоте паза); расчетные значения ширины зубцов и высоты спинки статора приняты увеличенными на 0,1 мм. В сердечнике ротора предусмотрены аксиальные вентиляционные каналы на диаметре  $D_{k2}=68,7$  мм при  $d_{k2}=9,0$  мм и  $n_{k2}=12$  штук. Длина сердечников статора и ротора ( $l_1=l_2$ ) ОПЧС принята равной 133 мм для мощности 4,0 кВ·А и 163 мм для мощности 5,5 кВ·А. Габаритные и установочные размеры ОПЧС-50/200 Гц соответствуют базовой машине.

Трехфазные статорные обмотки ОПЧС-50/200 Гц имеют целые числа на полюс и фазу и выполняются однослойными цепными с расположением  $2p_1=2$ -полюсной двигательной обмотки на дне пазов. Устранение взаимоиндуктивных связей между ними (по основным гармоническим полей) достигается путем сопряжения фаз  $2p_1=2$ -полюсной обмотки звездой и соединением фаз  $2p_2=6$ -полюсной генераторной обмотки в одну параллельную ветвь.

Совмещенная роторная обмотка — двухслойная с дробным числом пазов на полюс и фазу генераторной части ( $q_2=2,5$ ) при шаге катушек по пазам  $y_p=9$ . Она содержит  $6p_2=18$  катушечных групп (с номерами от  $1\Gamma$  до  $18\Gamma$ ); группы с нечетными номерами имеют по  $q_2+0,5=3$  катушки, а с четными номерами — по  $q_2-0,5=2$  катушки. Такая обмотка выполняется в соответствии с [3], соединяется в каждой генераторной фазе в  $a_{2\Gamma}=p_2=3$  ветви с уравнительными соединениями между равнопотенциальными для полюсности  $p_2$  точками параллельных ветвей (диаграмма ЭДС фазы Р1-0 для полюсности  $p_2=3$  на рис. 2, в). Каждая такая генераторная фаза образует для двигательной полюсности  $p_1=1$  трехфазную короткозамкнутую систему (диаграмма ЭДС фазы Р1-0 для полюсности  $p_1=1$  на рис. 2, г), а все  $m_{2\Gamma}=3$  генераторные фазы образуют для по-

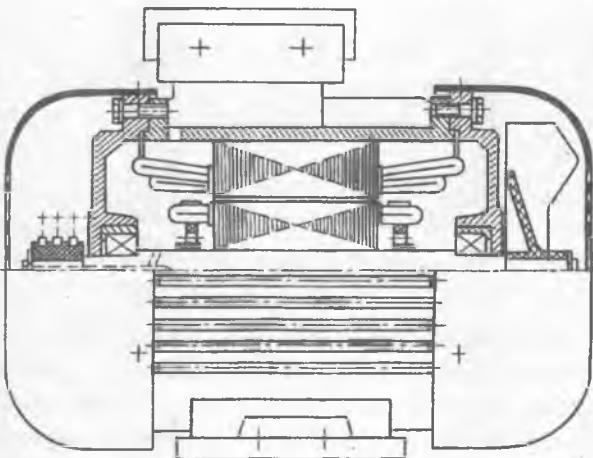


Рис. 1. Конструкция асинхронного ОПЧС-50/200 Гц

вичной трехфазной сети ( $U_1; f_1=50$  Гц) со встречным чередованием фаз, а трехфазное преобразованное напряжение  $U_2$  с частотой  $f_2=s_2 \cdot f_1 \approx 4 \cdot f_1 = 200$  Гц снимается с контактных колец.

Для магнитопровода ОПЧС-50/200 Гц сохранен неизменным сердечник статора, а для сердечника ротора принята сталь марки 2412 толщиной листов 0,35 мм при числе пазов  $z_2=45$  для укладки фазной симметричной совмещенной обмотки. Некоторые параметры совмещенного магнитопровода для двигательной  $p_1=1$  и гене-

Таблица 1

Статор ( $z_1 = 35$ )		Ротор ( $z_2 = 45$ )	
$p_1 = 1$	$p_2 = 3$	$p_1 = 1$	$p_2 = 3$
Марка стали/толщина листов, мм	2214/0,5	2412/0,35	
Диаметры сердечника $D_H/D$ , мм	206/129	128,2/47	
Расчетные значения:			
зубцовое деление $t$ , мм	11,26	8,95	
ширина/высота зубца $b_3/h_3$ , мм	5,5/19,7	4,25/18,9	
высота спинки $h_c$ , мм	18,9	36,4	15,7
длина линии в спинке $L_{C_2}$ , мм	147,0	42,4	19,6
площадь паза $Q_{\Pi}/Q_{\Pi}''$ , мм <sup>2</sup>	146,5/122,5	64,6/47,6	
масса $G_c/G_3$ , кг при $l_1=l_2=163$ мм	13,7/4,8	4,8/4,5	
Коэффициенты индукции $K_c=B_c/B_\delta$	3,52	1,82	1,40
$K_3=B_3/B_\delta$	2,11	2,17	
воздушного зазора $K_\delta$			
геометрии $K_\lambda=t/(9,55 \delta K_\delta)$			
Тип обмотки, расположение в пазу	2,115	1,681	
Шаг катушек по пазам $y_{\Pi}$			
Обмоточный коэффициент $K_{об}$			
Число фаз/ветвей $m/a$			
Число эффективных проводников в пазу $N_{\Pi}$			
Провод ПЭТМ-155, $d/d'$ , мм			
Число элементарных проводников в эффективном $n_{\text{эл}}$			
Сечение эффективного проводника $q_M$ , мм <sup>2</sup>			
Число витков в фазе $w_{\Phi}$			
$w_{\vartheta} = w_{\Phi} K_{об}$			
Масса меди обмотки $G_M$ , кг			
Коэффициент заполнения паза $K_{3,\Pi}=\Sigma(N_{\Pi} n_{\text{эл}} d^2)/Q_{\Pi}$			
Индукция в зазоре $B_\delta$ , Тл			

люсности  $p_1=1$  симметричную короткозамкнутую систему, эквивалентную  $m_{2\Delta}=9$ -фазной обмотке. Фазные зоны обмотки для  $m_{2\Gamma}=3$ -фазной генераторной полюсности  $p_2=3$  обозначены как  $A, Z, B, X, C, Y$  и их токи изображаются симметричной системой векторов в центре рис. 2,  $\delta$ ; чередование этих зон показаны на рис. 2,  $b$  (для  $z_2/p_2=15$  пазов одной повторяющейся для полюсности  $p_2=3$  обмотки). Для  $m_{2\Delta}=9$ -фазной двигательной полюсности  $p_1=1$  токи фазных зон представлены в виде трех симметрично смешенных систем  $A, Z, B, X, C, Y$  и им приписаны дополнительно два штриха (векторы токов на рис. 2,  $\delta$  и обозначения фазных зон на рис. 2,  $a$ ).

Многоугольник МДС для  $m_{2r}=3$ -фазной генераторной полюсности  $p_2=3$  строится по известному методу вспомогательной треугольной сетки (рис. 2,  $\delta$ ) в виде 12-угольника и по нему определяется коэффициент дифференциального рассеяния  $\sigma_{d2r\%}=1,73$ . Многоугольник МДС для

$m_{2d}=9$ -фазной двигательной полюсности  $p_1=1$  строится по методу вспомогательных равнобедренных треугольников [4] в виде 36-угольника (наружный на рис. 2,  $\delta$ ), по которому определяется коэффициент дифференциального рассеяния  $\sigma_{d2d\%}=0,185$ .

Электромагнитные расчеты ОПЧС-50/200 Гц выполнены в соответствии с методиками [1, 2] с учетом факторов магнитного и электрического совмещений. Разработанные трехфазные асинхронные одномашинные преобразователи частоты ОПЧС-50/200 Гц характеризуются высокими энергетическими показателями и малой общей массой, что обусловлено фактором электрического совмещения обмоток на роторе, а также использованием базовой асинхронной машины с алюминиевым корпусом. В табл. 2 приведено сравнение показателей разработанных ОПЧС с зарубежными образцами асинхронных преобразователей частоты зарубежных фирм [5, 6], выполненных в виде однокорпусных агрегатов с раз-

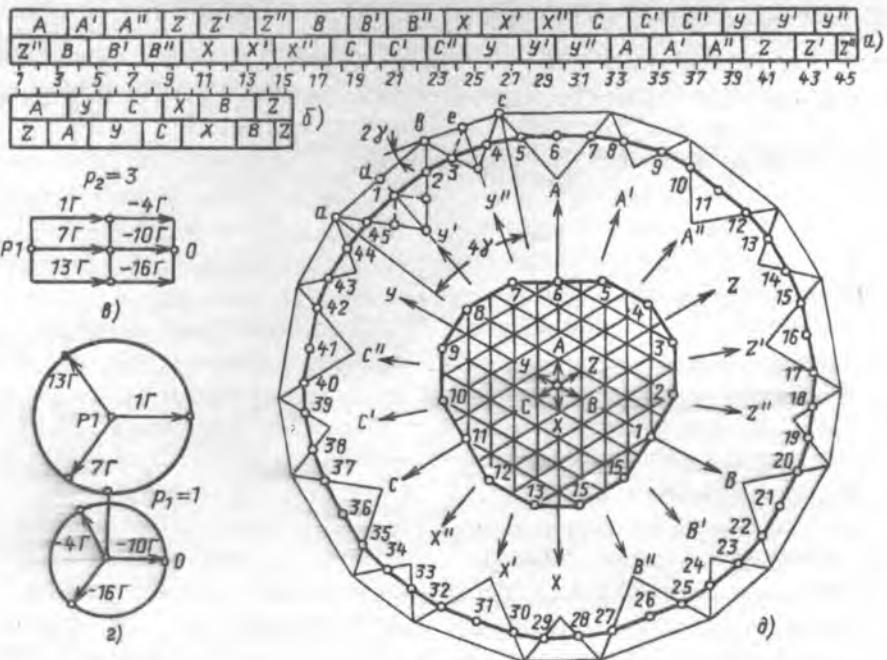


Рис. 2. Чередования фазных зон по пазам совмещенной роторной обмотки ОПЧС-50/200 Гц для полюсностей  $p_1=1$  (а) и  $p_2=3$  (б), диаграммы ЭДС фазы Р1 — 0 для полюсностей  $p_2=3$  (в) и  $p_1=1$  (г), многоугольники МДС для полюсностей  $p_2=3$  (внутренний) и  $p_1=1$  (наружный)

дельными магнитопроводами двигателя и генератора.

#### Список литературы

Таблица 2

Фирма	$S_{2\Gamma, H}$ кВт	$P_{2\Gamma}$ кВт	$I_{1\Gamma}$ А	$I_{1\Delta}$ А	$I_{BХ}$ А	Мас- са, кг	Степень заши- ты
«LOHER»	4,0	2,8	6,5	4,6	11,0	71	1Р44
«PERSKE»	4,0 5,0	2,9 3,4	6,8 7,6	4,2 5,2	10,0 12,0	79 85	1Р54
ОПЧС- 50/200	4,0 5,5	2,6 3,5	5,5 7,2	3,9 5,1	8,9 11,6	45 56	—

Таким образом, асинхронные ОПЧС-50/200 Гц, отличаясь простотой конструкции и изготовления (рис. 1), превосходят по массогабаритным показателям двухмашинные ПЧ 50/200 Гц зарубежных фирм.

1. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электрических машин. М.: Энергия, 1978.

2. Попов В.И. Электромашинные совмещенные преобразователи частоты. М.: Энергия, 1980.

3. А.с. 1050045 СССР. Трехфазно-многофазная совмещенная обмотка ротора / В.И. Попов и др. // Открытия. Изобретения. 1983. № 39.

4. Попов В.И. Определение дифференциального рассеяния многофазных совмещенных обмоток ротора одномашинных преобразователей частоты // Электричество. 1987 № 6.

5. Попов В.И., Петров Ю.Н. Электромашинные преобразователи повышенной частоты совмещенного типа на базе серийных асинхронных машин // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. М.: Информэлектро. 1987. Вып. 5(19).

6. Каталог фирмы «PERSKE» (ФРГ). Трехфазные асинхронные преобразователи частоты.

# Исследование динамических режимов работы асинхронных двигателей малой мощности с учетом их несимметрии, нелинейности предвключенных элементов и нагрузки

Е.В. БИБИК, инж., А.А. ВОЙТЕХ, В.И. КИСЛЕНКО, доктора техн. наук,  
А.Н. ПОПОВИЧ, канд. техн. наук

ИЭД НАН Украины

Асинхронные двигатели малой мощности с предвключенными линейными и нелинейными элементами в цепи статора и нелинейным характером нагрузки широко применяются в бытовой технике, медицине, промышленности. Реальными режимами работы таких двигателей являются динамические. Во время пускового и квазистабилизированного режимов нагрузка асинхронных двигателей не остается постоянной, а имеет периодический (компрессоры холодильников машин), случайный (центрифуги, стиральные машины), нелинейный (электронасосы), пульсирующий или другой характер. В качестве предвключенных элементов наряду с постоянными (сопротивления, емкости) используют нелинейные элементы (тиристоры, емкости, дроссели, позисторы). Нелинейность нагрузки, с одной стороны, и нелинейность предвключенных элементов, с другой, оказывают существенное влияние на протекание переходных процессов, что сказывается на эксплуатационных показателях электрических машин.

Поэтому актуальны углубленные исследования динамических режимов работы двигателей с целью проектирования их с учетом динамики и улучшения технико-экономических показателей. Задачи анализа пускового и квазистабилизированного режимов, коммутации предвключенных элементов в статорной цепи, учета нагрузки представляют интерес при разработке рекомендаций по формированию рациональных режимов работы и выбору типа двигателя и пускозащитной аппаратуры.

Решение перечисленных задач возможно с помощью соответствующих математических моделей. В Институте электродинамики Национальной Академии наук Украины решен ряд задач моделирования динамических режимов работы асинхронных двигателей. Разработана универсальная математическая модель, позволяющая проводить совместный анализ электромагнитных и механических переходных процессов с учетом пространственных гармоник МДС, несимметрии и нелинейности электромагнитных параметров, дискретности распределения проводников ротора, особенностей схем обмотки и наличия элементов во внешней цепи двигателя [1]. Формализован способ задания информации о структуре исследуемой обмотки двигателя и схеме включения ее во внешнюю цепь.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

В соответствии с алгоритмами расчетов определяются параметры асинхронного двигателя по ветвям обмотки и матрицы преобразований, позволяющие учитывать схему соединений ветвей обмотки статора и элементы внешней цепи. Перед расчетом режимов двигателя определяются нелинейные зависимости параметров. В разработанных математических моделях это зависимость коэффициента насыщения магнитной цепи по каждой гармонике от суммарной МДС данной гармоники, зависимости коэффициентов насыщения коронок зубцов статора и ротора в функциях МДС в пазу и зависимости изменения активного и индуктивного сопротивлений ротора в функции частоты его тока. В результате расчета нелинейных зависимостей получаются табличные функции, которые аппроксимируются кубическими сплайн-функциями и используются в дальнейших расчетах. Таким образом, матрицы параметров корректируются с учетом нелинейных зависимостей и формируются исходные линейные алгебраические уравнения относительно производных, решение которых осуществляется методом Гаусса. Результат решения является исходной информацией для численного интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге–Кutta. Выходными данными программ расчета динамических режимов являются зависимости токов в ветвях, электромагнитного момента  $M$ , частоты вращения ротора  $n_r$ , потерь энергии обмоток статора и ротора  $P_m$  от времени переходного процесса. Асинхронные электромагнитные моменты находятся в отдельности по каждой гармонике МДС, результатирующий момент определяется их суммированием.

Для учета нелинейного характера изменения параметров предвключенных элементов разработана математическая модель позистора, позволяющая исследовать переходные процессы асинхронных двигателей с позисторным пуском [2]. Она составлена с учетом изменения сопротивления позистора при нагреве на основе его динамической и токовой характеристик, полученных экспериментальным путем. Полученные результаты использованы для решения ряда конкретных задач.

С помощью разработанных математических моделей исследованы динамические режимы асинхронных двигателей с позисторным пуском

для приводов электронасоса и ротационного компрессора.

Рассмотрен асинхронный бескondенсаторный двигатель электронасоса БЦ-12-20 мощностью 570 Вт с последовательной схемой включения двухфазной обмотки, одна из которых шунтируется позистором  $R_p = 4$  Ом. Момент сопротивления двигателя электронасоса имеет существенно нелинейную зависимость от частоты вращения ротора. Для того, чтобы определить эту зависимость, были использованы напорная и энергетическая характеристики насоса, статический напор и расход при номинальной частоте вращения ротора, определяющий мощность, потребляемую насосом. В результате вычислений найдена зависимость момента сопротивления насоса от частоты вращения при заданных статическом напоре и расходе при номинальной частоте вращения.

Исследован асинхронный конденсаторный двигатель ротационного компрессора мощностью 100 Вт с двухфазной параллельной обмоткой статора, в одну из фаз которой включен рабочий конденсатор  $C_p = 3,9$  мкФ и параллельно ему — позистор  $R_p = 22$  Ом. Момент сопротивления двигателя ротационного компрессора является периодической функцией угла поворота ротора  $\gamma$ , а также зависит от частоты вращения  $n_r$  и давления в отводящем патрубке пневмосистемы. С учетом двух групп зависимостей  $M_c = f(n_r)$  — для номинального давления, соответствующего установленвшемуся режиму работы, и режима пуска аппроксимирован момент сопротивления в зависимости от  $\gamma$  и  $n_r$  [3].

Выявлены особенности переходных процессов асинхронного двигателя ротационного компрессора с позисторным пуском и периодической нагрузкой на валу. Расчет квазистабилизированного режима позволил выявить амплитуды пульсаций частоты вращения ротора двигателя и электромагнитного момента  $M$ , что вызвано эллиптичностью поля в воздушном зазоре и пульсациями момента сопротивления ротационного компрессора. Отмечено существенное влияние емкости на амплитуды пульсаций момента  $M$ . Использование математической модели позистора дало возможность получить качественную картину переходного процесса, определить броски тока и электромагнитного момента на интервале резкого роста сопротивления позистора.

На примере исследования режимов пуска двигателя электронасоса показана необходимость строгого учета момента сопротивления нагрузочного механизма. Для этого был рассчитан пуск двигателя с линейной, квадратичной и реальной нагрузочной характеристиками. Показано, что

квадратичная зависимость  $M_c$  дает более точный результат, чем линейная. Погрешность расчетов может достигать 10% при применении квадратичной зависимости  $M_c$  и 18% — линейной. Исследовано влияние изменения питающего напряжения и сопротивления позистора.

Так, при изменении сопротивления позистора с 4 до 16 Ом время пуска увеличивается в 2, а потери — в 1,5 раза. Определен диапазон изменения фазы напряжения при включении двигателя электронасоса. Область устойчивого запуска двигателя находится в пределах  $-18 \div 18^\circ$ ,  $162 \div 198^\circ$ . При этом время пуска изменяется от 0,185 до 0,433 с, энергия от 203 до 582 Дж. На основе исследований динамических режимов разработаны рекомендации по проектированию асинхронных двигателей.

Разработанные математические модели, алгоритмы и программы могут быть рекомендованы для исследования переходных процессов в различных схемах позисторного пуска асинхронных двигателей малой мощности, для оптимизационного проектирования двигателя с учетом режима его работы, оценки влияния нелинейного характера момента сопротивления нагрузки и параметров предвключенных элементов. Модели реализованы в виде программ на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV для ЭВМ ЕС 1061 и ФОРТРАН-77 для IBM PC/AT-286.

В последнее время широко используются методы, ориентированные на получение решений в численно-аналитическом виде. В этой связи следует отметить разработки математических и спектральных моделей, алгоритмов и программ для исследования переходных процессов в асинхронных двигателях с двух- и трехфазными распределенными обмотками с предвключеными элементами в цепи статора с использованием численно-аналитического метода дифференциально-тейлоровских преобразований, зарекомендовавшего себя для класса нелинейных задач [4].

#### Список литературы

1. Войтех А.А., Попович А.Н. // Моделирование переходных процессов в полюснoperеключаемых асинхронных двигателях. Киев: Наукова думка, 1989.
2. Бибик Е.В., Кисленко В.И., Попович А.Н. Математическая модель позистора для расчета переходных процессов в асинхронных двигателях малой мощности // Тез. докл. IV науч.-техн. конф. «Проблемы нелинейной электротехники». Киев: ИМПЭ НАН Украины, 1992.
3. Учет влияния динамических режимов при расчете привода ротационного компрессора / В.И. Кисленко, А.Н. Попович, Е.В. Бибик, В.В. Дручок // Регулируемые асинхронные двигатели. 1992. С. 146—158.
4. Кисленко В.И., Бибик Е.В. Применение дифференциально-тейлоровских преобразований для расчета переходных процессов однофазных асинхронных двигателей. Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики. 1991. № 697.

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.316.722.1

## Анализ структур регулирующих элементов дискретных стабилизаторов переменного напряжения

Ю.М. КОРШУНОВ, доктор техн. наук, В.Н. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук, В.А. СЫСОЕВ, инж.

Рязанская Государственная радиотехническая академия

При разработке дискретных регуляторов и стабилизаторов переменного напряжения большое внимание уделяется повышению технико-экономических показателей устройств, в числе которых важное значение имеют их массогабаритные характеристики.

Известны различные варианты построения дискретных регулирующих элементов (ДРЭ) для систем регулирования переменного напряжения, различающиеся как по способу кодирования вольтодобавочных секций, так и по конфигурации магнитопровода ДРЭ. При этом возникает задача оценки и сравнения характеристик различных ДРЭ еще на этапе выбора того или иного способа построения регулирующего элемента. Во многих случаях массогабаритные характеристики ДРЭ определяются параметрами трансформаторного элемента. Это прежде всего относится к устройствам, в которых ключевые элементы вынесены в отдельные регулирующие цепи [1, 2, 3]. Как известно, характеристикой, определяющей массу и габариты трансформаторного элемента, является габаритная мощность [4]. Однако для ДРЭ с регулируемым магнитным потоком [2, 3] данный показатель требует уточнения. В статье производятся оценка и сравнение различных вариантов ДРЭ по предлагаемой уточненной габаритной мощности.

Проиллюстрируем данный подход на примере стабилизаторов переменного напряжения. На рис. 1, а представлен вариант реализации ДРЭ с регулируемым магнитным потоком [2]. Вольтодобавочное напряжение  $U_{в.д}$  регулируется перераспределением магнитного потока стержня магнитопровода с сетевой обмоткой между двумя другими стержнями. Перераспределение потоков производится коммутацией регулирующих секций ключевыми элементами  $K$ . Напряжения регулирующих секций  $U_1, U_2, \dots, U_n$  распределены по двоичному кодовому закону, причем в качестве  $n$ -го старшего разряда используется сетевое напряжение  $U_c$ . На рис. 1, б, в показано распре-

деление потоков при значениях  $U_0(1+\alpha)$ ,  $U_0(1-\beta)$  сетевого напряжения, где  $\alpha, \beta$  — относительные значения отклонений сетевого напряжения от номинального значения  $U_0$ ;  $\Phi_0$  — магнитный поток в сетевом стержне магнитопровода при номинальном сетевом напряжении. Заметим, что при наименьшем сетевом напряжении поток в правом стержне принимает значение  $\Phi_0(1+\alpha)$ , равное наибольшему значению потока сетевого стержня. В этом случае крайние стержни магнитопровода выполняются одинакового сечения, что является целесообразным с точки зрения технологичности изготовления.

Определим габаритную мощность трансфор-

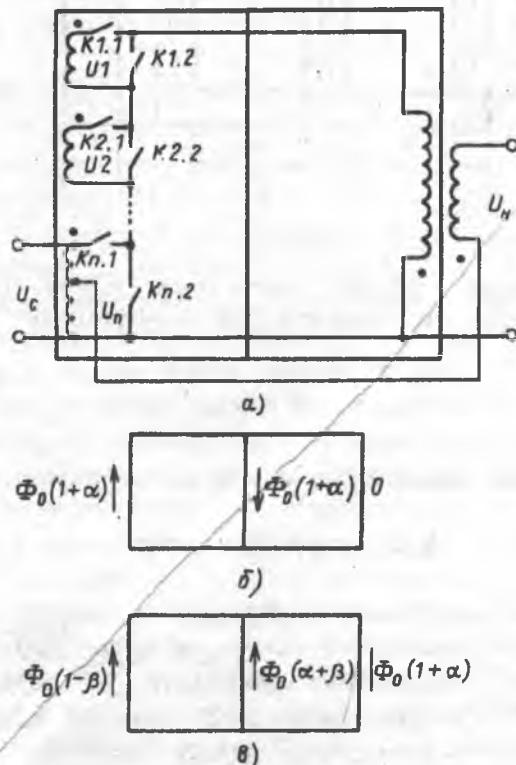


Рис. 1

маторного элемента, пренебрегая потерями энергии в обмотках и магнитопроводе ДРЭ:

$$P_r = \frac{1}{2} \sum_i U_{i \max} I_{i \max}, \quad (1)$$

где  $U_{i \max}$ ,  $I_{i \max}$  — наибольшие значения напряжений и токов обмоток.

Габаритная мощность трансформатора ДРЭ при  $\alpha=\beta=0,2$  и чисто активной нагрузке

$$P_r = 0,636 P_0,$$

где  $P_0$  — мощность нагрузки стабилизатора.

Рассмотренный ДРЭ можно представить состоящим из двух трансформаторных элементов магнитопроводы которых объединены, образуя трехстержневую магнитную систему. При этом сечение общего объединенного стержня равно общему сечению всего магнитопровода. Поскольку габаритная мощность пропорциональна произведению площади  $S_{ok}$  сечения окна магнитопровода и площади  $S_{ct}$  сечения магнитопровода [4], то применительно к устройству рис. 1, а габаритную мощность (1) следует уменьшить в такое число раз, во сколько раз уменьшается средняя площадь  $S_{cp}$  сечения объединенных магнитопроводов по сравнению с площадью сечения  $S$  этих магнитопроводов. Мысленно разбивая трехстержневой магнитопровод (рис. 2) на два одностержневых магнитопровода и усредняя площади их сечения

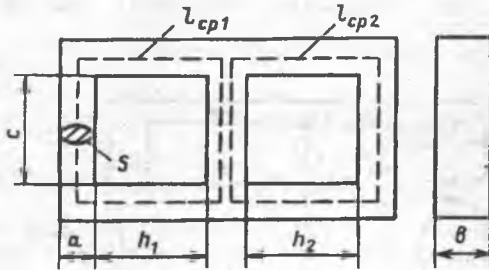


Рис. 2

по длинам средних магнитных линий  $l_{cp1}$ ,  $l_{cp2}$  определяем поправочный коэффициент:

$$K = \frac{S_{cp}}{S} = \frac{2(c+H+3a)+(c+a)}{2(c+H+3a)+2(c+a)}, \quad (2)$$

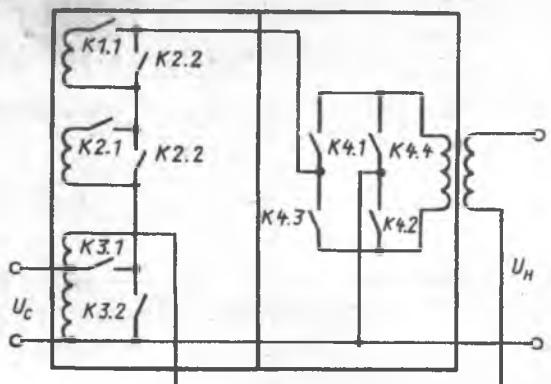
где  $H=h_1+h_2$ .

Можно показать, что при постоянстве

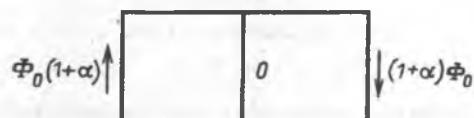
$$S_{ct} S_{ok} = a b c H = \text{const} \quad (3)$$

коэффициент  $K$  будет переменной величиной, зависящей от параметров геометрии магнитной системы. Устранить эту неоднозначность можно, определив значения  $a, b, c, H$  из условия минимума массы трансформаторного элемента

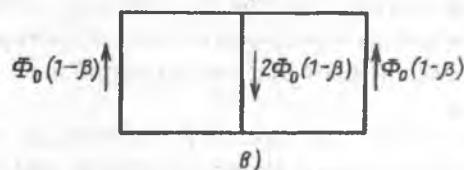
$$V_T(a, b, c, H) \rightarrow \min_{a, b, c, H} \quad (4)$$



а)



б)



в)

Рис. 3

при условии (3).

Как показали результаты расчетов на ЭВМ с использованием метода итеративного поиска оптимума, значение поправочного коэффициента при выполнении условия (4) является постоянной величиной, равной 0,9.

На рис. 3, а приведена схемная реализация ДРЭ, отличающаяся возможностью реверса потока стержня магнитопровода с вольтодобавочной обмоткой. На рис. 3, б, в показано распределение потоков в стержнях магнитопровода при крайних значениях сетевого напряжения. Как видно из рис. 3, площадь сечения среднего стержня должна составить  $2(1-\beta)/(1+\alpha)$  сечения  $S$  крайних стержней магнитопровода. Проведя аналогичные рассуждения для рассматриваемого случая, определим:

$$K = \frac{S_{cp}}{S} = \frac{2(c+H+3a)+2(c+a)(1-\alpha)/(1+\beta)}{2(c+H+3a)+2(c+a)}. \quad (5)$$

Результаты расчетов характеристик различных вариантов структур ДРЭ сведены в таблицу.

Вариант структуры ДРЭ	Рис. 1, а	Рис. 3, а	Рис. 4, а
$P_r$	$0,636 P_0$	$0,405 P_0$	$0,357 P_0$
$K$	0,9	0,935	1
$P_r = KP_r$	$0,57 P_0$	$0,38 P_0$	$0,357 P_0$

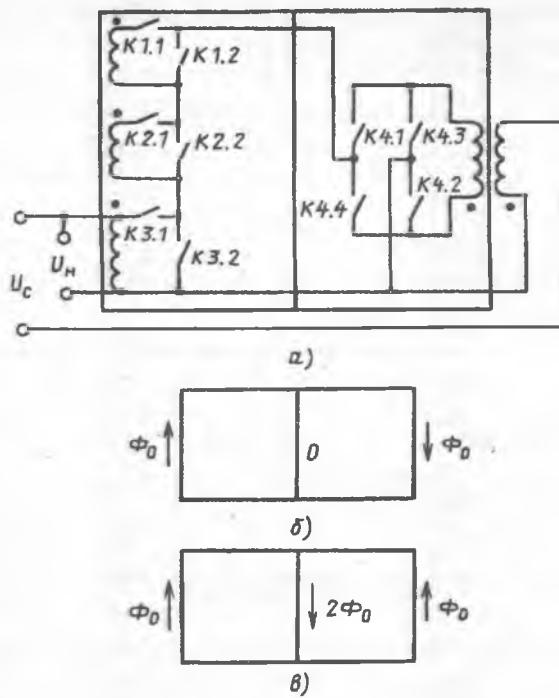


Рис. 4

Сопоставив картины распределения потоков на рис. 1, б, в, и рис. 3, б, в, можно сделать вывод о том, что уменьшение габаритной мощности во второй схемной реализации объясняется более эффективным использованием правого стержня магнитопровода, поток в котором при крайних режимах работы ДРЭ принимает ненулевое значение.

Еще большего эффекта удается достичь при использовании схемы рис. 4, а, в которой наряду с реверсом потока используется принцип перераспределения сетевого напряжения между обмотками, размещенными на двух стержнях трехстержневого магнитопровода [3]. В этом случае потоки стержней при крайних режимах достигают

одинаковых значений. Поскольку сечение среднего стержня равняется здесь удвоенному сечению боковых стержней, ДРЭ целесообразно выполнить на двух магнитно несвязанных одностержневых трансформаторных элементах.

## Выводы

1. Предложенный метод оценки габаритной мощности структур регулирующих элементов дискретных регуляторов и стабилизаторов переменного напряжения позволяет сравнивать различные варианты как одностержневых, так и многостержневых ДРЭ по массогабаритным показателям.

2. Наиболее предпочтительным с точки зрения габаритной мощности является ДРЭ, потоки стержней которого при крайних значениях сетевого напряжения принимают максимально близкие значения.

3. Предложенный вариант построения регулирующего элемента дискретного стабилизатора переменного напряжения позволяет существенно сократить габаритную мощность, составившую 63% уточненной габаритной мощности трехстержневого ДРЭ с регулируемым магнитным потоком и 94% — трехстержневого ДРЭ с реверсированием вольтодобавочного напряжения.

## Список литературы

- Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. Киев: Наукова думка, 1983.
- Коршунов Ю.М., Сысоев В.А., Федоров В.Н. Построение ИВЭП на основе трансформаторов с управляемым магнитным потоком // Тез. докл. IV Всесоюзн. науч.-техн. конференции «Проблемы преобразовательной техники». Киев, 1987, с. 165–166.
- А.с. 1293724 СССР. Однофазный стабилизированный преобразователь переменного напряжения / В.А. Сысоев // Открытия. Изобретения. 1987. № 2.
- Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Энергия, 1973.

УДК 621.313.004.6

## Особенности структур генеральных совокупностей электроприводов объектов электроэнергетики

О.В. ФЕДОРОВ, канд. техн. наук

*Нижегородский государственный технический университет*

Каждый изготовленный или намеченный к изготавлению электроприемник (например, электродвигатель), линия, трансформатор, другие изделия, образующие электрическую цепь, выбираются для установки (применения), опираясь на законы классической электродинамики. Но оказывается, что этих законов недостаточно: на совокупность изделий, образующих электрическое хозяйство, как систему, накладывается необходимое условие существования и функционирования, отражающее действие закона информационного отбора и проявляющееся в устойчивости некоторого предельного распределения изделия и процессов [1]. Выделив цех промышленного предприятия, само предприятие, отрасль, народное хозяйство как техногенез, можно выполнить анализ видовой структуры электрооборудования, описываемого непрерывной кривой

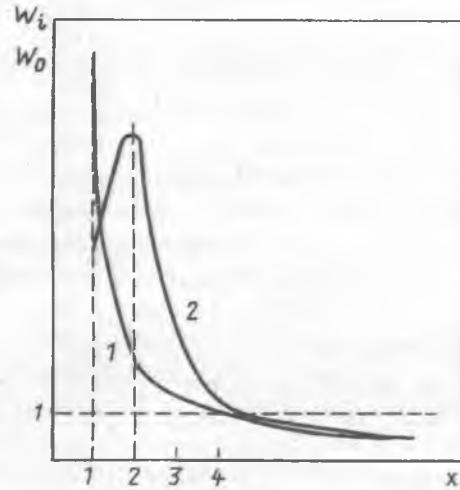
$$W_i = \frac{W_0}{x^{1+\alpha}},$$

где  $W_1 = [W_0]$ ,  $W_1$  — общее число видов, встречающихся по одному разу;  $x \in [1, \infty]$  — непрерывный аналог численности популяций  $a_i$ ;  $\alpha$  — постоянная распределения.

В соответствии с этой методикой были проанализированы видовые распределения генеральных совокупностей электродвигателей предприятий металлургии и машиностроения [2, 3]. Наибольшее число видов в этих распределениях имеет первая каста [1] (рисунок, кривая 1). Первые три касты содержат более 60% общего числа видов электродвигателей в каждой из выборок.

Анализ выборок и генеральных совокупностей электродвигателей АЭС и ТЭЦ, выполненный нами, показывает, что в отличие от общепромышленных предприятий объекты электроэнергетики имеют несколько иное видовое распределение. Наибольшее число видов электродвигателей имеет вторая каста.

В табл. 1 представлено видовое распределение



Распределение видов электроприводов:  
1 — предприятий metallurgii и машиностроения;  
2 — объектов электроэнергетики

генеральной совокупности электродвигателей ТЭЦ АО ГАЗ. Число видов, представленных одним электродвигателем, составило  $W_1 = 11$ , например, виды 360 кВт марки ДАМСО-147; 600 кВт марки А313; 315 кВт марки А4-400 и т.д.; число видов, представленных двумя электродвигателями, составило  $W_2 = 14$ ; тремя —  $W_3 = 7$  и т.д. Самый многочисленный вид, представленный 45-ю двигателями, вид 7 кВт серии АО42. Общее количество видов  $S = \sum_1^K W_i = 67$ , а суммарное число электродвигателей  $U = \sum_1^K a_i W_i = 442$ . Средняя повторяемость составляет  $d = U/S = 6,6$ . Видов, представленных не более, чем тремя электродвигателями (первые три касты), оказалось 48%, что значительно меньше, чем по предприятиям металлургии и машиностроения [2, 3].

Количество видов электродвигателей второй касты на 27% больше, чем первой. Характер такого распределения соответствует кривой 2 (ри-

Таблица 1

$K^*$	$a_i$	$W_i$	$a_i W_i$
1	1	11	11
2	2	14	28
3	3	7	21
4	4	7	28
5	5	4	20
6	6	4	24
7	8	4	32
8	9	5	45
9	10	1	10
10	11	1	11
11	13	1	13
12	16	1	16
13	18	1	18
14	19	1	19
15	20	1	20
16	21	1	21
17	28	1	28
18	32	1	32
19	45	1	45
		$S = 67$	$U = 442$

$K^*$  — каста — группа видов, представленных одинаковым числом двигателей.

сунок) и объясняется тем, что на объектах электроэнергетики в соответствии с жесткими требованиями к безаварийной работе станций осуществляют многократное резервирование технологического оборудования, а следовательно, и его электродвигателей. Виды электродвигателей первой касты применяются на объектах электроэнергетики только для уникальных (с точки зрения повторяемости) целей.

Анализ видового распределения электродвигателей АЭС производился как по выборкам структурных подразделений, так и в целом по станции. Исходными статистическими материалами послужили данные структур электродвигателей блоков Калининской и Ростовской на Дону АЭС.

По всем структурным подразделениям АЭС численные значения относительных частот появления электродвигателей вторых каст ( $\omega_2$ ) значительно больше, чем первых каст (табл. 2). Под относительной частотой появления электродвигателей  $i$ -й касты в видовом распределении понимается  $\omega_i = W_i/S$ . Наибольшее количество редко встречаемых видов электродвигателей наблюдается в реакторном отделении АЭС, где они применяются для уникальных целей. В машзале и спецкорпусе количество видов электродвигателей первых трех каст несколько меньше, чем в реакторном отделении. В целом по АЭС этот показатель лучше, чем на ТЭЦ. Количество видов электродвигателей второй касты на 106% больше, чем в первой. Это объясняется тем, что для АЭС по сравнению с ТЭЦ добавляются еще более жесткие требования по ядерной и радиационной безопасности станций. Эти требования выражаются в том числе к еще более широкому резервированию технологического оборудования и применению многоканальной системы безопасности.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

ности, что неизбежно приводит к увеличению повторяемости видов электродвигателей. Например, по существующим нормам [4] на два рабочих насоса водяного охлаждения генераторного блока устанавливается два резервных. В некоторых случаях устанавливают еще и ремонтный насос. Приводом каждого насоса служит электродвигатель вида 110 кВт серии ЧАМ280.

Таблица 2

Структурное подразделение АЭС	Количество видов электродвигателей первых трех каст, %	Численные значения				
		$\frac{\omega_1}{\omega_1}$	$\frac{\omega_2}{\omega_2}$	$\frac{\omega_3}{\omega_3}$	$s$	$d$
Машзал	38,9	0,028 23,9	0,333 138,2	0,028 31,8	36	5,8
Спецкорпус	43,5	0,113 96,6	0,274 113,7	0,048 54,5	62	6,3
Вспомогательные сооружения	55,7	0,18 153,8	0,279 115,6	0,098 111,4	61	4,8
Реакторное отделение	64,4	0,22 188,0	0,271 112,4	0,153 173,9	59	4,6
В целом по АЭС	44,5	0,117 100%	0,241 100%	0,088 100%	137	8,5

В табл. 2 также приведены удельные веса относительных частот первых трех каст  $\omega_i'$  по структурным подразделениям АЭС. Численные значения удельных весов определялись соотношением

$$\omega_i' = \frac{\omega_i}{\omega_{i,0,3}} \cdot 100\%,$$

где  $\omega_{i,0,3}$  — относительная частота появления электродвигателей  $i$ -й касты в целом по объекту.

По объектам электроэнергетики обобщающие показатели видового распределения электродвигателей лучше, чем по предприятиям metallurgии и машиностроения. Например, по предприятиям черной металлургии [1]  $d=4,6$  и  $\omega_1=0,5$ , а на объектах электроэнергетики  $d=6,5+9,0$  и  $\omega_1=0,3$  ( $\omega_2=0,34$ ).

Следует отметить, что на крупных промышленных предприятиях видовое распределение трансформаторов вида 10/0,4 кВ также описывается кривой 2 (рисунок).

Ввиду отмеченной особенности видового распределения электродвигателей на объектах электроэнергетики формула определения  $W_i$  справедлива для значений  $x \geq 2$ .

С точки зрения унификации электроремонта необходимо увеличивать значение  $d$ , а количество видов электродвигателей, особенно первой касты, уменьшать (уменьшается  $\omega_1$ ). Все эти изменения в генеральной совокупности должны производиться при неизменном суммарном числе установленных электродвигателей  $U$ , которое обеспечивает заданный технологический процесс. Такое управление

ление генеральной совокупностью необходимо осуществлять, в первую очередь, путем уменьшения числа видов электродвигателей первых трех каст видового распределения.

Для исследования влияния структуры множества эксплуатируемых электродвигателей на эффективность обслуживания и ремонта предлагаются формула взаимосвязи суммарной трудоемкости электроремонта  $T_c$  с параметрами видового распределения, учитывающая существование в видовых распределениях партии однотипных электрических двигателей, а также снижение трудоемкости выполнения работ при увеличении партии однородных двигателей

$$T_c = \sum_1^k T_1 i^{-\beta} i W_i = T_{cp} \sum_1^K i^{1-\beta} W_i,$$

где  $T_1$  — трудоемкость ремонта первого двигателя однородной партии из  $i$  двигателей, чел.-ч;  $T_{cp}$  — трудоемкость ремонта двигателя средней мощности с учетом процентного содержания двигателей различной категории сложности, чел.-ч;  $\beta$  — коэффициент, характеризующий интенсивность технологического процесса выполнения работ, т. е. снижение трудоемкости фактически выполненной работы по обслуживанию каждого последующего двигателя в однородной партии (за счет уменьшения времени на переналадку оборудования, освоения ремонтниками наиболее эффективных приемов работы, повышения использования специализированного оборудования и инструмента, улучшения использования материалов, внедрения прогрессивных технологических процессов). Для условий ремонтных цехов промышленных предприятий  $\beta=0,05 \div 0,15$ .

Как правило, эффект от снижения трудоемкости не определяется ввиду сложности учета, отсутствия сведений о структуре множества установленного на предприятиях оборудования, но он проявляется в разной напряженности рабочего дня двух бригад электриков, когда в одну смену приходится ремонтировать разные электродвигатели, а в другую (при одинаковой расчетной трудоемкости выполнения работ за смену) происходит случайное образование серий, что повышает производительность труда.

Отношение трудоемкости, рассчитанной с учетом коэффициента  $\beta$ , к трудоемкости, рассчитанной без учета  $\beta$ , дает количественную оценку напряженности выполнения электроремонтных работ по структуре множества электродвигателей

$$H_t = \sum_1^K i^{1-\beta} W_i / \sum_1^K i W_i.$$

Пределальное значение  $H_t=1$  означает, что рассматриваемая структура представлена только различными электродвигателями, разнотипными партиями, в которых не может происходить снижения трудоемкости при ремонте и обслуживании (самый неэффективный случай построения структуры). Уменьшение численного значения  $H_t$  свидетельствует о снижении разнообразия, появления видов, представленных большим числом электродвигателей.

Показатель  $H_t$ , являясь оценкой оптимальности построения структуры по критерию затрат на электроремонт, позволяет определить, на сколько может быть снижена трудоемкость выполнения электроремонтных работ при данном построении структуры (видовом распределении).

Особую группу электродвигателей составляют высоковольтные двигатели. Общее их количество на АЭС равно 59, а суммарная установленная мощность превышает 100 МВт, причем 40% двигателей — это двигатели системы безопасности (по мощности около 13%) и 60% — двигатели нормальной эксплуатации АЭС (по мощности — 87%).

Из генеральной совокупности электродвигателей АЭС выделяют группу двигателей контролируемой зоны, которые ремонтируются в особой зоне.

Использование видового распределения множества электродвигателей на предприятии приводит к улучшению формирования заказов запасных узлов к двигателям и позволяет оптимизировать структуру этих заказов.

Дополнительные сведения по видовым структурам электродвигателей изложены в [5].

#### Список литературы

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 1991.
2. Кудрин Б.И. Научно-технический прогресс и формирование техноЗенозов // ЭКО. 1980. № 8. С. 25–28.
3. Кудрин Б.И. Выделение и описание электрических ценозов // Изв. ВУЗов. Сер. Электромеханика. 1985. № 7. С. 49–54.
4. РД 210.006-90. Правила технологического проектирования атомных станций. М.: Росэнергоатом, 1990.
5. Кудрин Б.И., Барышников О.П., Фуфаев В.В. Определение периодичности и объемов технического обслуживания и ремонта электрических машин специализированными предприятиями // Промышленная энергетика. 1993. № 3. С. 19–21.

# ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

## Многоканальная система лазерной компьютерной графики

С.В. БЛИНОВ, С.А. ВИЦИНСКИЙ, кандидаты техн. наук, В.Д. ДИВИН, А.В. КЕЛЛЕР,  
И.Л. ЛОВЧИЙ, В.Н. ЧЕКЕЛЬ, Ю.И. ЧУДАКОВ, А.Я. ЧУХНИН

НИИКИОЭПиС ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

В последнее время лазерные световые эффекты все чаще и чаще применяются для художественного оформления различных зрелищных программ в театре и на эстраде, в рекламе и на выставках. Основное изобразительное средство из набора лазерных световых эффектов — лазерная компьютерная графика (ЛКГ), позволяющая создавать как отдельные изображения, так и блоки компьютерной мультиплексации, отображать текстовую информацию в виде логотипов и бегущей строки.

В статье рассматриваются многоцветные лазерные системы, предназначенные для формирования посредством ЭВМ сложных динамических зрелищных образов.

Возможности приборной реализации систем ЛКГ в первую очередь определяются используемыми лазерными средствами. Наибольшее распространение в технике ЛКГ нашли газовые лазеры непрерывного действия — маломощные гелий-неоновые лазеры с мощностью генерации 5—50 мВт и достаточно мощные (до 5—7 Вт) лазеры на переходах ионов инертных газов аргона и криптона.

В последнее время все более широкое развитие получают лазеры на парах металлов, которые являются сейчас одними из самых мощных источников когерентного излучения в видимом диапазоне длин волн [1, 2]. Технология изготовления этих лазеров постоянно совершенствуется. Они обладают более высоким КПД по сравнению с лазерами на переходах ионов инертных газов. Например, практический КПД для лазера на парах меди может достигать примерно 1%, а средняя выходная мощность излучения — десятков ватт при частоте повторения импульсов излучения десятки килогерц. Использование лазеров на парах металлов позволит существенно улучшить ряд важных эксплуатационных характеристик существующих систем ЛКГ. В частности, снизить энергопотребление с десяти киловатт (argonовые лазеры) до двух (лазеры на парах меди), исключить водяное охлаждение, выполнить прибор в компактном модульно-блочном исполнении.

Спектральный диапазон генерации лазеров этого класса достаточно широк. Эффективную ге-

нерацию в зеленой и желтой областях спектра обеспечивают лазеры на парах меди. Излучение в красной области может быть получено лазером на парах золота. Мощная генерация в синей области спектра реализуется рекомбинационным лазером на парах стронция. Вместе с тем, несомненный интерес для систем ЛКГ представляют многоцветные лазеры, в идеале лазеры «белого» цвета, с мощностью излучения порядка нескольких ватт, значительно расширяющие возможности лазерных зрелищных программ. Простая установка нескольких лазерных излучателей с необходимым набором длин волн генерации малооправданна из-за резкого увеличения табаритов прибора.

Одно из основных преимуществ использования лазеров на парах меди с серийными газоразрядными трубками (ГРТ) для создания многоцветных систем — наличие в спектре генерации двух мощных линий излучения  $\lambda_1=510,6$  нм и  $\lambda_2=578,2$  нм. Спектральный диапазон излучения этих лазеров может быть расширен при использовании преобразователей частоты, в частности, при ВКР в кристалле нитрата бария [3]. Частотный сдвиг рассеяния в этом кристалле  $\Delta\nu=1046$  см<sup>-1</sup>, примерно равный полуразности частот основных линий генерации лазера, позволяет создать достаточно простой многоцветный излучатель видимого диапазона с четырьмя почти эквивалентными спектральными линиями  $\lambda_1=510,6$  нм;  $\lambda_2=539,4$  нм;  $\lambda_3=578,2$  нм;  $\lambda_4=615,4$  нм.

Оптическая схема многоцветного лазера на парах меди с ВКР-преобразователем изображена на рис. 1. Серийная ГРТ (1) типа «Кулон Д» с длиной активной зоны 350 мм и диаметром разрядного канала 12 мм помещалась в неустойчивый телескопический резонатор (увеличение  $M=60$ ) с зеркалами (2, 3). Поляризационный кубик (4) из стекла БФ-13, помещенный в резонатор, обеспечивал линейное состояние поляризации излучения лазера на выходе резонатора. Мощность излучения лазера составляла примерно 2,2 Вт ( $\lambda=510,6$  нм) и 1,8 Вт ( $\lambda=578,2$  нм) в угле расходимости излучения около 0,3 мрад при длительности импульсов генерации по

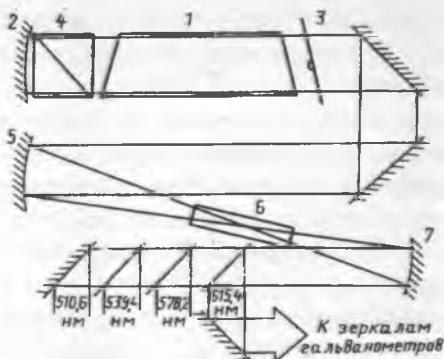


Рис. 1. Лазер на парах меди с ВКР-преобразователем

лу высоте около 9 нс и частоте следования импульсов 16 кГц. Для фокусировки излучения в нелинейный кристалл (6) использовалось сферическое зеркало (5) с радиусом кривизны поверхности примерно 1000 мм. Прошедшая часть накачки и ВКР-компоненты излучения попадали на сферическое зеркало (7), предназначенное для обратного преобразования расходящихся пучков в плоскопараллельные.

Для снижения порога ВКР-преобразования торцы кристалла нитрата бария устанавливались нормально к оси излучения. Кристаллографическая ось кристалла [001] ориентировалась под углом 0 или 90° к направлению вектора поляризации излучения лазера. Это обеспечивало минимальную деполяризацию излучения накачки и ВКР-компонент из-за термически наведенного двулучепреломления [3] и повышало эффективность ВКР-преобразования. Наведенная при этом генерационная связь между торцами нелинейного кристалла и зеркалом (2) резонатора лазера накачки практически не влияла на эффективность ВКР-преобразования, так как вследствие достаточно большого расстояния от глухого зеркала резонатора до кристалла (около 2,2 м) существенное увеличение расходимости излучения лазера наблюдалось лишь в самом конце импульса генерации, когда основная часть инверсии уже высветилась в пучок с малой расходимостью. Характерный для лазеров на парах меди временной сдвиг между зеленой и желтой компонентами импульсов генерации (в несколько наносекунд) приводил к ВКР желтой линии уже в процессе бигармонической накачки. В этом случае эффективность преобразования желтой компоненты излучения повышалась и становилась сравнимой с эффективностью преобразования зеленой линии, несмотря на меньший уровень мощности генерации. Максимальные эффективности преобразования в первые стоксовые компоненты составили примерно 30% для зеленой линии излучения накачки и примерно 20% — для желтой. При этом с использованием одного излучателя при средней суммарной мощности излучения около 4 Вт была

получена многоцветная генерация с соотношением мощностей по отдельным компонентам  $W_{\lambda 1}:W_{\lambda 2}:W_{\lambda 3}:W_{\lambda 4}=0,7:0,5:1,0:0,3$ .

Оптимальная частота следования импульсов (ЧСИ) возбуждения лазера выбиралась из условия получения максимальной средней мощности генерации при необходимом для эффективного ВКР-преобразования уровне пиковой мощности. При этом ЧСИ должна быть достаточной для воспроизведения псевдонепрерывного режима графического изображения, а приемлемый для пользователей уровень мощности потребления должен обеспечить стабильные генерационные характеристики в процессе длительной эксплуатации лазера.

В системах питания лазеров на парах металлов для коммутации с высокой ЧСИ обычно используют водородные тиатротроны. Большие потери в тиатронах, работающих в режиме коротких (наносекундной длительности) импульсов, ограничивают уровень средней мощности систем питания лазеров до 1,5–2 кВт и частоту возбуждения до 10 кГц [4]. При использовании так называемой «прямой» схемы импульсного питания, в которой накопительный конденсатор разряжается через тиатрон непосредственно на ГРТ лазера, не удалось достигнуть пиковой мощности генерации, достаточной для эффективного рассеяния излучения в нелинейном кристалле. В схеме Блюмляйна, с двумя накопительными конденсаторами  $C_1, C_2$  и нелинейной индуктивностью  $L_2$  (рис. 2) коммутирующий элемент не входит в разрядную цепь ГРТ, а служит для перезаряда накопительного конденсатора  $C_1$ . Это позволяет уменьшить индуктивность разрядного контура и повысить пиковую мощность импульса возбуждения.

Оптимальная частота накачки ГРТ зависит как

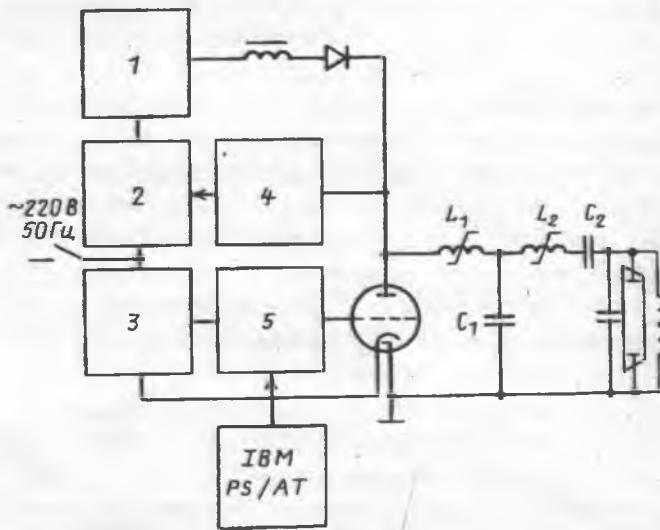


Рис. 2. Система питания лазера:  
1 — высоковольтный трансформатор и выпрямитель; 2 — тиристорный регулятор; 3 — блок стабилизации накалов; 4 — пиковый детектор; 5 — блок запуска тиристоров

от геометрии разрядной трубы и давления буферного газа, так и от режима питания лазера и может находиться в диапазоне, превышающем предельный частотный диапазон работы водородных тиратронов. Для снижения коммутационных (стартовых) потерь в тиратроне при высоких ЧСИ в схеме использовалась дополнительная нелинейная индуктивность  $L_1$ . Несмотря на некоторое (около 12%) повышение потребляемой мощности с данной схемой удалось примерно в 1,7 раза поднять среднюю мощность генерации и в 1,4 раза — пиковую мощность, реализовав при этом эффективный режим ВКР-преобразования при ЧСИ до 20 кГц.

Значительные флюктуации энергии стоковых компонент рассеяния из-за случайного характера распределения «затравочных» спонтанных тепловых шумов кристаллической решетки, особенно заметные при невысоких коэффициентах ВКР-преобразования [5], привели к необходимости жесткой стабилизации рабочего режима генерации лазера накачки. Для достижения стабильных генерационных характеристик излучения лазера в саморазогревном режиме работы ГРТ, когда энергия накачки используется как для разогрева ГРТ и получения рабочей плотности паров меди (при температуре стенки разрядного канала ГРТ примерно  $1500^{\circ}\text{C}$ ), так и для создания инверсии, требуется учет взаимосвязи многих параметров, влияющих на характеристики генерации. Введение стабилизации напряжения заряда накопительных конденсаторов и эффективного значения напряжения цепи накала и генератора водорода тиратрона (рис. 2) обеспечило стабильность импульсов возбуждения ГРТ лазера на уровне 2% при колебаниях напряжения сети  $\pm 15\%$ . Для поддержания теплового режима ГРТ использовалось принудительное воздушное охлаждение. При экспериментах со схемой Блюмляйна было замечено снижение мощности накачки ГРТ в процессе длительной эксплуатации лазера из-за нагрева накопительных конденсаторов и уменьшения их емкости. Введение дополнительного обдува конденсаторов стабилизировало режим накачки. При этом нестабильность мощности генерации лазера составила 5–10%, а флюктуации мощности стоковых компонент рассеяния не превышали 25% для линии 539,4 нм и 35% — для линии 615,4 нм при коэффициенте ВКР-преобразования 20–30%. Такие пульсации мощности практически не воспринимались глазом при демонстрации графических видеосюжетов на расстоянии до 50 м.

Для формирования лазерных рисунков в описываемой системе применен принцип двухкоординатного управления положением луча лазера в пространстве на основе магнитоэлектрических устройств — быстродействующих оптических гальванометров. Благодаря встроенному емкост-

ному датчику положения, который формирует паразитный токовый выходной сигнал, пропорциональный угловому положению ротора, гальванометр может быть охвачен отрицательной обратной связью с помощью относительно простых функциональных блоков. Это существенно улучшает характеристики сканирования. Резонансная частота гальванометра составляет 700–900 Гц. При размерах зеркала  $7 \times 7 \times 1$  мм максимальная частота сканирования составила примерно 500 Гц при угле сканирования  $\pm 10^{\circ}$  и разрешении 2000 положений.

Функциональная схема устройства сопряжения (для одного канала) лазерной системы с персональным компьютером типа IBM PC/AT представлена на рис. 3. Центральным элементом схе-

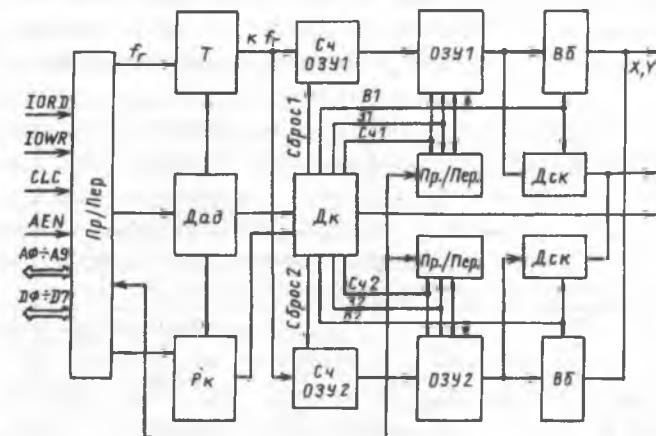


Рис. 3. Устройство сопряжения  
с персональным компьютером:

*T* — таймер; *Дад* — дешифратор адреса; *Рк* — регистратор команд; *СЧ ОЗУ 1*, *СЧ ОЗУ 2* — счетчики адресов *ОЗУ 1* и *ОЗУ 2*; *Дк* — дешифратор команд; *Пр/Пер* — приемопередатчики; *Дск* — дешифратор служебных команд; *ВБ* — выходной буфер; *В1*, *В2* — воспроизведение 1, 2; *31*, *32* — запись 1, 2; *СЧ 1*, *СЧ 2* — считывание 1, 2

мы являются два статических ОЗУ объемом 4 Кбайт каждое, служащие для временного хранения формируемых в компьютере картинок и попарно функционирующие. Когда в одном из ОЗУ происходит запись картинки из ЭВМ, второе работает в режиме воспроизведения и наоборот. Это позволяет создавать на экране динамические изображения. Скорость вывода картинки на экран задается программно-управляемым таймером. Изменение режимов работы устройства осуществляется по стандартному принципу программного управления через регистр и дешифратор команд.

Для осуществления режима гашения лазерного луча, что необходимо при создании прерывистых изображений, из массива данных, поступающих из ОЗУ в режиме воспроизведения, с помощью дешифратора служебных команд производится выделение импульсов начала и конца интервала

гашения. Данные из ОЗУ через выходные буферы передаются по оптоволоконной линии связи в блок управления оптическими гальванометрами.

Визуальное изображение возникает при быстром обегании лучом замкнутого контура на экране, и поэтому каждая фигура может быть представлена как последовательность точек в плоскости экрана, в которых должен побывать лазерный луч. Такое представление соответствует принципу построения изображения, при котором каждая последовательная пара точек задает направление движения луча в какой-либо момент времени.

Программное обеспечение системы ЛКГ, включающее графический редактор, программу управления выводом сюжетов и драйвер аппаратуры сопряжения (рис. 4), позволяет создавать изображения, содержащие от 1 до 1000 точек для каждого из используемых лазерных лучей.



Рис. 4. Структура программного обеспечения

Для создания иллюзии движения на экране используется быстрая смена изображений (кадров) подобно тому, как это происходит в обычной мультипликации. Такие последовательности кадров — фрагменты могут быть созданы художником при помощи входящего в состав программного обеспечения графического редактора. Управление сменой кадров осуществляется драйвером аппаратуры сопряжения.

Создаваемые фрагменты, состоящие из картинок, «рисуемых» одним лучом могут, в свою очередь, объединяться в сюжеты, для которых характерна синхронная работа нескольких лучей (каналов) системы ЛКГ, что позволяет создавать многоцветные динамические сюжеты. Синхронизация работы каналов производится на программном уровне путем привязки моментов смены кадров к прерываниям системных часов персонального компьютера.

Создание сюжетов лазерной графики сходно с аналогичными процедурами при работе с общезвестными анимационными пакетами. Отличия связаны с ограничениями, налагаемыми век-

торным способом задания изображений, при котором его элементами служат отрезки линий, а общий контур каждой одноцветной линии в изображении должен быть замкнут. Альтернативой является независимое использование каналов системы ЛКГ, при котором каждый луч «рисует» отдельный фрагмент, не связанный с фрагментами, выводимыми другими каналами.

Редактор позволяет использовать при создании изображений графические примитивы, строить проекции трехмерных каркасных объектов, производить геометрические преобразования изображений и их отдельных элементов. Кроме создания смысловых изображений программы позволяют быстро и легко создавать с немедленным выводом на экран абстрактные движущиеся картинки типа фильтров Лиссажу, а использование дополнительных оптических приставок типа зеркал, дифракционных решеток, призм и т. п. дают возможность формировать сложные пространственные конфигурации лучей, меняющиеся по заданной программе.

В зависимости от используемых лазерных средств многоцветная система может быть выполнена с 2, 3 и 4 независимыми лазерными



Рис. 5. Общий вид системы ЛКГ

каналами. На рис. 5 представлен в приборном исполнении трехканальный вариант системы. Габариты прибора 540 × 420 × 980 мм. Потребление от однофазной сети 220 В, 50 Гц не более 12 А.

#### Список литературы

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985.
2. Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Квантовая электроника / С.А. Вицинский, В.К. Исаков, С.Н. Карпухин и др. 1993. Т. 20.
4. Исаев А.А., Леммерман Г.Ю. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4.
5. Письма в ЖТФ / А.С. Грабчиков, С.Я. Килин, С.Я. Козич и др. 1986. Т. 43.

# Перспективы применения полимерных изоляторов в аппаратах высокого напряжения

В.В. АКИМОВ, В.В. ГОДУЛЯН, Е.И. ОСТАПЕНКО, В.З. ТРИФОНОВ

ВЭИ

Используемые в настоящее время в аппаратах высокого напряжения фарфоровые изоляторы обладают по сравнению с полимерными значительной материалоемкостью, большими габаритами, недостаточной механической прочностью и низкими влагоразрядными характеристиками.

Применение полимерных изоляторов позволяет уменьшить массу внешней изоляции аппаратов в 3—4 раза, а также высоту изоляции на 20—30% благодаря лучшим влагоразрядным характеристикам [1]. Немаловажное значение имеет повышенная сейсмостойкость полимерных изоляторов.

Положительный опыт эксплуатации полимерных стержневых изоляторов на линиях электропередачи расширяет область применения полимерных материалов в изоляционных конструкциях дорогостоящих аппаратов высокого напряжения. Наиболее полно преимущества полимерных изоляторов можно использовать в газонаполненных аппаратах, где элементы внешней изоляции подвергаются воздействию внутреннего давления газообразной среды внутренней изоляции.

Полимерный изолятор представляет собой стеклопластиковую трубу, защищенную от внешних атмосферных воздействий ребристой покрышкой из трекингостойкого полимерного материала. В качестве такого материала используется, как правило, силоксановая резина горячей вулканизации.

Длительная электрическая прочность комбинированного полимерного изолятора определяется надежностью границы раздела стеклопластикового сердечника и защитного покрытия. Для надежностистыка защитная покрышка насаживается на стеклопластиковую трубу, предварительно обработанную адгезионным составом, с небольшим зазором, а полость между трубой и защитной покрышкой заполнялась под давлением вакуумированным кремнийорганическим компаундом холодного отверждения.

В табл. 1 приведены основные данные испытанных изоляторов.

Для оценки работоспособности и надежности изоляторов проведен комплекс высоковольтных и климатических испытаний. В табл. 2 приведены разрядные характеристики изоляторов.

Таблица 1

Показатели	Условные обозначения изоляторов			
	ИП-35	ИП-110	ИП-220	ИП-500
Номинальное напряжение, кВ	35	125	220	500
Высота, мм: строительная изоляционная	340 275	1280 1070	2100 1890	4200 3940
Выдерживаемое внутреннее давление, МПа	—	2,0	2,0	2,0
Длина пути утечки, мм	790	2850	6800	12150
Внутренний диаметр, мм	175	270	270	416
Количество ребер	5	13	23	66
Диаметр ребер, мм	3290	470	470	620

Таблица 2

Вид воздействия	Разрядное напряжение			
	ИП-35	ИП-110	ИП-220	ИП-500
Грозовой импульс 1,2/50 мкс кВ (макс.) при полярности: положительной отрицательной	223	680 924	1050 1125	1620 1610
Промышленная частота, кВ (дейст.) в сухом состоянии под дождем в загрязненном состоянии при удельной поверхности проводимости, мкСм: 5—7 10—13	124 107	357 327	616 —	900 740

Изоляторы ИП-35 и ИП-110 были испытаны на теплоустойчивость при температуре 80°C в течение 16 ч, на холодаустойчивость при температуре -60°C в течение 16 ч, на смену температур от +80 до -55°C (четыре цикла по 8 ч). Контроль состояния изоляторов после климатических испытаний осуществлялся испытаниями импульсами с крутым фронтом нарастания напряжения.

На изолятор ИП-110 подавались по 25 стандартных импульсов положительной и отрицательной полярности с амплитудой 2300 кВ. Среднее разрядное напряжение среза при положительной

полярности составило 1950 кВ, при отрицательной полярности — 1790 кВ. Расчеты параметров импульсов по осцилограммам с учетом предразрядного времени показали, что скорость нарастания напряжения при положительной полярности составила 2150 кВ, и при отрицательной полярности — 2050 кВ.

Изолятор ИП-35 был разработан для создания вакуумных дугогасительных камер наружной установки и испытывался в комплексе с вакуумной дугогасительной камерой на 35 кВ. Опытный образец вакуумной дугогасительной камеры КДВ-35-20/1250 УХЛ1 в настоящее время проходит эксплуатационные испытания в составе главного выключателя, установленного на крыше электровоза.

Изолятор ИП-110 был разработан для применения в элегазовых выключателях ВЭК-110 и ВЭК-220 в качестве изоляционной дугогасительной камеры. Особенностью изолятора ИП-110 является то, что его внутренняя поверхность изготовлена из лавсаноэпоксидного материала, что обеспечивает защиту изолятора от воздействия продуктов разложения элегаза. Три элегазовых выключателя ВЭК-110 проходят эксплуатационные испытания в системе Ленэнерго.

На основе изоляторов ИП-220 был собран макет ограничителя перенапряжений ОПН-1150. Аппарат высотой 8,4 м состоит из четырех элементов, составленных на базе одиночного изолятора. Внутри каждого изолятора расположены пять блоков оксидноцинковых резисторов (ОЦР), каждый из которых включает 8 параллельных колонок ОЦР диаметром 60 мм, высота каждого блока 400 мм. Ниже приведены основные параметры аппарата.

#### Основные параметры ОПН-1150

Наибольшее рабочее напряжение, кВ .....	694
Защитный уровень при коммутационных перенапряжениях ( $I=2,8$ кА) .....	1,6
Защитный уровень при грозовых перенапряжениях ( $I=15$ кА) .....	1,8
Масса, кг .....	1700
Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, кВ в сухом состоянии .....	1100
в загрязненном состоянии при удельной поверхностной проводимости 7 мкСм .....	705
Выдерживаемое напряжение коммутационных импульсов 390/7500 мкСм положительной и отрицательной полярности в сухом состоянии и под дождем, кВ .....	1790

Таким образом, покрышка ОПН-1150 выдержала испытательные напряжения для электрообо-

рудования класса 1150 кВ.

После лабораторных испытаний ограничитель перенапряжений был установлен на испытательном стенде в г. Тольятти. К настоящему времени общая наработка аппарата под рабочим напряжением составляет около 300 ч.

На базе полимерной покрышки ИП-500 совместно с АО «Изолятор» был создан ввод 500 кВ.

Главный изоляционный промежуток ввода между токоведущей жилой и заземленным экраном установленного фланца был выполнен в виде коаксиальной системы со скруглением краев внешнего цилиндра внутрь промежутка, без промежуточных конденсаторных обкладок. Электрическая прочность внутренней изоляции обеспечивалась посредством элегаза, при давлении 0,4 МПа.

Характерная особенность таких вводов — неравномерное распределение электрического поля по внешней поверхности покрышки, причем максимальная напряженность в воздухе возникает на поверхности твердого диэлектрика вблизи края заземленного экрана [2]. При разработке изоляции ввода основной проблемой было выбрать такое соотношение радиальных и аксиальных размеров деталей ввода (токоведущей жилы, заземленного экрана и покрышки), которое позволило бы ограничить напряженность электрического поля в воздухе в указанной зоне, и тем самым свело к минимуму вероятность возникновения разрядов на поверхности покрышки.

В табл. 3 приведены результаты испытаний изоляции ввода в сухом состоянии и под дождем.

Таблица 3

Вид воздействия	Нормированное значение испытательного напряжения, кВ	Выдерживающее напряжение, кВ
Переменное напряжение 50 Гц	630	630
Коммутационный импульс положительной полярности в сухом состоянии	1175	1200
Коммутационный импульс отрицательной полярности в сухом состоянии	1175	1190
Коммутационный импульс положительной полярности под дождем	1175	1180
Грозовой импульс положительной и отрицательной полярностей	1425	1425

Следует отметить, что мокроразрядные напряжения ввода выше, чем у прототипа — серийно выпускаемых вводов с фарфоровой покрышкой.

В 1991 г. ввод установлен на испытательном стенде в г. Тольятти для опытно-промышленных испытаний. Общая наработка под рабочим напряжением более 200 ч.

## Вывод

Полимерные изоляторы вполне удовлетворяют требованиям, предъявляемым к внешней изоляции аппаратов высокого напряжения.

## Список литературы

1. I. Gutman et al. Tenu dielectrique de l'isolation EHT polluee.— CIGRE, 1988, R. 33—08.
2. Akdimov V., Panov A., Podgornov D. Electrodless flashover discharges in the insulation of high-voltage bushings // Sixth international symposium on high voltage engineering. New Orleans. Louisiana. USA. 1989.

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

### Многофункциональный сварочный источник питания (МИП) — новый этап в сварочном оборудовании

Многофункциональный источник питания на силовых гибридных интеллектуальных модулях на базе МОП-транзисторов предназначен для:

ручной дуговой сварки постоянным током покрытыми электродами от 1,0 до 4,0 мм;

argonодуговой сварки плавящимся и неплавящимся электродом, в углекислом газе и газовых смесях в производственных и бытовых условиях;

зарядки аккумуляторных батарей;

пуска автомобильных двигателей.

МИП позволяет сварщику работать быстро, эффективно и экономично.

Установка малогабаритная и легко перемещаемая, что позволяет ее использовать для сварки при монтаже, ремонте, строительстве и других работах.

Служит в качестве источника тока при холодном запуске автомобильных двигателей и зарядке аккумуляторных батарей, позволяя быстро делать разряженный аккумулятор работоспособным.

Возможна сварка цветных и черных металлов.

Использование интеллектуальных силовых гибридных модулей гарантирует лидерство МИП в своем классе. МИП дает больше, чем обычная сварочная установка.

Хорошо разработанная техника установки гарантирует отличное качество сварки, хорошие свойства возбуждения дуги, эффективное использование и различные дополнительные функции, облегчающие работу.

МИП отвечает требованиям не только домашних мастеров, но и высококвалифицированных профессиональных сварщиков, благодаря использованию современной силовой электроники.

#### Основные технические характеристики

##### Номинальное напряжение

50 Гц, В .....  $220^{+10\%}_{-15\%}$

Входной ток, не более, А ..... 25

##### Режим источника сварочного тока:

диапазон плавной регулировки выходного сварочного тока, А 5—140  
напряжение холостого хода, В 36

##### Режим источника сварочного

##### напряжения:

диапазон плавной регулировки выходного напряжения, В .... 15—30  
выходной ток, до, А ..... 140

##### Продолжительность включения (ПВ) в режиме сварки (стандартный цикл сварки 5 мин), %

при токе 140 А ..... 60  
при токе 100 А ..... 100

##### Режим пуска автомобильных двигателей:

выходное напряжение, В .... 13  
выходной ток, А ..... 140

##### Режим заряда аккумуляторных

##### батарей:

выходное напряжение, В .... 6—30  
выходной ток, до, А ..... 20

##### Охлаждение воздушное, принудительное Габаритные размеры,

не более, мм .....  $350 \times 220 \times 190$

Масса, не более, кг ..... 10

Обращаться в научно-промышленный  
консорциум «Интеллектуальная силовая  
электроника» НПП «ИНЭЛС»  
или в редакцию журнала.

# Компактная «интеллектуальная» система гарантированного электроснабжения СГЭ-0,6 (Off-line Smart-UPS)

Для надежной бесперебойной работы оборудования, предохранения от случайных сбоев вследствие перерывов или отклонения параметров питающей сети за допустимые пределы, Научно-промышленный консорциум «Интеллектуальная силовая электроника» предлагает компактную «интеллектуальную» систему гарантированного электроснабжения СГЭ-0,6 (Uninterruptible Power System-UPS) мощностью 600 В·А.

СГЭ-0,6 может использоваться для бесперебойного питания:

устройств вычислительной техники;

автоматики и систем безопасности на электростанциях, энергосистемах, авиационном, железнодорожном и водном транспорте;

систем управления непрерывными процессами, охранной и пожарной сигнализации;

медицинского оборудования;

военной техники.

СГЭ-0,6 обеспечивает:

полную защиту от потери электропитания и пониженного напряжения в сети;

постоянную защиту от скачков напряжения и КЗ в сети, предотвращающую повреждение питаемого оборудования и удлиняющую срок его службы;

нормальное питание нагрузки без использования аккумуляторов при «хронически» пониженном (до 170 В) сетевом напряжении;

контроль и протоколирование состояния электросети (с помощью программ, совместимых с Power Shute, Power Doctor);

измерение мощности нагрузки и напряжения сети;

индикацию необходимости замены аккумуляторов;

интерфейс к локальным сетям по UPS-Link, обеспечивающий автоматическое сохранение информации и отключение файлового сервера при работе с сетевыми программными продуктами Novell, Net-Ware, Lan и т. п.

## Технические характеристики

Напряжение питающей сети

50/60 Гц, В .....  $220^{+10\%}_{-22\%}$

Номинальная выходная

мощность, В·А/Вт ..... 600/400

Перерыв в питании нагрузки при переходе на батарею, не более, мс 4

При работе от встроенных герметичных необслуживаемых

свинцовых аккумуляторных батарей:

Номинальное выходное напряжение, В .....	$225 \pm 2\%$
Номинальная выходная частота, Гц .....	$50/60 \pm 0,1\%$
Коэффициент гармоник выходного напряжения, % .....	< 5
Коэффициент амплитуды тока нагрузки (крест-фактор) .....	< 3
Коэффициент мощности нагрузки .....	0,5—1,0
Время работы на 100%-ю нагрузку, мин .....	10
Время заряда батареи до 90% емкости и после разряда, ч .....	10
Уровень шума, не более, дБ·А .....	40
Интерфейс, программное обеспечение	
дистанционное управление .....	RS-232,
	язык управления
	UPS-Link

Режим «Smart-Boost» .....

Повышение
$U_{\text{вых}}$ на
12% при
$U_{\text{вх}} = (0,77 - 0,82) U_{\text{ном}}$

Светодиодная индикация:

- «Сеть»
- «Неисправность батареи»
- «Разряд батареи»
- «Перегрузка»
- «Работа от батареи»
- «Работа от сети»

Звуковая сигнализация режимов работы  
Измерение уровня выходной мощности и напряжения сети

Самотестирование

Степень защиты .....

IP20
------

Условия эксплуатации

температура, °C .....

1—40
------

относительная влажность, % .....

98
----

Размеры (длина—высота—ширина), мм .....

$450 \times 190 \times 220$
-----------------------------

Масса, кг .....

15
----

Гарантия .....

2,5 года
----------

Выпускается на предприятиях оборонного комплекса, обеспечивающих высокое качество и надежность, гарантийное и послегарантийное обслуживание и ремонт.

Обращаться в научно-промышленный консорциум «Интеллектуальная электроника» НПП «ИНЭЛС» или в редакцию журнала.

### Ассоциация инженеров силовой электроники

Ассоциация инженеров силовой электроники (АСЭ) — общественное объединение специалистов в области силовой электроники существует почти три года (с 12 марта 1992 г.).

Начиная с небольшой группы специалистов, инициаторов ее создания, АСЭ выросла до солидной общественной организации и объединяет в своих рядах 89 индивидуальных и 3 коллективных члена. Членами АСЭ являются крупнейшие организаторы науки и производства, ученые и инженерно-технические работники, среди которых 12 академиков, 29 докторов и 38 кандидатов наук, 22 руководителя предприятий.

Ассоциация инженеров силовой электроники фактически превратилась в международную. В ее составе специалисты из Армении, Молдавии, США, Украины, Чехии, Эстонии и многих регионов Российской Федерации.

Регулярно выпускается Бюллетень АСЭ. Членами АСЭ подготовлены аналитические обзоры по проблемам и перспективам развития силовой электроники, вопросам ее применения в различных отраслях народного хозяйства. Экспертными советами АСЭ выполнена научно-техническая экспертиза программ, проектных решений в области развития и применения силовой электроники по заказам министерств и ряда промышленных предприятий. Способствуя организации информационной и научно-технической помощи специалистам в области силовой электроники, Ассоциация образовала постоянно действующий научно-технический семинар по актуальным вопросам силовой электроники. Заботясь о сохранении информационного пространства, обеспечении и развитии связей между специалистами, Ассоциация инженеров силовой электроники выступила одним из соучредителей журнала «Электротехника».

Деятельность Ассоциации организовывает и осуществляет Правление: Ковалев Ф.И. — президент, Андриенко П.Д. — вице-президент, Дац-

ковский Л.Х., Иванов Г.М., Иньков Ю.М., Лабунцов В.А., Литовченко В.В., Подаруев А.И., Раскин Л.Я., Розанов Ю.К., Хрисанов В.И., Шаров В.А.

Производственная и хозяйственная деятельность осуществляется дирекцией: Литовченко В.В. — исполнительный директор, Домрачева М.А. — главный бухгалтер, Шаров В.А. — ответственный секретарь, Штепа Л.Г. — технический секретарь.

Ревизионная комиссия АСЭ: Кузькин В.И. — председатель, Озеров М.И., Розенберг Б.М.

Руководителями научно-технического семинара по актуальным вопросам силовой электроники являются: Лабунцов В.А. и Розанов Ю.К.

Экспертные советы АСЭ по направлениям возглавляют:

Дацковский Л.Х. — силовая электроника в общепромышленном электроприводе;

Иньков Ю.М. — силовая электроника на электрическом транспорте;

Кузькин В.И. — силовая электроника в источниках питания и преобразователях для электротехнологий;

Флоренцев С.Н. — силовые полупроводниковые приборы, полупроводниковые модули.

Готовится специальный выпуск Бюллетеня со списком всех членов Ассоциации инженеров силовой электроники по состоянию на 1 января 1995 г.

В рамках постоянно действующего научно-технического семинара АСЭ планируется заслушать сообщения фирм «Siemens» (ФРГ), «SGS Thomson» (Италия—Франция), «International Rectifier» (США) ориентировочно в конце марта 1995 г.

Тематика семинаров: характеристики и применение МОП-транзисторов, IGBT-транзисторов, интегральных схем драйверов и т. д.

**Телефон для справок: (095) 284-24-57  
Литовченко Виктор Васильевич,  
Шаров Вячеслав Анатольевич.**

## Семинар ассоциации инженеров силовой электроники

28 октября 1994 г. состоялся очередной семинар Ассоциации инженеров силовой электроники на тему: «Особенности применения полевых транзисторов». В докладе Изварина Ю.В. (НПП «ЭМИКС», г. Запорожье) рассмотрено состояние разработок и проанализированы особенности применения силовых полевых транзисторов с изолированным затвором, которые впервые появились за рубежом в начале 80-х годов, а в странах СНГ — около 5 лет назад. Эти приборы находят применение в силовых ключах, интенсивно вытесняя во многих областях биполярные транзисторы. Достоинствами полевых транзисторов являются высокая частота их переключения (от нескольких единиц до десятков мегагерц), возможность перегрузки по току, малая мощность управления, незначительные потери при переключениях, наличие в структуре транзистора встроенного диода и возможность несложного включения транзисторов на параллельную работу. Характерная особенность полевых транзисторов — существенное увеличение потерь в статическом режиме роста напряжения и зависимость потерь от температуры.

На основе рассмотрения физических процессов в транзисторе представлена схемная модель при работе в ключевой зоне. Схемная модель содержит паразитные емкости, часть из которых изменяет свое значение на порядок при изменении напряжения. Описана модель проведения качественного анализа в омической области, однако точный анализ процессов рекомендовано производить с помощью ЭВМ, используя программу Pspice.

Динамика процессов включения полевым ключем индуктивной нагрузки проиллюстрирована на примере фазы инвертора напряжения. На основании анализа процессов в транзисторе сделан вывод о несложном управлении транзистором, возможности расчета потерь и определении динамических свойств прибора значением емкости обратной связи «сток-затвор». При коммутации активной нагрузки протекают аналогичные процессы. Отмечено, что паразитный транзистор в структуре является источником потенциальной опасности. Так, в статическом режиме паразитный транзистор вырождается в диод. Однако при скорости изменения приложенного напряжения более 1000 В/мкс возможно самопроизвольное открытие паразитного (биполярного) транзистора и выход его из строя (вторичный пробой). С совершенствованием технологий изготовления по-

левых транзисторов (улучшение металлизации) паразитный транзистор стал более «медленным» для резких изменений приложенного напряжения.

В случае превышения в схеме допустимой скорости изменения напряжения предложено шунтировать транзистор высоковольтным быстроросстановляющимся диодом с последовательным включением в цепь стока (истока) диода Шоттки.

Особенностью полевого транзистора является жесткое ограничение напряжения между затвором и истоком (менее 20 В), что может быть гарантировано при подключении быстродействующего стабилитрона. Отмечено также, что нет необходимости формировать траекторию включения полевых транзисторов. Рекомендовано параллельно стоку-истоку транзистора подключать небольшие RC-цепи. В снабберах нет необходимости.

Сделан вывод о близости свойств полевого транзистора к характеристикам идеального ключа (при учете особенностей транзистора). Внутренний инверсный диод транзистора имеет худшие динамические свойства, чем полевой транзистор, что необходимо учитывать в схемах коммутации индуктивных нагрузок. Однако дальнейшее совершенствование технологии изготовления привело к созданию МОП-транзисторов с быстроросстановляющимся внутренним диодом (так называемая серия FPEDFET фирмы «Siemens»).

Полевые транзисторы допускают параллельное соединение, при этом происходит автоматическое выравнивание их токов из-за положительного температурного коэффициента зависимости  $R_{ds(on)}$ .

При конструировании схем на полевых транзисторах следует учитывать паразитные индуктивности соединительных проводов. Рекомендованы печатный монтаж с короткими и широкими проводниками, а также включение блокирующих конденсаторов. Желательно изолировать транзисторы, а их радиаторы заземлить.

В настоящее время производятся преобразователи на полевых транзисторах мощностью от 10 Вт до 9 кВт. Одиночные полевые транзисторы выпускаются на токи порядка 50 А и напряжения до 500 В, а модули на их основе, соответственно, на токи 200 А и напряжения 500 В. Прямое сопротивление модуля на ток 200 А (BSM 111, «Siemens») составляет 0,01 Ом.

В ближайших номерах журнала будут опубликованы статьи по данной тематике.

С.Н. Флоренцев, В.А. Шаров

### Кочетков Виктор Дмитриевич

(к 60-летию со дня рождения)

14 апреля 1995 г. исполняется 60 лет Виктору Дмитриевичу Кочеткову — генеральному директору АО «Электропривод», НПО «Электропривод», главному редактору журнала «Электротехника».

Вся производственная деятельность Виктора Дмитриевича связана с ВНИИэлектроприводом. Он поступил в ВНИИэлектропривод в 1959 г. после окончания Московского энергетического института и прошел путь от старшего техника до директора института. Здесь же, выполняя ряд важнейших исследований и проектных работ, он завоевал признание научной общественности и стал одним из ведущих специалистов в стране в области промышленного электропривода.

Работы В.Д. Кочеткова нашли широкое использование при проектировании



и производстве тиристорных электроприводов на многих предприятиях электротехнической промышленности, а также при разработке электроприводов экскаваторов, прокатных станов и других ответственных отечественных и зарубежных агрегатов.

Многие годы Виктор Дмитриевич сотрудничает с рядом зарубежных фирм, а с АО «ЧКД Электротехника» (Чехия) разрабатывает

комплектное электрооборудование для совместной кооперированной поставки в Россию.

Результаты научных исследований отражены более чем в 40 публикациях и авторских свидетельствах. Виктор Дмитриевич принимает участие во многих научных конференциях как организатор и автор ряда докладов.

Деятельность В.Д. Кочеткова получила высокую оценку. Он избран академиком Академии электротехники, награжден рядом отечественных и зарубежных орденов.

С 1990 г. Виктор Дмитриевич возглавляет журнал «Электротехника», отдавая этому делу много сил и энергии.

Желаем юбиляру крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов.

Группа товарищей  
Редакция журнала «Электротехника»

## Владимир Максимович Тучкевич

(90 лет со дня рождения)

Владимир Максимович Тучкевич является одним из основоположников отечественного силового полупроводникового приборостроения. С его именем связаны основные вехи в создании силовых полупроводниковых приборов. Только в годы Великой Отечественной войны (тогда участвовал в работе по защите кораблей от магнитных мин) и в первые послевоенные годы (он руководил лабораторией, где проводились исследования, связанные с разделением изотопов тяжелых элементов) В.М. Тучкевич «отходил» от этой тематики.

В начале 50-х годов в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе в лаборатории, руководимой В.М. Тучкевичем, были впервые в стране разработаны плоскостные диоды и транзисторы. В начале 60-х годов на саранском заводе



«Электровыпрямитель» также впервые в стране был освоен серийный выпуск тиристоров, за что В.М. Тучкевичу во главе группы специалистов ФТИ и завода была присуждена Ленинская премия.

В течение двадцати лет (1967—1987 гг.) Владимир Максимович возглавлял ФТИ им. Ф.И. Иоффе. За это время институт продолжал интенсивно развиваться, являясь одним из ве-

дущих академических центров, крупным мировым центром физических исследований. Большое внимание В.М. Тучкевич уделял развитию специального конструкторского бюро ФТИ.

Велика роль В.М. Тучкевича в подготовке научных кадров. По его инициативе были созданы физико-техническая школа, физико-технический факультет в Политехническом институте (теперь Техническом университете) и базовые кафедры. Он придает большое значение использованию научного потенциала вузов для решения проблем, стоящих перед нашей наукой и промышленностью.

Редакция журнала «Электротехника» поздравляет Владимира Максимовича с 90-летием и желает крепкого здоровья и творческих успехов.

# **АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «Электропривод»**

Акционерное общество открытого типа «Электропривод» (АО «Электропривод») создано на базе бывшего Всесоюзного научного центра по автоматизированному электроприводу — ВНИИЭлектропривод и в настоящее время представляет собой комплексную многофункциональную научно-техническую и производственную фирму, которая может разработать и поставить Вам широкую номенклатуру комплектного электротехнического оборудования для различных технологических процессов машиностроения, металлургии, транспорта, нефтехимических и химических производств, связи, строительства, городского и коммунального хозяйства, сельскохозяйственного и агропромышленного производства.

АО «Электропривод» готов:

- принять заказ на разработку, изготовление и поставку нового электрооборудования;
  - снабдить Вас необходимой технической документацией, оказать консультации по любым вопросам, связанным с надежной работой электрооборудования;
  - разработать требуемую проектную документацию;
  - сертифицировать электрооборудование с выдачей сертификата в системе ГОСТ Р;
  - выполнить таможенную очистку грузов с оформлением декларации и расчетом таможенных платежей;
  - осуществить консалтинг, информационные услуги и подбор партнеров в области электротехнической промышленности;
  - провести комплексное обследование энергохозяйств Ваших предприятий, разработать рекомендации и реализовать мероприятия, направленные на сбережение и экономию электроэнергии;
  - осуществить компьютерный набор и подготовку оригинал-макетов печатной продукции;
  - выполнять любые механические работы, сварку и резку металла, столярные работы;
  - поставить Вам комплекты или отдельные виды электрооборудования согласно Вашей заявке.

К Вашим услугам следующая продукция:

- преобразователи энергии постоянного и переменного тока;
  - автоматизированные электроприводы постоянного и переменного тока различных назначений;
  - низковольтные комплектные устройства управления и электроустановочные изделия;
  - лифтовое и крановое электрооборудование;
  - силовые полупроводниковые приборы на токи 10—1000 А (диоды, тиристоры, симисторы, транзисторы и модули на их основе, интегральные микросхемы);
  - низковольтная аппаратура (автоматические выключатели с током расцепления до 1000 А, пускатели, рубильники, переключатели, реле защиты и управления, предохранители обычные, инерционные и быстродействующие);

- электрические машины постоянного и переменного тока на различные мощности;
- трансформаторы, дроссели, реакторы и высоковольтное электрооборудование;
- различные лампы и светильники для жилых и производственных помещений;
- гальванические элементы и аккумуляторы;
- электрооборудование во взрывозащищенном исполнении;
- кабели и провода;
- однофазные и трехфазные счетчики электроэнергии.

**АО «Электропривод» может также предложить Вам**

товары народного потребления, одежду, обувь, продукты питания, промышленные изделия, черный и цветной металл, нефть и нефтепродукты со склада в Москве или со склада завода-изготовителя на условиях взаиморасчетов с нашей организацией за разработанную, изготовленную и поставленную электротехническую продукцию.

**АО «Электропривод» приглашает Вас**

к деловому сотрудничеству и готово совместно рассмотреть, обсудить взаимовыгодные его формы. АО «Электропривод» имеет более полувековой опыт и хорошие традиции в разработке, поставке и вводе в промышленную эксплуатацию автоматизированных электротехнических комплексов и систем, которые известны не только в России, но и в других странах мира.

#### **Контактные телефоны:**

Коммерческий директор	
Козлов Валерий Степанович	208-23-85
Заместитель Генерального директора по науке	
Иванов Гелий Михайлович	208-28-25
Факс:	208-26-23

## **Ассоциация инженеров силовой электроники**

подготовила руководство по применению силовых полевых и биполярных транзисторов с изолированным затвором (MOSFET и IGBT).

Силовые полевые и биполярные транзисторы с изолированным затвором — это полностью управляемые полупроводниковые приборы, имеющие уникальные характеристики по малой мощности управления, высоким скоростям коммутации, устойчивости к перегрузкам по току и напряжению.

В руководстве рассматриваются структуры приборов, основные характеристики, коммутационные процессы в схемах с этими транзисторами, схемы защиты и управления. Описаны также три схемы практического применения MOSFET и IGBT. Приведены характеристики импортных и отечественных МОП-транзисторов и модулей на их основе.

**Обращаться по телефону 208-28-36**

## В Академии электротехнических наук

В г. Пермь состоялось выездное расширенное заседание Бюро отделения «Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности» Академии электротехнических наук Российской Федерации. В работе отделения приняли участие руководители пермского фонда конверсии и крупных Пермских предприятий, производящих электротехническую продукцию (АО «Инкар», АО «Пермская приборостроительная компания», АО «Эвестур», АО «Камкабель»), председатели Екатеринбургского, Челябинского, Томского отделений АЭН, академики и члены-корреспонденты АЭН — профессора и преподаватели Пермского Государственного технического университета, представители областной и городской администраций. Столь представительный состав совещания свидетельствует об актуальности и важности обсуждавшихся проблем.

Значительное внимание было уделено роли АЭН в решении задач, связанных с необходимостью защиты отечественной электротехнической промышленности, конверсией предприятий ВПК региона, созданием специализированного исследовательского центра в рамках программы «Пермский электроинструмент». Все вы-

ступавшие отметили важность обсуждавшихся вопросов и высказали уверенность, что одним из основных направлений деятельности Академии должна быть организация законодательной поддержки предприятий, создающих и осваивающих наукоемкую и высокотехнологичную продукцию, конкурентоспособную на внутреннем и внешнем рынке. Большой интерес вызвала идея разработки мероприятий для поддержки талантливых молодых ученых и инженеров-электротехников путем выделения стипендий, организации конкурсов, стажировок и т. п.

Значительная дискуссия разгорелась по вопросу статуса региональных отделений и их взаимодействия с функциональными структурами АЭН.

В заключение первый вице-президент АЭН академик Б.И. Петленко вручил дипломы коллективных членов АЭН ряду предприятий: АО «Пермская приборостроительная компания», АО «Инкар», АО «Эвестур» и электротехническому факультету ПГТУ. Работа заседаний была дополнена посещением ПГТУ, производств АО ППК и знакомством с историческими памятниками и природными достопримечательностями Пермской области.

Редактор отдела О.В. Кунавина  
Научный редактор Н.С. Разумовская  
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 19.01.95. Подписано в печать 20.02.95. Формат 60×88<sup>1</sup>/8  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 8.  
Тираж 1010 экз. Заказ 441

# От Академии электротехнических наук РФ

Академия электротехнических наук (АЭН) в соответствии с Уставом и решением общего собрания АЭН, состоявшегося 14 декабря 1994 г. извещает об открывающихся вакансиях действительных членов и членов-корреспондентов Академии по следующим научно-отраслевым отделениям.

Научно-отраслевые отделения	Число вакансий	
	Действительных членов	Членов-корреспондентов
Теоретическая электротехника	2	2
Электроэнергетика	4	4
Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности	3	5
Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения (в строительстве, горном деле, сельском хозяйстве, медицине и социальной сфере)	2	3
Электротехнические системы транспорта и космической техники	4	5
Электротехнология	2	2
Средства и системы контроля, управления и автоматизации	4	5
Электротехнические материалы и изделия	2	3
Электрофизические и сверхпроводящие устройства	2	3
Высоковольтная электротехническая и электронная аппаратура. Электромагнитные излучения, совместимость и экология	2	3
Электронная и вычислительная техника	5	8
Телекоммуникационные и информационные сети и системы	5	7
Стандартизация и сертификация в электротехнике	4	5

Действительными членами Академии электротехнических наук РФ, согласно Уставу академии, избираются ученые, обогатившие науку выдающимися достижениями и открытиями, широко признанными и используемыми в научно-практической деятельности.

Членами-корреспондентами АЭН РФ, согласно Уставу академии, избираются ученые и специалисты, внесшие признанный вклад в развитие электротехнической науки.

Действительные члены и члены-корреспонденты избираются, как правило, из числа докторов наук и профессоров.

Выдвигать кандидатов в действительные члены и члены-корреспонденты могут научные учреждения и высшие учебные заведения, государственные и общественные организации, действительные члены и члены-корреспонденты Академии электротехнических наук по указанным в данной публикации научно-отраслевым отделениям.

В случае представления кандидатов научными учреждениями, высшими учебными заведениями, государственными и общественными организациями выдвижение производится на заседаниях ученых и научно-технических советов, коллегий или президиумов путем тайного голосования простым большинством голосов.

Представление на кандидатов в действительные члены и члены-корреспонденты академии с соответствующей мотивировкой и с приложением необходимых документов направляется в адрес Президиума академии в течение одного месяца со дня настоящей публикации.

Необходимо направить (в двух экземплярах): 1) заявление об участии в конкурсе; 2) представление совета общественных или государственных организаций с результатами тайного голосования или письмо с соответствующей мотивировкой в случае выдвижения кандидата действительным членом или членом-корреспондентом Академии электротехнических наук РФ; 3) автобиографию; 4) личный листок по учету кадров; 5) список научных трудов; 6) копии дипломов об окончании вуза и доктора наук, аттестата профессора; 7) отзыв о научно-общественной деятельности кандидата с основного места работы; 8) личную научную программу (объемом не более двух страниц); 9) 2 фотографии размером 4×6 см.

УКАЗАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НАПРАВЛЯТЬ ПО АДРЕСУ: 105835, ГСП,  
г. Москва, Красноказарменная ул., 14, ПРЕЗИДИУМ АКАДЕМИИ ЭЛЕК-  
ТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ

Президент Академии  
электротехнических наук РФ  
**В. Герасимов,**  
Главный Ученый секретарь  
Академии электротехнических наук РФ  
**Г. Иванченко**