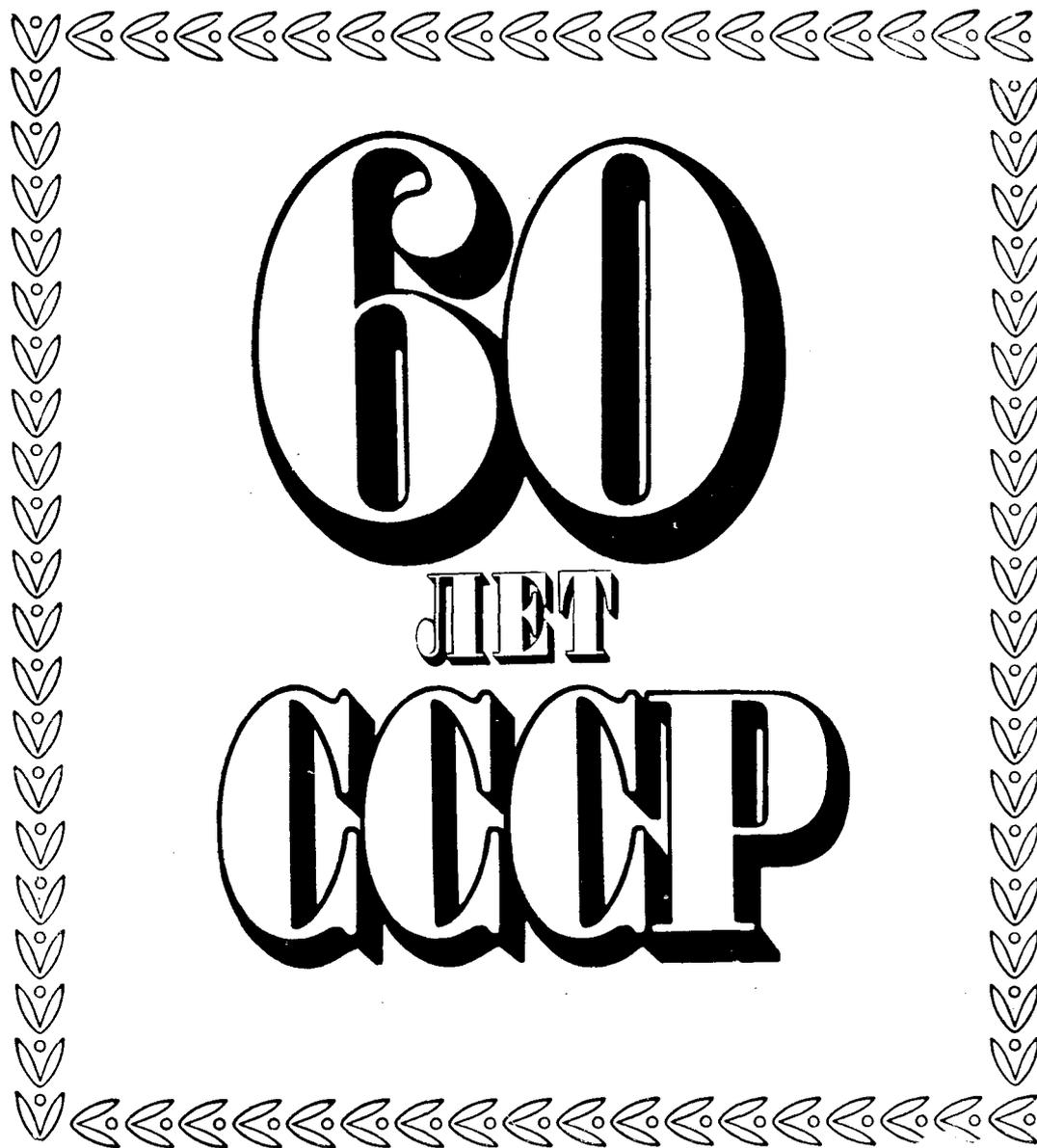




# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



# 60

ЛЕТ

# СССР

# 1982

ЭНЕРГОИЗДАТ

# 12

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СССР  
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МОСКВА

ЭНЕРГОИЗДАТ

*60-летие Союза Советских Социалистических Республик — замечательное событие в жизни советского народа. Славный союз братских республик — подтверждение правоты учения В. И. Ленина о многонациональном социалистическом государстве, его национальной политике. Развитие народного хозяйства, расцвет науки, культуры и образования всех народов в первой стране рабочих и крестьян оказывали и оказывают революционизирующее влияние на другие народы планеты, борющиеся против ига капитала и национального угнетения.*

*В публикуемой ниже статье затрагиваются некоторые вопросы становления, развития и достижений электротехнической науки, энергетики и электропромышленности в советских союзных республиках<sup>1</sup>. Авторами статьи являются: доктор техн. наук Меерович Э. А., доктор техн. наук Толстов Ю. Г.; члены-корреспонденты АН УССР Милых А. Н., Чиженко И. М., Шидловский А. К.; доктор техн. наук Ермаков В. С., акад. АН УзССР Фазылов Х. Ф., канд. техн. наук Котля А. К.; акад. АН АзССР Эфендизаде А. А.; Аугустайтис А. П.; чл.-корр. АН МССР Чалый Г. В.; доктор техн. наук Табакс К. К.; канд. техн. наук Рахимов К. Р.; акад. АН АрмССР Адонц Г. Т.; канд. техн. наук Тийсмус Х. А.*

## Развитие электротехники и энергетики в советских социалистических республиках

### РСФСР

Воссоздавая историю развития электротехники в Советской России, мы неминуемо должны обратиться к плану ГОЭЛРО, имевшему решающее значение для восстановления и развития народного хозяйства на базе электрификации.

В плане ГОЭЛРО впервые был поставлен вопрос о строительстве крупных районных электрических станций на основе использования местных топливных ресурсов и энергии водных источников. Он повлек за собой сооружение крупных электротехнических предприятий — Московского электротехнического завода, ленинградско-

го завода «Электросила», Харьковского электромеханического завода (ХЭМЗ) и др. Для создания электротехнического оборудования на этих заводах понадобилось наладить производство специальной электротехнической стали, которое было организовано, в частности, на Верх-Исетском металлургическом заводе. Было создано производство высоковольтных изоляторов (завод «Изолятор» в Москве), кабелей (завод «Электрокабель» в Москве) и других электротехнических изделий. Небольшие заводы электроламповой промышленности были объединены в крупный Электроламповый завод в Москве и завод «Светлана» в Ленинграде.

Стране потребовались электротехнические кадры. Расширились приемы на электротехнические факульт-

<sup>1</sup> Статьи, посвященные Казахской, Таджикской и Туркменской ССР, будут опубликованы в следующем номере.

теты существовавших вузов. В лабораториях этих институтов началась интенсивная научно-исследовательская работа.

На крупных заводах были организованы конструкторские и технические бюро по соответствующим специальностям, из которых многие получили в дальнейшем широкую известность в нашей стране и за рубежом, созданы крупные научно-исследовательские лаборатории. Существенное значение имела организация по инициативе К. А. Круга Государственного научно-исследовательского электротехнического института (впоследствии ВЭИ им. В. И. Ленина). Молодое Советское государство не жалело средств для развития электротехники. В этот период (в начале 30-х годов) совместно с нашими специалистами эффективно работали представители зарубежных фирм. В дальнейшем широко развернулась совместная работа российских электротехнических учреждений с республиканскими, которым оказывалась большая помощь.

Серьезное значение имела организация технического отделения в Академии наук СССР.

К работе в Академии были привлечены многие ученые, работающие непосредственно в промышленности и вузах.

В 1934 г. Г. М. Кржижановским был организован Энергетический институт с широкими планами работ в области различных технических дисциплин, относящихся к энергетике. Можно удивляться предвидению основателя института, позволившему ему объединить для совместной работы специалистов различного профиля.

Центральное место в работе института должен был занимать технико-экономический отдел, который по идее Г. М. Кржижановского был призван эффективно направлять работу отдельных лабораторий. Наибольшее значение Глеб Максимилианович придавал электротехническому направлению работ института. Было предусмотрено, что в институте будет развито теоретическое направление, работы в области создания крупномасштабных электрических систем: лаборатория высоковольтной электротехники, высоковольтного газового разряда, электромеханики, электрометрии.

К работе в ЭНИН были привлечены В. П. Володин, В. Ф. Миткевич, А. А. Чернышев, Н. Д. Папалекси и др. Институт издавал труды, в которых печатались работы сотрудников. В дальнейшем аналогичные институты были созданы в союзных республиках, ЭНИН координировал их работу.

Для энерготехнической области характерны три периода — довоенный, военный и послевоенный.

Довоенный отличается главным образом развитием теоретических исследований в различных областях. Он дал возможность выделиться целой плеяде талантливых ученых и являлся подготовительным для создания генераторостроения, трансформаторостроения, сооружения высоковольтных линий передачи энергии, крупных электросистем.

В военное время деятельность науки и промышленности была устремлена на оборону страны. В конце войны, еще до ее завершения, она была переориентирована и направлена не только на восстановление народного хозяйства, но и на дальнейшее перспективное его развитие. Так, в этот период было запроектировано строительство новых линий переда-

чи 400 кВ Куйбышев — Москва, Сталинград — Москва. В восстанавливаемом после блокады Ленинграда было начато сооружение крупных генераторов. На Московском трансформаторном заводе создавались трансформаторы для линий 400 кВ.

После окончания Великой Отечественной войны электротехника в Российской Федерации стала развиваться очень быстрыми темпами. По установленной мощности электростанций довоенный уровень был достигнут уже к концу 1945 г., по выработке электроэнергии — в 1946 г. В 1947 г. Советский Союз по выработке электрической энергии вышел на второе место в мире, при этом основные наиболее мощные электростанции были восстановлены и построены на территории РСФСР.

Быстрое развитие промышленности, потребность в резком повышении производительности промышленных предприятий могли быть обеспечены только на основе самой широкой электрификации и автоматизации производственных процессов, поэтому в послевоенные годы электротехника как наука и отрасль приобрела первостепенное значение.

Возник целый ряд совершенно новых научно-технических задач: увеличение мощностей и дальности электропередач, повышение единичных мощностей электрических генераторов, объединения электростанций в энергетические системы и слияния их в единую энергетическую систему Советского Союза, резкое повышение мощности и уровня автоматизации электроприводов, повсеместный переход на электрифицированный транспорт, электрификация сельского хозяйства и быта.

Для решения этих задач прежде всего требовались высококвалифицированные кадры ученых, инженеров, техников. Необходимо развивать существующие и создавать новые научно-исследовательские институты, укреплять их экспериментальную базу, расширять существующие и строить новые заводы электротехнического профиля.

Партия и правительство уделяли этим вопросам огромное внимание.

*Подготовка кадров.* В послевоенные годы в РСФСР значительно расширились факультеты электротехнического профиля в таких известных вузах, как Московский энергетический, Ленинградский, Новочеркасский, Уральский, Томский, Куйбышевский политехнические, Ленинградский электротехнический, Ивановский энергетический, а также в институтах железнодорожного транспорта. Открылись факультеты электротехнического профиля в ряде специализированных вузов газовой, нефтяной, угольной, судостроительной, авиационной, металлургической и других отраслей промышленности.

Высшая школа готовила высококвалифицированных специалистов для промышленности и научных работников для научно-исследовательских учреждений. Молодые специалисты принимали эстафету старшего поколения ученых.

В этой связи нельзя не назвать имен ученых высшей школы, отдававших все свои силы, знания и опыт молодому поколению.

В области теоретических основ электротехники в послевоенные годы много и плодотворно работали в высшей школе Л. Р. Нейман, К. А. Круг, К. М. Поливанов, Г. И. Атабеков, П. А. Ионкин, С. В. Страхов, Э. А. Меерович, А. В. Нетушил, Л. А. Бессонов,

Ю. Г. Толстов, А. А. Янко-Триницкий, К. С. Демирчян и др.; в области подготовки специалистов по электромашиностроению — М. П. Костенко, А. Е. Алексеев, Г. Н. Петров, И. А. Глебов, А. И. Вольдек, И. П. Копылов, В. А. Трапезников; в области электроаппаратуры — Г. Т. Третьяк, О. Б. Брон, А. М. Залесский, Ю. В. Буткевич, А. Я. Буйлов и др. В области техники высоких напряжений — Л. И. Сиротинский, М. В. Костенко, Н. Н. Тиходеев, Д. В. Разевиг, В. П. Ларионов, И. П. Верещагин, В. И. Левитов, М. М. Акодис и др.; в области электрической тяги — Д. К. Минов, В. Е. Розенфельд, К. Г. Марквардт, И. С. Ефремов, Б. Н. Техменев; в области электрических систем — С. А. Лебедев, П. С. Жданов, Н. Н. Щедрин, В. А. Венников, И. М. Маркович, С. М. Усов, И. В. Щербаков, А. В. Иванов-Смоленский и др.; в области электропривода — М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер, Ю. А. Сабинин, О. В. Слежановский, А. Д. Поздеев, А. А. Булгаков и др.; в области электростанций — А. А. Глазунов, А. М. Федосеев, А. Д. Дроздов, И. И. Иванов и др.

В послевоенное время в связи с большими успехами в области физики твердого тела очень быстрыми темпами начала развиваться промышленная электроника и преобразовательная техника. Подготовка специалистов в этих областях в вузах Российской Федерации много внимания и сил отдавали И. Л. Каганов, В. А. Лабунцов, А. В. Поссе, Т. А. Глазенко, И. П. Исаев, Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов и др.

В вузах Москвы, Ленинграда, Новосибирска и других городов РСФСР были открыты новые факультеты электроавтоматики и кибернетики. Значительный вклад в подготовку специалистов по этим направлениям внесли многие советские ученые.

Количество инженеров-электротехников, подготовленных за 60 лет в высших школах республики, исчисляется сотнями тысяч. Через аспирантуру вузов и научно-исследовательских институтов подготовлены тысячи кандидатов технических наук, из них многие талантливые ученые защитили докторские диссертации, пополнив и укрепив передовой отряд ученых-исследователей, профессоров высших учебных заведений.

*Научно-исследовательские институты.* Партия и правительство поставили перед учеными задачу быстрого внедрения научных достижений в технику, в народное хозяйство. Наука приобрела новое значение — значение производительной силы.

Для решения этих задач существенное развитие получили научно-исследовательские институты. Кроме уже упоминавшихся здесь ВЭИ им. В. И. Ленина и Энергетического института им. Г. М. Кржижановского, было создано большое число отраслевых научно-исследовательских учреждений электротехнического профиля: НИИПТ, СибНИИЭ, ВНИИЭМ, ВНИИ-электромаш, ВНИИэлектропривод, ВНИИэлектроэнергетики, ВНИИ источников тока, ВНИИ кабельной промышленности, которые разрабатывали новые виды электрооборудования, новые системы автоматики, защиты, исследовали процессы в сложных электросистемах, разрабатывали новые технологии, используя последние достижения науки, обеспечивая процесс освоения научных достижений.

В этих учреждениях работала целая армия выдающихся советских ученых, конструкторов, инженеров,

перечислить имена которых в этой краткой статье не представляется возможным. Достижения многих институтов создали им широкую известность не только в нашей стране, но и за рубежом. Институтами были установлены крепкие научные и деловые связи с научными учреждениями, союзных республик, оказана помощь в их становлении и развитии. Налажены совместные исследования с учеными зарубежных, особенно социалистических, стран.

При крупнейших электротехнических вузах были организованы проблемные лаборатории для решения актуальных и перспективных проблем современной электротехники. Такие лаборатории позволили использовать высокий научный потенциал высших учебных заведений, привлечь ведущих ученых вузов к проведению научно-исследовательских работ.

*Электропромышленность.* За годы Советской власти электропромышленность превратилась в одну из ведущих отраслей народного хозяйства, выпускающую продукцию на уровне самых высоких мировых стандартов. Созданы крупнейшие в мире турбогенераторы мощностью до 1200 МВт с водородным и водяным охлаждением, гидрогенераторы мощностью до 800 МВт. Применение прогрессивных методов охлаждения и новых магнитных и изоляционных материалов позволило существенно снизить удельные показатели крупных машин и создать трансформаторы мощностью свыше миллиона киловатт на напряжения 750 и 1250 кВ. Заводы Российской Федерации освоили широкую номенклатуру синхронных и асинхронных двигателей мощностью от 100 до 5000 кВт.

В послевоенные годы создана совершенно новая отрасль электропромышленности — силовая полупроводниковая техника, — совершившая подлинную революцию в электроэнергетике. Промышленность освоила выпуск мощных полупроводниковых вентилях — диодов и тиристоров, — являющихся основой мощных преобразователей. Освоен выпуск тиристоров на ток до 1200 А и напряжение до 3500 В в одном приборе, что позволило создать мощные высоковольтные вентили на напряжение до 200 кВ и токи до 2000 А для электропередач постоянного тока. Кремниевые вентили явились основой для переоборудования тяговых подстанций железных дорог, построения мощных магистральных электровозов, повышения мощности электролизовых предприятий, повышения к. п. д., точности и степени автоматизации электропривода.

В области высоковольтного аппаратостроения промышленностью освоены воздушные выключатели 750 кВ, 2000 А, трансформаторы тока на токи до 18000 А. Значительные достижения имеет и аккумуляторостроение. Создана широкая номенклатура аккумуляторов, в том числе кадмиево-никелевые, цинко-никелевые, серебряно-никелевые, марганцево-цинковые и другие типы с применением синтетических материалов.

За короткое время построены предприятия, производящие новые изоляционные материалы на основе кремнийорганических соединений, стекловолокна, эпоксидных и полиэфирных смол, стойких к повышенным температурам.

Кабельная промышленность освоила выпуск обмоточных проводов с широким диапазоном диаметров, высоковольтных маслonaполненных кабелей на напряжение до 500 кВ переменного тока и 850 кВ постоянного тока.

Получили развитие электростанции на нетрадиционных видах топлива, среди них наибольшее значение имеют атомные электростанции.

В начале 30-х годов в вестибюле ЭНИН можно было увидеть плакат с такой надписью: «Построим Единую высоковольтную сеть Европейской части РСФСР!».

## УКРАИНСКАЯ ССР

Исследования в области электротехники и электроэнергетики широкое развитие на Украине получили только после Великой Октябрьской социалистической революции. Осуществление грандиозного плана электрификации страны (ГОЭЛРО) потребовало организации научных работ, подготовки научных и инженерных кадров в области электротехники и энергетики. Открытие в 1918 г. в Киевском политехническом, а в 1921 г. в Харьковском технологическом институтах электротехнических факультетов, а также создание в 1930 г. Харьковского электротехнического института (ХЭТИ) во многом способствовали решению этой важной задачи.

В Украинской ССР начала интенсивно развиваться электротехническая промышленность, а вместе с ней отраслевая электротехническая наука. Так, на Харьковском электромеханическом заводе (ХЭМЗ) было организовано бюро исследований, переросшее в дальнейшем в центральные заводские лаборатории, а затем — в отраслевой институт.

Развитию фундаментальных исследований в области электротехники способствовало создание в 1939 г. в системе Академии наук УССР Института энергетики, директором которого и руководителем электротехнического отдела был акад. АН УССР В. М. Хрущов. На базе этого отдела в 1947 г. в Киеве по инициативе акад. АН УССР С. А. Лебедева был организован Институт электротехники АН УССР, преобразованный в 1964 г. в Институт электродинамики АН УССР.

Развитие электротехники в республике и возникновение научных школ тесно связано с именами П. П. Копняева, В. М. Хрущова, А. А. Потемни, М. А. Артемьева, А. В. Круковского, А. А. Скоморохова, Е. О. Патона, В. П. Никитина, П. В. Окулова и многих их учеников, подготовивших сильную научную смену.

После Великой Отечественной войны научные исследования по электротехнике получили дальнейшее развитие в ряде институтов АН УССР, в Львовском и Одесском политехнических институтах, Ждановском металлургическом и других вузах республики, а также в отраслевых научно-исследовательских учреждениях, возникших в связи с развитием в республике новых отраслей электротехнической промышленности (трансформаторостроения, электромашиностроения, аппаратостроения, полупроводниковой преобразовательной техники, приборостроения, бытовой электротехники и др.). Отразить все многообразие выполненных учеными республики исследований и достигнутых результатов в области электротехники в короткой статье не представляется возможным. Поэтому приведенные ниже результаты ни в коей мере не претендуют на исчерпывающую полноту. Исследования выполнялись в тесном единении со всей отечественной наукой и были направлены на решение важнейших задач народного хозяйства страны.

Эта надпись соответствовала основной задаче энергетиков того времени.

Сейчас, в год 60-летия образования СССР, магистральные высоковольтные линии далеко перешагнули границы России и объединились в общую энергосистему страны, символизируя вечное сотрудничество и братство ее народов.

В период первых пятилеток были разработаны методы расчета режимов высоковольтных линий передачи энергии, расчета районных и городских сетей по уравнительному мощностям и токам, анализа переходных режимов и расчета токов короткого замыкания в сложных сетях. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований перенапряжений в высоковольтных линиях передачи и разработаны устройства для защиты от них (В. М. Хрущов).

Разработана система компаундирования синхронных машин и созданы устройства автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов и компенсаторов. За разработку теории искусственной устойчивости, компаундирования генераторов и внедрение их в энергосистемы С. А. Лебедев и Л. В. Цукерник удостоены Государственной премии СССР (1950 г.).

Разработаны принципы построения, теория и создана первая в СССР (1951 г.) малая электронная вычислительная машина «МЭСМ» с универсальными алгоритмическими свойствами, позволившая выполнить большое число сложных вычислительных работ (С. А. Лебедев).

Ученым УССР принадлежит инициатива применения тензорных и матричных методов для анализа режимов электрических сетей, расчета токов короткого замыкания, анализа электромеханических переходных процессов в энергосистемах с использованием ЭВМ для решения разнообразных задач при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем (Л. В. Цукерник).

Разработаны методы расчета установившихся режимов сетей и линий передачи энергии при различных уровнях напряжений, методы эквивалентирования замкнутых сетей, оптимизации режимов и распределения реактивных мощностей в системах электроснабжения с помощью ЭВМ (В. Г. Холмский, В. Н. Винославский, Ю. В. Щербина).

Созданы теория «земляного провода», методы неразрушающих испытаний высоковольтной изоляции трансформаторов и генераторов, изучения импульсной короны на ЛЭП (И. К. Федченко, М. Е. Иерусалимов).

Разработаны основы теории одновременной передачи электроэнергии переменным и постоянным токами по общим линиям передачи. На основе этой идеи предложен и получил применение способ плавки гололеда пульсирующим током (Г. И. Денисенко).

Разработаны теория, общие принципы построения устройств для повышения качества электрической энергии, стабилизации ее параметров в электрических сетях. Созданы схемы и устройства для симметрирования режимов, высокоэффективные управляемые многофункциональные устройства для повышения качества электрической энергии в сетях с несимметричными, нелинейными и резко изменяющимися нагруз-

ками (А. К. Шидловский, И. В. Жежеленко, В. Г. Кузнецов).

Создана система защиты синхронных генераторов и новые устройства для эффективной защиты высоковольтных линий передачи и кабельных сетей от замыканий на землю на основе использования трансформаторов тока нулевой последовательности с подмагничиванием. Созданы измерительные преобразователи для ЛЭП сверхвысокого и ультравысокого напряжения (И. М. Сирота, Б. С. Стогний).

Разработаны методы расчета устройств автоматического пуска энергетического оборудования разного типа и для различных условий включения трансформаторов, автоматического повторного включения релейной защиты, самосинхронизации генераторов и других устройств автоматики энергетических систем (Е. П. Гизила).

Комплекс исследований выполнен по методам расчета электромагнитных процессов в электрических машинах, трансформаторах, по изучению магнитных полей в ферромагнитных телах, решению нелинейных краевых задач электромагнитного поля. Разработаны методы расчета электромагнитных и тепловых полей в электрических машинах предельной мощности, а также магнитных полей рассеяния в концевых частях высокоиспользованных машин переменного тока, предложены новые конструктивные решения систем охлаждения и методы повышения надежности сверхмощных турбогенераторов. Разработаны различные типы асинхронных генераторов больших мощностей и их систем возбуждения. Разработаны бесконтактные синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения, отличающиеся большой надежностью и высокими энергетическими показателями (И. М. Постников, Г. Г. Счастливый, В. Г. Данько, А. В. Новиков, А. И. Лищенко).

Созданы теория, методы расчета, схемы автоматического управления агрегатов, предназначенных для генерирования переменного тока стабильной частоты при изменяющейся скорости приводных двигателей и переменного тока регулируемой частоты при постоянной скорости двигателей (М. М. Красношарпа).

Выполнен комплекс исследований по разработке теории и конструированию магнитофугальных двигателей, специальных электрических машин для питания установок электроэрозионной обработки металлов импульсным током, развита теория коммутационных процессов и предложены методы улучшения характеристик машин постоянного тока (Г. И. Штурман, И. С. Рогачев, В. А. Яковенко).

Разработаны теория и конструкции трехступенных электрических машин, получивших применение в гироскопических и сканирующих устройствах (А. Н. Милях, В. А. Барabanов).

Развита теория электропривода и электромеханических систем, на основе которой созданы высокоэффективные системы автоматизированного электропривода для различных отраслей народного хозяйства (А. Г. Ивахненко, Н. Н. Васильев, Л. А. Радченко, Н. Г. Попович, Л. П. Петров, В. М. Чермалых и др.).

В области преобразования и стабилизации параметров электроэнергии учеными республики выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований и разработаны высокоэффективные электромагнитные и полупроводниковые преобразователи различного назначения.

Созданы теория, методы расчета и конструкции мощных преобразователей тока с компенсацией реактивной мощности, позволяющих снизить потери в питающих сетях, повысить надежность их работы и улучшить технико-экономические показатели. Работы по созданию новых компенсационных преобразователей и внедрение их в промышленность в 1962 г. удостоены Ленинской премии (руководитель И. М. Чиженко). Разработаны компенсационные тиристорные инверторы, регуляторы для электротермических установок, источники питания накопителей энергии импульсной энергетики. Разработаны основы теории преобразовательной техники, созданы преобразователи частоты и преобразовательные устройства со сверхнизким выходным напряжением (И. М. Чиженко, В. С. Руденко).

Созданы основы теории, методы анализа и проектирования индуктивно-емкостных преобразователей для питания нагрузки стабилизированным током, значение которого не зависит от количества и мощности включенных потребителей. За разработку теории и создание систем стабилизированного тока присуждена Государственная премия УССР 1975 г. (руководители А. Н. Милях, И. В. Волков).

Разработаны основы теории, схемы и устройства, обеспечивающие коммутацию зарядных цепей и стабилизацию напряжения на батарее конденсаторов, реализованные в ряде конденсаторных сварочных машин (И. В. Пентегов).

Создана теория анализа и синтеза вентильных цепей, найдены условия оптимизации отдельных блоков и преобразователей в целом. Исследованы методы модуляции напряжения преобразователей и найдены оптимальные пути повышения качества выходной энергии. Построен ряд эффективных автономных инверторов, созданы стабилизаторы и регуляторы напряжения.

На основе глубокого секционирования с введением резервной избыточности разработан ряд высоконадежных устройств преобразовательной техники для космических аппаратов и других областей народного хозяйства (В. Е. Тонкаль, Е. А. Карпов, Р. П. Карташов, Ю. И. Драбович).

Разработаны интегральные методы исследования вентильных цепей и способов повышения энергетических показателей полупроводниковых преобразователей, топологические методы анализа переходных и установившихся процессов в устройствах промышленной электроники. Построены и внедрены различные преобразователи параметров электроэнергии с повышенными энергетическими показателями, разработана система управления ими (О. А. Маевский, В. Т. Долбня, В. П. Шипилло).

Большого развития и высокого уровня достигли в Украинской ССР исследования по теоретической электротехнике, разработке новых методов расчета электрических цепей и исследованию электромагнитных полей. Разработаны комплексный метод решения задач теории колебаний, расчета процессов в линейных и нелинейных цепях, цепях с вентильными преобразователями, топологические методы анализа сложных электрических цепей, теория четырехполюсника и многополюсника, анализ цепей с произвольным соединением четырехполюсников и многополюсников (Г. Е. Пухов, А. Н. Милях, Э. В. Зелях, В. П. Сигорский, Ю. М. Калпиболотский, А. И. Петренко, Б. И. Блажкевич, Н. Г. Максимович, Ю. Т. Величко).

Выполнены фундаментальные исследования по обобщению операционного исчисления при помощи контурных интегралов и развитию операционного метода анализа применительно к задачам математической физики, механики и электротехники. Разработана математическая теория синтеза линейных электрических цепей (А. М. Эфрос, А. М. Данилевский).

Созданы основы тейлоровского исчисления, позволяющего путем алгебраизации дифференциальных уравнений по правилам и формулам, близким к такому для операционного исчисления, исследовать переходные процессы в линейных и нелинейных электрических и электронных цепях.

Разработаны и исследованы оригинальные электро моделирующие цепи, позволившие создать универсальные аналоговые машины для решения различных систем алгебраических уравнений, систем дифференциальных уравнений в обыкновенных и частных производных, а также интегральных уравнений (Г. Е. Пухов, В. В. Васильев).

Развиты методы аналитической механики и качественной теории дифференциальных уравнений для исследования электрических нелинейных цепей. Разработана общая теория метода припасовывания и метода на основе суммирования конечных приращений для расчета на ЭВМ нелинейных сложных электрических и электронных схем (Л. А. Синицкий, В. М. Бондаренко).

Созданы аналитические методы исследования электрических полей в полупроводниковых и плазменных средах с нелинейными и анизотропными свойствами при наличии сильных внешних магнитных полей. Разработаны вариационные методы расчета электромагнитных полей при помощи ЭВМ и моделирующих устройств в неоднородных и нелинейных средах (Ю. П. Емец, О. В. Тозони, Е. И. Петрушенко, А. И. Князь).

Более 30 лет в вузах республики и Академии наук УССР проводятся теоретические и экспериментальные исследования по разработке схем, методов и приборов для электрических и магнитных измерений. Члены-корреспонденты АН УССР А. Д. Нестеренко и К. Б. Карандеев создали научные школы по теории и методам электрических и магнитных измерений и электроприборостроению. В области теории электроизмерительных приборов уравновешивания, создания принципов построения вариационных измерительных устройств, применения гальваномангнитных эффектов в измерительной технике и разработке соответствующих приборов эти школы заняли ведущее место в стране.

Выполнены фундаментальные исследования электроизмерительных схем уравновешивания и разработки метода расчета и построены приборы на основе мостовых компенсационных и дифференциальных

схем. Работы по созданию и освоению новой электроизмерительной аппаратуры удостоены в 1951 г. Государственной премии СССР (руководитель А. Д. Нестеренко).

Разработаны теоретические основы и созданы принципы построения вариационных устройств и систем переменного тока, позволяющие с высокой точностью и быстродействием измерить параметры комплексных значений сопротивлений в широком диапазоне частот. За разработку теоретических основ и принципов построения автоматических измерителей комплексных электрических величин и создание цифровых автоматических мостов переменного тока группа ученых (руководитель Ф. Б. Гриневич) и производственников завода «Точэлектрприбор» удостоена Государственной премии СССР в 1976 г.

Созданы основы теории и принципы построения аппаратуры для измерения магнитных параметров магнитомягких и магнитотвердых материалов и измерительных приборов с использованием гальваномангнитных эффектов. За разработку и внедрение в серийное производство магнитоизмерительных приборов группе ученых (руководители А. Д. Нестеренко, С. Г. Таранов) присуждена Государственная премия УССР 1978 г.

Разработаны теоретические основы информационно-измерительной техники и методы преобразования и выделения измерительной информации из гармонических сигналов, частотно-анализирующие и фазоизмерительные приборы для определения информативных параметров сигналов переменного тока, устройства для измерения неэлектрических величин, высокоэффективные устройства различного функционального назначения (Ф. Б. Гриневич, Ю. А. Скрипник, П. П. Орнатский, Ю. М. Туз, С. М. Маевский, А. Л. Грохольский, А. Д. Ниженский).

Созданы приборы для электроразведки полезных ископаемых с автоматическими вычислительными устройствами, многоканальная аппаратура для геофизических исследований и бурения нефтяных и газовых скважин (К. Б. Карандеев, Л. Я. Мизюк, В. Н. Михайловский, А. Н. Свенсон).

Приведенный здесь краткий обзор развития электротехнической науки в Украинской ССР за 60 лет не исчерпывает множества исследований в этой области, опубликованных в многочисленных монографиях, сборниках научных трудов, журналах и других изданиях. Все эти достижения были бы невозможны без благотворного влияния всей советской электротехнической науки. Исследования украинских ученых проводились в тесном творческом содружестве с научными и производственными организациями всех республик Советского Союза. Они отвечали запросам промышленности и энергосистем, что обеспечило ускорение научно-технического прогресса в нашей стране.

## БЕЛОРУССКАЯ ССР

За годы существования республики энергетика Белоруссии прошла несколько важных этапов развития. Если в первые годы Советской власти на территории, занимаемой ныне Белорусской ССР, мощность электростанций едва достигала 5 тыс. кВт, а на душу населения приходилось 0,43 кВт·ч электроэнергии (в 15 раз меньше, чем в среднем по стране), то уже

в 1940 г. на душу населения республики вырабатывалось в 96 раз больше электроэнергии, чем в 1913 г. В 1927 г. было начато сооружение Белорусской ГРЭС по плану ГОЭЛРО; с завершением ее строительства электроэнергию получили Витебск, Могилев, Шклов, Орша и прилегающие к ним районы. Во второй пятилетке были построены достаточно крупные для того

времени Минская ТЭЦ-2, Слуцкая, Полоцкая и Мозырская ТЭЦ. В течение первых пятилеток был построен ряд крупных предприятий с преобладанием электрифицированного привода. В первой пятилетке, например, был обновлен и почти полностью переведен на электропривод станочный парк в сельхозмашиностроении, удельный вес промышленности в народном хозяйстве республики составил в 1928 г. 41,3% против 17,5% в 1923 г.

Значительные темпы в предвоенные годы набрала и электрификация сельского хозяйства. Начиная с 1928 г., когда был составлен перспективный план развития сельской электрификации БССР, и до начала Великой Отечественной войны в республике было построено 32 сельские гидроэлектростанции общей мощностью 1400 кВт.

После войны полностью разрушенное энергохозяйство республики пришлось создавать заново. Всего было разрушено 10 тыс. предприятий, а на оставшихся действовало только 2% довоенных энергетических мощностей (5000 кВт). К 1946 г. 6000 предприятий были восстановлены, и уже к концу первой послевоенной пятилетки промышленность республики превысила уровень 1940 г. на 15%, а машиностроение и металлообработка — более чем в 2 раза. Начинает широко применяться электроэнергия в энерготехнологии — плавке стали, электросварке, электролизе, углубляется электрификация силовых процессов (к 1962 г. в машиностроении — 95,2%).

В 60-х годах в республике созданы новые энергоемкие отрасли промышленности — электротехническая, радиоэлектронная, точного приборостроения, минеральных удобрений, нефтеперерабатывающая и нефтедобывающая. С ростом электропотребления развивается энергетическая база. Вводятся в строй Смолевичская и Василевичская ГРЭС (1958 г.), сооружается Березовская (900 МВт), а затем (в 1964 г.) Лукомльская ГРЭС (2400 МВт) — флагман энергетики республики. Вырабатываемая электроэнергия вливается в единую энергосистему «Мир», в которую входят страны социалистического содружества. Республика покрыта сетью электрических линий низкого, среднего и высокого напряжения, проектируется сооружение линий и подстанций сверхвысокого напряжения (750 кВ) для надежной связи узлов нагрузки в энергосистеме Северо-Запада и с другими энергосистемами.

Бурное развитие энергетики республики в послевоенные годы вызвало необходимость проведения серьезных научных исследований в области энергоиспользования местных топлив, экономики, энергетики отраслей народного хозяйства, автоматизации технологических процессов на электростанциях, разработки релейных защит и других важных проблем. Для этих целей в Академии наук БССР был создан сначала сектор, затем (в 1953 г.) институт энергетики, развил научные исследования энергофакультет Белорусского политехнического института. В 1964 г. на базе двух лабораторий АН БССР был образован Белорусский филиал Государственного научно-исследовательского энергетического института им. Г. М. Кржижановского. В настоящее время исследования в области энергетики выполняют также Институт ядерной энергетики и Институт тепло- и массообмена АН БССР, Белорусские отделения институтов «Энергосетьпроект» и «ВНИПИэнергопром», кафедры

Политехнического, Технологического институтов и Института механизации сельского хозяйства, а также ряд отраслевых лабораторий энергетического профиля в различных министерствах.

Современные исследования в области энергетики отличаются широким применением электронно-вычислительной техники — от микропроцессорной до больших универсальных машин. В лабораториях Бел. ЭНИНа разработан и внедрен ряд руководящих материалов по созданию АСУ тепловыми электростанциями (ТЭС) и комплексами задач АСУ энергосистемами: типовые технические задания, техпроекты-аналоги, рабочие проекты, типовая методика расчета экономической эффективности АСУ ТЭС, на ряде головных электростанций внедрены системы АСУ с автоматическим и ручным сбором информации. На разных стадиях разработки находятся АСУ ТП. Институт приступил к разработке систем автоматизации МГД-электростанции (блок 500 МВт) и атомной ТЭЦ. Эти новые работы являются логическим продолжением исследований института, которому предстоит выполнить все этапы разработки и внедрения средств защиты и автоматизации отдельных узлов МГД-установки, АСУ машзала и общестанционного уровня АТЭЦ.

Институтом разработаны информационно-измерительные системы учета и контроля электрической энергии, счетчики тепла, позволяющие в полной мере реализовать преимущества нового преискуранта и тарифов на электро- и теплоэнергию на базе анализа совмещенных максимумов нагрузок, дифференцирования электропотребления по часам суток, автоматического суммирования его по каналам учета и отображения соответствующим образом полученной информации. Работы по автоматизации энергоучета продолжают в направлении обеспечения иерархичности построения систем, применения более совершенной элементной базы электронных блоков, увеличения дальности передачи собираемой информации.

Автоматизация солнечных, фотоэлектрических и геотермальных электростанций — новое направление работ института. В текущем году будет опробована система управления гелиостатом на полигоне солнечной электростанции, выпущены технико-экономические обоснования, разработаны техзадания; разрабатываются разделы технических проектов автоматизации геотермальных электростанций. Исследования сопровождаются получением новых оригинальных решений, позволяющих экономить средства на системы управления, повышать их надежность и качество функционирования. Привлекается большое число субподрядчиков, в том числе разработчиков средств локальной автоматики. Эти средства увязываются с системами АСУ и при разработке АСУ тепловых электростанций.

В серьезную самостоятельную разработку вошло направление работ института по автоматизации топливоучета как части подсистемы оптимизации перспективного, анализа отчетного и планирования текущего топливно-энергетического баланса региона в общем балансе страны. Результаты этой разработки дают возможность выбирать оптимальное направление энергоиспользования в отраслях промышленности, автоматизировать оперативный топливоучет, контролировать ход реализации планов расхода топлива. Отдельные комплексы задач топливоучета внедрены

во многих энергосистемах страны и дают существенный экономический эффект.

Высокой эффективностью отличается и разработка подсистемы энергоремонта основного оборудования электростанций и электрических сетей. Эта автоматизированная подсистема с самого начала строилась как типовая с использованием банка данных, с взаимовязкой решаемых задач и применением оптимизационных расчетов там, где ставился вопрос выбора лучших планов ремонта из множества допустимых. Обмен опытом внедрения задач этой подсистемы позволил многим из задач внедрить в ряде энергосистем.

Один из разделов плана научно-исследовательских работ филиала связан с исследованиями и внедрением на ряде электростанций, работающих на высоковольтных топливах (торф, бурые угли), систем пылеприготовления с мельницами-вентиляторами. Такие исследования и эксперименты проведены на стендах, а система сдана в опытно-промышленную эксплуатацию.

Сложные научные задачи в области энергетики решают и научные коллективы других организаций республики. Так, на энергетических факультетах Белорусского политехнического института проводятся исследования, связанные с автоматизацией процессов на ТЭС с применением микропроцессоров, по экономии вторичных энергоресурсов, созданию криогенных электропередач и работы этих передач в системе, созданию межсистемных гибких связей с асинхронизированными преобразователями частоты, снижению потерь электроэнергии в электрических сетях, разработке и внедрению методов, алгоритмов и программ оптимизации режимов работы систем электроснабжения промышленных предприятий и городов республики, промышленных работ, созданию релейных защит и системной автоматики на микропроцессорах.

Белорусское отделение института «Энергосеть-проект» прогнозирует энергопотребление в сельском

хозяйстве с учетом применения новых энерготехнологий, разрабатывает эффективные мероприятия по сокращению потерь электроэнергии в сетях энергосистемы, по защите электронной техники от мешающего влияния электромагнитных полей, совершенствует и наращивает систему автоматизированного проектирования электрических сетей.

Ряд энергосберегающих технических решений разработало и внедрило на промышленных предприятиях республики Белорусское отделение института «ВНИПИЭнергопром». Отделение исследует условия использования мощностей ТЭЦ в качестве маневренных, разрабатывает АСУ технологическими процессами в тепловых сетях, проводит физико-химические исследования по оценке реальной экологической нагрузки в районах ТЭС и разрабатывает мероприятия по ее снижению.

Энергетики Белорусского института механизации сельского хозяйства и технологического также не остаются в стороне от решения проблем в важных отраслях народного хозяйства — сельском хозяйстве, нефтехимии, получении минеральных удобрений. Основными направлениями исследований в этих институтах является разработка средств контроля и управления электроприводом, электротехнических методов переработки кормов и обработки материалов, оптимизации электромеханических систем применительно к химической промышленности и деревообработке.

Краткие экскурсы в историю развития энергетики республики и обзор состояния научно-исследовательских работ в институтах энергетического профиля показывают, что к 60-летию Советского Союза в Белорусской ССР сложились коллективы с квалифицированными кадрами, решающие важные научные и практические вопросы совершенствования энергетики, повышения энергетического потенциала региона.

## УЗБЕКСКАЯ ССР

Электроэнергетика в республиках Средней Азии росла на фоне общего подъема их производительных сил, предпосылкой которого были созданы Великой Октябрьской социалистической революцией. На заре развития энергетики топливные ресурсы Средней Азии не были разведаны. Ограниченный объем добываемых ручным способом углей не мог удовлетворить даже бытовые нужды населения. Единственным значительным энергетическим ресурсом края была гидроэнергия. Строительство первых гидроузлов было намечено еще в знаменитом плане ГОЭЛРО по Туркестанскому району. Причем план этот предусматривал комплексный характер создания гидроузлов: наряду с получением гидроэнергии развитие орошения. Этот принцип при проектировании и строительстве всех крупных гидроузлов в республике не нарушается и сегодня.

К 1926 г. был построен один из первенцев ГОЭЛРО — ГЭС Бозсу мощностью 4 тыс. кВт, положивший начало централизованному электроснабжению Ташкента. Затем вступили в строй каскады ГЭС на Чирчик-Бозсуйском, Даргомском, Шахриханском ирригационных трактах. Эта энергетическая база в годы Великой Отечественной войны была серьезным подспорьем для функционирования различных предприятий, эвакуированных в Узбекистан.

С открытием в республике месторождений угля и газа появились крупные тепловые станции: Ангренская, Ташкентская, Навоинская, Сырдарьинская, а также ТашТЭЦ, ФерТЭЦ и др. В прилегающих к Узбекистану республиках также были построены крупные тепловые станции. Таким образом, в мощной объединенной энергосистеме Средней Азии, несмотря на появление в последние годы ряда уникальных гидростанций, доля тепловых станций в общей выработке электроэнергии в канун 60-летия СССР составляет более 80%.

Все электрические станции республик Средней Азии и южного Казахстана связаны линиями напряжением 220 и 500 кВ.

Масштабное развитие энергетики вообще и специфические ее задачи в условиях республики были основными предпосылками развития науки в этой области. Оно получило размах в военные годы в связи с активной работой большой группы ученых Ленинградского политехнического института (М. П. Костенко, Л. Р. Неймана, В. В. Болотова, Н. Н. Щедрина и др.) во главе с чл.-корр. АН СССР М. А. Шателеном. С их участием отдел энергетики Узбекского филиала АН СССР был реорганизован в Институт энергетики АН УзССР. В Ташкентском политехническом и энергетическом институтах проведена большая

работа по повышению номинальной мощности гидростанций на основе тепловых испытаний их агрегатов и найдены пути преодоления шуговых затруднений каскада ГЭС в условиях зимы, разработаны методы борьбы с аварийностью в мощных ртутно-выпрямительных установках, проведены исследования по статической и динамической устойчивости проектируемых линий электропередач ФархадГЭС — Ташкент с учетом регулирующего эффекта одной из крупнейших нагрузок системы, разработаны мероприятия по улучшению условий работы оборудования и рационализации энергопотребления ряда промышленных предприятий республики, создана подробная теория электромагнитных процессов в ртутно-выпрямительных установках.

Деятельность проф. Н. Н. Щедрина, избранного в чл.-корр. АН УзССР, оставила большой след в научной жизни республики. Им выполнены такие фундаментальные работы, относящиеся к передаче электроэнергии на дальние расстояния постоянным и переменным током, как теория преобразования постоянного тока в переменный с естественной коммутацией при большом числе анодных фаз, методы расчета самовозбуждений асинхронных и синхронных машин; работы по инвертированию представляют научный и практический интерес для последующих исследований. Большой вклад в подготовку кадров, развитие энергетики и электроэнергетической науки внесли сотрудники ТашПИ (Г. Ф. Грушкин, А. В. Сорокин, Т. П. Губенко, И. Я. Каменский, И. Н. Оранский, М. И. Жеребцов, Г. Р. Рахимов, Х. Ф. Фазылов, М. З. Хамудханов, Б. А. Удовиченко, Б. И. Шабадаш и др.).

В области теоретической электротехники чл.-корр. АН УзССР Г. Р. Рахимов исследовал ряд особенностей колебательных явлений, возникающих в цепях с ферромагнитными элементами, дал физическое толкование явлениям феррорезонанса, низших гармонических и комбинированных колебаний. Установил существование интегрального инварианта систем при возбуждении автопараметрических колебаний. Ему принадлежат разработка электротехнической терминологии и первый учебник для вузов на узбекском языке. Он был одним из главных инициаторов постоянно созываемых в ТашПИ Всесоюзных межвузовских конференций по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем.

В последние годы идут углубленные исследования теории нелинейных и линейных цепей. З. И. Исмаиловым при исследовании одночастотных колебательных систем с активными нелинейными параметрами показано появление в этих системах субгармонических колебаний 3-го, 4-го и 5-го порядков, возбуждаемых в регенеративном режиме, при этом впервые доказана возможность мягкого возбуждения субгармонических колебаний выше 2-го порядка, что имеет практическое значение при разработке многократных делителей частоты, фильтров и логических устройств. Показано, что применение в колебательных системах одновременно двух реактивных нелинейностей позволяет симметризовать резонансные кривые и исключает осцилляции амплитуды и фазы колебаний при их установлении.

А. С. Каримовым разработана обобщенная теория частото-фазообразования и стабилизации выходных режимных параметров, отражающая единство и не-

разрывность физических процессов, происходящих в феррорезонансных цепях автопараметрического типа. На основе теории адиабатического инварианта энергии при возбуждении автопараметрических колебаний создан критерий оценки предельных мощностей таких цепей.

В. Н. Ивашевым для исследования установившихся режимов преобразования частоты разработана методика, ставящая в соответствие каждому виду колебаний некоторую режимную поверхность в пространстве координат квадратов амплитуд гармоник потока ферромагнитного элемента.

П. Ф. Хасановым разработана оригинальная модель и алгебра структурно-режимных схем для анализа и синтеза электронных, электромагнитных и оптоэлектронных цепей. Составлены алгоритмы целенаправленного преобразования схем и предложен метод их прямого синтеза.

В области преобразовательной техники Б. И. Умаров провел глубокие исследования электромагнитных процессов в преобразователях, имеющих ряд характерных этапов работы на каждом интервале повторяемости. Предложена методика синтеза параметров элементов автономных инверторов тока для общего случая, которая реализована в алгоритмах и программах для ЦВМ.

Научное направление в области электрических систем возглавлялось Х. Ф. Фазыловым. Известно, что элементы современных электрических систем состоят из трехфазных симметричных устройств. Обычно в основу анализа режимов электрических систем кладется некоторая расчетная схема, приведенная к одной фазе, при этом параметры элементов расчетных схем должны в строгой форме отражать все соотношения между токами и напряжениями одноименных фаз реальных трехфазных устройств. Расчетным схемам в общем случае присущи некоторые свойства, отличные от свойств реальных цепей. Это, в первую очередь, относится к трансформаторам с различными схемами соединения их обмоток. С учетом этих обязательств впервые были получены (1946 г.) узловые уравнения сетей электрических систем и заложены основы (1953 г.) современных методов решения этих уравнений в их нелинейной постановке, т. е. расчетов установившихся режимов электрических систем. Записаны узловые уравнения и получено решение их с учетом изменения частоты системы, при этом отпало понятие балансирующего и опорного узлов. Исследован ряд задач самоустанавливающихся режимов и предложен метод определения предельных мощностей генерирующих и нагрузочных узлов.

Расширенные возможности узловых уравнений показаны при расчетах динамической устойчивости сложных электрических систем (1949 г.), а также при исследовании многократных повреждений в сетях (1980 г.) на базе метода симметричных составляющих (Т. Х. Насыров), при разработке общей теории преобразования числа фаз (С. С. Салихов) и при изучении ряда схем преобразования однофазного тока в трехфазный.

Узловые уравнения позволяют анализировать не только установившиеся, но и переходные режимы электрических систем с детальным учетом взаимного влияния поведения всех узловых элементов. За последние годы на основе применения неявных методов интегрирования переходных процессов в мгновен-

ных значениях переменных разработаны и опробованы разностные модели элементов энергосистем, обеспечивающие их простое включение в общую расчетную схему (У. Б. Шарипов). При этом трудности, связанные с приведением системы уравнений к нормальной форме Коши, отпадают, и учет «жесткости» уравнений, т. е. резко различный характер длительности протекания переходных процессов, предопределяет простой выбор шага дискретизации в зависимости от длительности переходных процессов или представления отдельных подсистем или элементов системы с различными степенями упрощения.

Для оперативной цели создан алгоритм оптимизации суточного режима гидро-тепловых объединенных энергосистем с преодолением трудных вопросов учета сетевого фактора, выбора состава оборудования, интегральных и других ограничений (Х. Ю. Юлдашев). Программа внедрена в объединенной энергосистеме Средней Азии. Отметим, что ОДУ Средней Азии является одной из первых в СССР энергосистем, где АСДУ реализовано на более совершенном уровне. Разработаны также алгоритм и программа оптимизации ремонта основного оборудования электростанций в энергосистеме (С. С. Усачев) и важные принципы и алгоритм обработки и передачи информации с минимальным запаздыванием в сложных иерархических системах для практической реализации АСДУ (Д. А. Абдуллаев).

Анализ перспективы развития энергосистемы нашей страны с дальними линиями сверхвысоких напряжений, а также трудностей, возникающих при дальнейшем увеличении единичных мощностей синхронных турбогенераторов традиционной конструкции, позволил выдвинуть проблему создания и применения крупных асинхронных турбогенераторов со статорным возбуждением — АТГ(с) без обмоток на роторе (К. Р. Аллаев). В связи с интенсивно ведущейся в мировой энергетике работой по улучшению технико-экономических показателей статических источников мощностей выдвинутая проблема в будущем может быть весьма актуальна с точки зрения создания сверхмощных электрических станций, состоящих только из АТГ(с).

В связи с возрастающей актуальностью создания электрических машин с повышенным потреблением реактивной мощности проводились теоретические и экспериментальные исследования статических и динамических режимов синхронных машин двухосного возбуждения, позволяющие существенно повысить технико-экономические и энергетические показатели как самих машин, так и электрических систем (М. Г. Ахматов). Ведутся поиски оптимальных законов регулирования возбуждения этих машин.

Научно-исследовательские и экспериментально-прикладные работы в области электропривода и промышленной энергетики всегда велись в тесном контакте с важными энергопотребляющими предприятиями

ми в Ташкентском политехническом институте (Н. Х. Базаров, Х. Г. Каримов, В. К. Соколовский, А. А. Хашимов и др.) и в Институте энергетики АН УзССР (М. З. Хамудханов, М. Хусанов, Г. С. Камалов и др.) академиком АН УзССР М. З. Хамудхановым и его учениками (Н. М. Усманходжаев, А. А. Хашимов). На основе изучения свойств и характеристик существующих и вновь предложенных схем преобразователей (особенно его главного элемента — инвентора) расширены теория и методы расчета систем привода с асинхронными, конденсаторно-асинхронными и синхронными двигателями при стационарном и динамическом режимах с различным характером нагрузки на валу.

В области кабельной техники Я. З. Месенжником и его учениками разработаны вопросы теории и конструирования многофункциональных кабелей для глубоких и сверхглубоких скважин, работающих в уникально сложных условиях многофакторного воздействия.

Сотрудниками ТашПИ, Института энергетики АН УзССР и ВНИИЭК изготовлены и испытаны все виды образцов фарфоровых изоляторов (В. А. Пмас, С. С. Шикин, С. А. Кудрина) из местного сырья, позволяющие обособить строительство в республике завода высоковольтного фарфора.

Нельзя ни остановиться на работах, связанных главным образом со специфическими особенностями Средней Азии, в частности Узбекистана. Наличие здесь районов с засоленными почвами является обычным явлением. Загрязненные в этих условиях изоляторы линии и подстанций многократно теряют свою электрическую прочность. Над систематическим изучением природы загрязнений изоляции и ее электрических характеристик с целью рационального выбора уровня изоляции, профилактики и борьбы против загрязняемых отложений плодотворно работала большая группа сотрудников Института энергетики (С. С. Шикин, А. А. Инагамов, А. С. Кудратуллаев и др.). Б. М. Юабов предложил и реализовал обмывку загрязненной изоляции линии напряжением 500 кВ струей воды, что оказалось возможным на основе доказанного им положения о наличии значительной электрической прочности высоконапорной струи малого диаметра.

На основе большого фактического материала проектирования, строительства и опыта эксплуатации горных линий электропередачи создана обобщенная методика механического расчета таких линий (Л. М. Кессельман).

В республике действуют два политехнических института с пятью факультетами энергетического и электротехнического профиля и множество техникумов, выпускающих ежегодно более тысячи инженеров и техников для успешно развивающейся энергетической и электротехнической промышленности республики.

## ГРУЗИНСКАЯ ССР

Основателем электротехнической школы Грузинской ССР в 20-х—30-х годах является организатор высшего технического образования в Грузии акад. А. И. Дидебулидзе, первые научные труды которого

по электротехнике были опубликованы еще до революции. Основание электротехнической школы и ее развитие были предопределены пуском первых электростанций в 1927—1933 гг., организацией политехни-

ческого факультета в 1922 г. — впоследствии Грузинского политехнического института им. В. И. Ленина (ГПИ) (1928 г.).

В становлении и развитии электротехники в республике большую роль сыграли известные ученые и инженеры, руководители и сотрудники кафедр ГПИ им. В. И. Ленина профессора А. Я. Тер-Хачатуров, С. П. Киркесалишвили, Л. Д. Хизанишвили, доценты А. И. Мухелишвили, Д. Г. Туманишвили, А. М. Кварцхава, И. М. Мачавариани, Е. Г. Чиковани и др.; активное участие они принимали и в электрификации отраслей народного хозяйства.

В 1931 г. был основан Закавказский научно-исследовательский институт энергетики и электрификации, который через несколько лет был объединен с Тбилиским научно-исследовательским институтом гидроэнергетики (впоследствии Грузинский научно-исследовательский институт энергетики и гидротехнических сооружений).

Основными направлениями научно-исследовательских работ в период 1928—1946 гг. в ГПИ им. В. И. Ленина являлись: применение электрической энергии в сельском хозяйстве и создание первого в Советском Союзе электротрактора А. И. Дидебулидзе, исследование электромагнитных процессов в машинах переменного тока, электрических режимов мощных руднотермических печей, резонансных явлений в трехфазных цепях, автоматизация чайных фабрик, регулирование частоты в электроэнергетических системах, новые виды релейной защиты и др.

В Закавказском и Тбилиском институтах проводились по выравниванию электрических нагрузок в Тбилиси, сооружению линий электропередач в горных условиях (грозы, гололед, заземления), длительным неполнофазным режимам, устойчивости асинхронной нагрузки, выбору расчетного расхода воды ГЭС, созданию новых электрических датчиков, методике расчета сложных электрических цепей.

В 1947 г. был организован Энергетический институт им. А. И. Дидебулидзе АН ГрузССР, который в 1973 г. был объединен с ТНИСГЭИ и назван ГрузНИЭГС. В Энергетическом институте проводились следующие работы: использование энергетических ресурсов и обоснование выбора объектов энергетического строительства; исследование электрических режимов работы и путей развития электроэнергетической системы Грузии, регулирование частоты, меры защиты подземных сооружений от блуждающих токов. В электротехническом отделе ТНИСГЭИ были проведены весьма важные исследования в области несимметричных режимов мощных синхронных гидрогенераторов и сложных сетей электрических систем, разработки и совершенствования релейной защиты.

В ГПИ им. В. И. Ленина за период 1947—1978 гг. основными направлениями исследовательских работ

являлись: совершенствование электропривода ряда производственных механизмов по точности останова и управляемости; защита магистральных трубопроводов от коррозии; повышение коэффициента мощности; развитие технических средств управления на базе полупроводниковой техники; импульсное регулирование скорости асинхронных двигателей; модернизация электроприводов постоянного тока на базе унифицированных блочных систем управления; установление параметров и оптимальных электрических режимов мощных ферросплавных печей; анализ электрических режимов и снижение потерь энергии в электротехнической системе Грузии; экономия электроэнергии в промышленности; определение методических погрешностей измерения в зависимости от параметров схемы, потенциалов, вызванных заряженными поверхностями вращения; исследования трехфазных параметрических источников тока, магнитно-импульсная техника, нелинейные электрические цепи, кондуктометрия; установление оптимальной структуры систем горных гидроэнергетических районов, самосинхронизация и устройства компаундирования генераторов, блокировка релейной защиты при качаниях в системе, расчет сложных видов переходных процессов и несимметричных режимов и оптимизация режимов работы энергосистемы Грузии, усовершенствование схемы высоковольтного импульсного генератора, уточнение параметров линии электропередачи; исследование несимметричных и переходных режимов машин переменного тока, магнитных полей машин постоянного тока; оптимизация параметров тяговых двигателей; электромагнитные способы преобразования числа фаз; надежность электрических микромашин.

В 1958 г. для обслуживания заводов электротехнической промышленности, производящих электрические машины и низковольтную аппаратуру, был создан Тбилисский научно-исследовательский электротехнический институт (ТНИЭТИ), основным направлением исследовательских работ которого являлись модернизация и совершенствование выпускаемой заводами продукции и разработка и внедрение новых, более совершенных их видов. В 1968 г. ТНИЭТИ был преобразован в Научно-исследовательский институт электронно-ионной технологии (НИИЭТИ) по научным исследованиям и конструкторским разработкам в области создания технологических процессов и оборудования с использованием сильных электрополей.

В этой краткой статье автор информировал читателей в основном о тематике научных и учебных учреждений Грузинской ССР на разных этапах их деятельности. Ознакомление с тематикой работ вузов и НИИ республики дает представление о ее широте и полноте охвата актуальных проблем энергетики и электротехники, которые предстоит решать грузинским ученым и инженерам в XI пятилетке.

## АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ ССР

В 1920 г. по указанию В. И. Ленина в плане ГОЭЛРО было уделено особое внимание Кавказскому району: «Кавказ для широкой электрификации созрел и к началу его электрификации надлежит приступить безотлагательно...». Далее, при анализе уровня технического оснащения нефтедобычи района Баку, дававшего в то время около 18% мировой и

приблизительно 80% добычи по стране, в плане ГОЭЛРО отмечено: «Единственно рациональным техническим и экономическим решением вопроса является электрификация промыслов...».

Мощность тепловых электростанций к 1920 г. достигала всего 55 МВт и была недостаточна для электрификации промыслов. Вся вырабатываемая в то

время электроэнергия потреблялась нефтяными промыслами и коммунальными потребителями Бакинского района. Характерно, что в 1920 г. около половины нефтяных скважин обслуживалась двигателями внутреннего сгорания и паровыми машинами, а уже в 1925 г. более трех четвертей скважин обслуживалось электродвигателями. В дальнейшем электрификация промыслов шла ускоренными темпами. В начале 30-х годов практически вся буровая техника базировалась на электродвигателях.

К числу важных потребителей электроэнергии относился и электротранспорт. Баку явился пионером электрификации железнодорожного транспорта в Советском Союзе. 6 июня 1926 г. состоялось открытие электрифицированной железнодорожной линии Баку—Сабунчи. Этот участок питался постоянным током напряжением 1200 В. Отметим также, что в 1924 г. в Баку впервые появился городской трамвай.

Развитие электрификации в республике и появление электротехнических предприятий потребовали кадров, специалистов, особенно для нефтяной промышленности. В Баку в 1920 г. был создан первый технический вуз—Азербайджанский политехнический институт (ныне институт нефти и химии им. М. Азизбекова). Этот институт стал важным центром подготовки инженерных кадров для нефтяной техники всей страны. Здесь работали видные советские ученые: академики И. В. Курчатов, Л. С. Лейбензон, профессора И. Г. Есьман, С. Н. Усатый, К. В. Покровский, М. М. Скворцов и многие другие. Русские ученые играли важную роль в становлении института, подготовке в его стенах квалифицированных кадров и постановке научных исследований, прежде всего по нефтяным проблемам.

В 1932 г. было создано Азербайджанское отделение Закавказского филиала АН СССР (АзОЗФАН), позднее оно было преобразовано в АзФАН СССР. В 1945 г. была создана АН Азербайджанской ССР.

Исследования в области энергетики и электрификации проводились в тесном контакте с ЭНИН им. Г. М. Кржижановского, который оказывал всестороннюю помощь в развитии энергетической науки и особенно в подготовке высококвалифицированных научных кадров — докторов и кандидатов наук.

Начиная с 30-х годов, совместно с ЭНИН им. Г. М. Кржижановского проводятся исследования в области изучения грозовых явлений. Изучалось формирование грозовых облаков, проведены комплексные исследования механизма развития разряда молнии и ее параметров в натуральных условиях, массовые измерения расчетных параметров разряда молнии при прямых ударах на ЛЭП и высотные объекты, исследована их грозозащита. Экспериментальные исследования на ЛЭП Мосэнерго позволили установить причину поражения молнией земной поверхности и отдельно стоящих объектов.

Был проведен комплекс исследований по эквивалентированию электроэнергетических систем, изучению их устойчивости, надежности. Предложен новый метод расчета пределов статической устойчивости сложных систем на основе экстремального подхода. Разработан инженерный метод оценки статической устойчивости узла электрической нагрузки. В результате исследования надежности электрических систем разработана методика комплексного статистического

анализа и прогнозирования надежности электрооборудования систем, обеспечивающая создание достоверной информационной базы АСУ и др.

Увеличение производства электроэнергии и рост передаваемых мощностей требуют освоения новых более высоких классов напряжения. Это, в свою очередь, связано с решением комплекса задач, в частности, с ограничением уровня возможных перенапряжений и созданием более надежной высоковольтной изоляции.

В начале 60-х годов остро был поставлен вопрос о повышении точности моделирования разрабатываемых ЛЭП напряжением 500—750 кВ и выше. Эта задача была решена. Разработаны и доведены до практической реализации методы расчета переходных электромагнитных процессов в сложных схемах протяженных ЛЭП с учетом таких явлений, как корона на проводах ЛЭП, насыщение магнитопроводов трансформаторов и реакторов и др. Разработанные методы расчета позволили смоделировать и объяснить целый ряд явлений в ЛЭП 500—750 кВ. Проводятся исследования эффективных средств регулирования сверхвысокого напряжения, основанных на принципе применения автотрансформаторов с вольтодобавочным трансформатором и применением тиристорного управления.

Некоторые вопросы физико-технических проблем энергетики разрабатываются в Институте физики АН АЗССР.

Одно из главных направлений технического прогресса, способствующее повышению производительности труда и интенсификации производственных процессов, связано с автоматизированным электроприводом. Исследования по проблеме управления электропривода переменного тока привели к разработке теории частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Одним из важных приложений разработанной системы был частотно-управляемый электробур, исследования которого были начаты в республике еще в 1952 г. Важные выводы теоретических исследований частотного регулирования электробура были использованы на практике.

Многолетние исследования позволили разработать общую теорию переходных процессов в системах частотно-регулируемых электроприводов с автономным инвертором напряжения. Проведены исследования по оптимальному управлению таких систем при минимизации потерь в двигателе и по быстродействию системы. Разработанные методы анализа и синтеза были использованы при создании электроприводов погружных центробежных насосов, прессов и частотно-регулируемого электропривода электромотоцикла.

На основе использования теории импульсных систем и дискретного преобразования Лапласа были предложены новые методы анализа и синтеза в системах электроприводов с распределенными параметрами.

Проводились исследования систем современных нефтебуровых установок с синхронными двигателями малой мощности, а также работы по разработке и исследованию систем регулируемых электроприводов для механизмов нефтяной промышленности с автономным питанием.

Республиканскими учеными разработаны современные виды электрооборудования. Многие из них серийно выпускаются и применяются в нефтяной про-

мышленности. Индукционные муфты и тормоза являются средствами для плавного пуска и торможения силовых механизмов. Они применяются на буровых установках, выпускаемых, в частности, Уралмашза- водом.

Разработаны комплексные устройства для электро-снабжения установок добычи и бурения. Комплект-ные трансформаторные подстанции для кустовых и одиночных скважин выпускаются на Украине и в Бе-лоруссии.

Созданы новые электроприводы и аппаратура управления для нефтяных скважин, эксплуатируемых штанговыми глубинными насосами и погружными центробежными насосами. Большая работа проведена в области вентильных двигателей, допускающих плав-ное регулирование частоты вращения. Использование вентильных двигателей позволяет унифицировать электропривод главных механизмов буровых устано-вок и повысить их эффективность. В области преоб-разовательной техники разработаны пусковые устрой-ства для самолетов и вертолетов, выпускаемые в Эстонии.

До великой Отечественной войны в Азербайджане фактически не было электротехнической промышлен-ности. Первый крупный объект Бакинской электро-машиностроительный завод им. 50-летия Комсомола Азербайджана, был основан в 1946 г. и специализи-ровался на выпуске электродвигателей переменного тока. На базе этого завода ныне создано производст-венное объединение «Азербэлектромаш», в состав ко-торого вошли два завода и институт.

Для обеспечения высокого технического уровня производства и выпускаемой продукции новые произ-водственные мощности создаются на базе высоко-производительного автоматического и механизирован-ного оборудования. Введены в эксплуатацию комплексно-автоматизированные линии для обработ-ки элементов машин, сборки станин, валов, испытан-ий двигателей. Широкое внедрение современных средств автоматизации, комплексно-механизированно-

го оборудования позволили существенно увеличить выпуск электродвигателей. При этом за сравнительно короткое время значительно поднят удельный вес продукции высшей категории — более половины ма-шин выпускается со Знаком качества.

В 1972 г. было принято решение об организации в Советском Союзе массового производства бытовых кондиционеров. Местом строительства завода был вы-бран Баку. Бакинский завод бытовых кондиционе-ров — предприятие с полным технологическим цик-лом, объединяющее комплекс процессов сборки кондиционеров, компрессоров, теплообменников, элек-тродвигателей и др. На заводе действует АСУП с при-менением ЭВМ. Особое внимание уделено подбору и подготовке кадров, в чем большую помощь оказали заводу многие передовые предприятия страны. Завод выпускает продукцию на уровне лучших мировых об-разцов.

В 1978 г. Л. И. Брежнев посетил завод и в книге почетных гостей оставил запись: «Бакинский завод бытовых кондиционеров может служить образцом предприятия высокой культуры производства, под-линного внимания к человеку труда, его нуждам и запросам».

Одним из крупных предприятий в республике явля-ется «Азербэлектротерм», выпускающий широкий ас-сортимент термического оборудования — плавильные печи, сварочную аппаратуру, электротермическое оборудование. Можно с уверенностью сказать, что это предприятие при полном освоении производствен-ной мощности в ближайшие годы станет одним из лучших в Европе.

Кроме перечисленных объединений и заводов, в настоящее время успешно работают и другие элек-тротехнические предприятия в Баку, Нахичевани, Мингечауре, Степанокерте.

Работники энергетики и электротехнической про-мышленности Советского Азербайджана встречают 60-летие СССР успехами в науке и производстве.

## ЛИТОВСКАЯ ССР

Первые шаги Советской власти в Литве привели к знаменательным социально-экономическим пере-устройством. Заметно оживилась деятельность про-мышленности, наметились первые конкретные шаги в развитии электрификации, научных исследований. Уже в 1941 г. была основана Академия наук Литов-ской ССР.

Фашистская оккупация оставила почти полностью разрушенным электроэнергетическое хозяйство и при-мерно одну треть бывшей промышленности. Молодая советская республика вместе со всем советским на-родом приступила к залечиванию нанесенных войной ран, развитию экономики. В 1945 г. возрождается завод сухих элементов «Сириус», в 1948 г. первую продукцию выдал завод электродвигателей малой мощности «Эльфа», который уже в 1950 г. начал выпускать асинхронные двигатели собственной кон-струкции (в начале этого года с конвейера завода сошел 50-миллионный двигатель).

В 1950 г. с помощью братских республик Литов-ская ССР достигла довоенного уровня установленной мощности электрических станций, а производство

электроэнергии увеличилось почти вдвое. Начинается создание новых отраслей промышленности, коллекти-вируется сельское хозяйство. Для удовлетворения ожидаемого спроса на инженеров-электриков в 1947 г. в Каунасском государственном университете органи-зуется электротехнический факультет, и здесь необхо-димо отметить большие заслуги первого декана фа-культета, а затем первого ректора Каунасского поли-технического института проф. К. М. Баршаускаса.

Для расширения научно-исследовательских работ в 1948 г. организуется Институт технических наук АН ЛитССР. В своих первых работах по энергетике и электрификации институт основное внимание уделил рациональному обеспечению энергией сельского хо-зяйства республики, перешедшего на новый путь раз-вития. Годом рождения Вильнюсского завода электро-сварочного оборудования принято считать 1954 г., несмотря на то, что на выпуск сварочного оборудова-ния он почти полностью перешел только после 1956 г. В конце 50-х годов в строй вступили еще шесть электротехнических заводов. Одновременно росла мощность и республиканской энергетической системы.

В 1957 г. все коммунальные и сельские электростанции переходят в ведомственное подчинение. Быстро растет сетевое хозяйство республики, и в 1964 г. последний колхоз присоединяется к системным сетям. Вопросы эффективного применения электрической энергии в сельскохозяйственном производстве исследуются с 1956 г. в республиканском Институте механизации и электрификации сельского хозяйства.

Рациональным развитием высоковольтных электрических сетей республики и методами их оптимизации занимаются под руководством акад. АН ЛитССР И. Б. Моцкуса ученые Института энергетики и электротехники АН ЛитССР, созданного в 1956 г. На факультете механизации (позже электрификации) Литовской сельскохозяйственной академии до сего времени подготовлены сотни инженеров-электриков. Необходимые кадры техников-электриков выпускают 11 политехникумов в Каунасе, Вильнюсе, Шяуляе, Клайпеде.

Не снижала темпов развития электротехническая промышленность Литвы. Вильнюсский завод электросварочного оборудования выпускает сегодня более половины всех изготавливаемых в нашей стране сварочных агрегатов и выпрямителей и почти половину сварочных преобразователей. Число двигателей, выпускаемых электротехническими заводами республики, в этом году должно превысить 5 миллионов. В республике созданы производственные объединения по выпуску двигателей малой мощности «Эльфа» (1967 г.) и сварочного оборудования «Электросвар» (1976 г.).

В 1961 г. СКБ при ВЗЭСО реорганизуется в Вильнюсское отделение Всесоюзного научно-исследовательского института электросварочного оборудования и становится головным предприятием по машинным источникам питания электросварочной дуги. Наиболее значимым достижением в его новых разработках является первый в нашей стране бесколлекторный сварочный агрегат, выпускаемый не только ВЗЭСО, но и другими заводами МЭТП.

Конструкторский отдел завода «Эльфа» в 1960 г. реорганизуется в СКТБ при заводе. В 1979 г. это бюро становится Вильнюсским отделением Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института малых электромашин (ВНИИМЭМ). Активное участие в разработке новых конструкций электрических двигателей малой мощности принимают также научные работники Каунасского политехнического и Вильнюсского инженерно-строительного институтов. Московский энергетический, Львовский политехнический институты и некоторые другие вузы и НИИ нашей страны оказали Литовской ССР большую помощь в подготовке высококвалифицированных научных кадров в области электрических машин малой мощности. Это способствовало формированию республиканской школы в области расчетов и проектирования явнополюсных асинхронных двигателей малой мощности; был достигнут определенный успех в конструировании и внедрении в производство новых конструкций микродвигателей.

Одновременно с ростом потребления электроэнергии в промышленности и сельском хозяйстве расширялась электрификация быта, коммунального хозяйства. В 1956 г. в Вильнюсе началось первое в республике троллейбусное движение. Возросли требования

к надежности и экономичности электроснабжения. В 1964 г. установились надежные связи Литовской энергетической системы в Латвийской и Белорусской. Для решения всех усложняющихся проблем, связанных с управлением и дальнейшим развитием всего энергетического хозяйства республики, в 1966 г. на базе Института энергетики и электротехники был создан Институт физико-технических проблем энергетики. В его научной деятельности можно выделить следующие три основных направления: теплофизика, техническая кибернетика и комплексные энергетические проблемы.

По второму направлению наибольший интерес представляет исследование методов управления электрическими системами при неполной информации, идентификация и оценивание процессов в электрических сетях. Руководит этими работами чл.-корр. АН ЛитССР А. А. Немура.

Глубокие корни научных исследований в республике имеет электрохимия. Эти исследования при советской власти переросли в теорию электроосаждения металлов и сплавов, в создание усовершенствованных технологий гальванических и химических покрытий. Достижения в этой области позволяют говорить о возникновении литовской электрохимической школы, основателем и руководителем которой является Президент АН ЛитССР, чл.-корр. АН СССР Ю. Ю. Матулис.

Заслуженной известностью пользуется Институт электрографии, основанный в 1957 г. Он является центром электрографических исследований в СССР. В этих исследованиях активное участие принимают и научные работники Вильнюсского государственного университета им. В. Капсукаса.

Широкий круг научно-исследовательских работ в области электротехники и энергетики ведется и в Каунасском политехническом институте им. А. Снечкуса. Кроме уже упомянутых исследований в области электродвигателей малой мощности, на кафедре электросистем проводятся работы по оптимизации электроэнергетических систем и их режимов, разработке и изготовлению универсальных статических моделей электросистем постоянного тока. На других кафедрах исследуются новые системы электропривода, совершенствуются осветительные установки, разрабатываются теоретические основы и создаются контрольно-измерительные и энергетические устройства на основе преобразования электромагнитных величин. Следует отметить плодотворную научную деятельность таких преподавателей и научных работников КПИ, как бывший заведующий кафедрой электрических систем проф. Л. И. Каулакис, бывший заведующий кафедрой электрических машин проф. П. А. Баскутис и нынешний ее руководитель проф. П. И. Костраускас.

В XI пятилетке научных работников и инженеров электротехнической промышленности республики ждут сложные и ответственные задачи — не только повысить технические характеристики выпускаемой продукции, но также поднять уровень ее технологичности, еще больше снизить показатели материалоемкости. Настоящая XI пятилетка поставила важную задачу и перед электроэнергетиками республики — увеличить производство электрической энергии более чем в 2 раза. Кроме намеченного планом ввода в эксплуатацию первой очереди Игналинской АЭС, необ-

ходимо будет обеспечить как для ее блоков, так и для крупных блоков Литовской ГРЭС экономичную бесперебойную работу. Для этого с меньшими темпами идет строительство Кайшиядорской ГАЭС, подготавливается создание мощных потребителей-регуляторов в сельском хозяйстве. Последнее мероприятие также будет способствовать и более быстрому осу-

ществлению Продовольственной программы СССР. Успешному решению перечисленных выше задач несомненно будет способствовать принятое в 1981 г. ЦК Коммунистической партии Литвы и Советом Министров ЛитССР постановление «О разработке комплексной программы научно-технического прогресса ЛитССР на 1986—2005 годы (по пятилеткам)».

## МОЛДАВСКАЯ ССР

Молдавия позже всех вошла в состав Советского Союза, не имея практически ни энергетической базы, ни промышленности. Мощность всех ее электростанций составляла меньше 1 тыс. кВт. К 1941 г. мощность электростанций составила уже 12,5 тыс. кВт, но война полностью разрушила народное хозяйство Молдавии, в том числе и ее энергетику.

В 50-х годах развернулось интенсивное строительство электростанций и объединение их в единую энергосистему. Общая мощность Молдавских электростанций к 1975 г. составила 2158,4 МВт. Высокими темпами шло развитие электрических сетей, формирование Молдавской энергосистемы — в основном на базе ЛЭП 110 кВ; с 1964 г. появились ЛЭП 220 кВ, с 1968 г. — ЛЭП 330 кВ. В 1972 г. была сооружена ЛЭП 400 кВ, по которой осуществляется экспорт электроэнергии в Народную Республику Болгарию. В 1967 г. к сетям энергосистемы были подключены все колхозы и совхозы, в 1970 г. к столетию со дня рождения В. И. Ленина была завершена полная электрификация всей МССР.

В XI пятилетке предполагается ежегодное увеличение электропотребления в республике высокими темпами — в среднем на 5%. Для осуществления этой программы намечается расширение ряда станций, прорабатываются варианты усиления связей с энергосистемой юга Украины.

Наращивание генерирующих мощностей после 1990 г. предполагается осуществить путем сооружения на территории МССР мощной атомной электростанции. Одна из основных идей развития народного хозяйства МССР в настоящее время состоит в осуществлении значительно более полного, чем раньше, использования благоприятных природно-климатических условий Молдавии для значительного повышения урожая фруктов, овощей и зерновых культур, что, в свою очередь, позволит резко повысить продукцию животноводства, виноделия, консервной промышленности. Эта идея может быть осуществлена только при значительном увеличении доли орошаемых земель, особенно южной части республики за счет использования водных ресурсов Дуная.

Своевременное наращивание генерирующих мощностей в МССР в предыдущие годы обеспечило динамическое развитие основных отраслей народного хозяйства, в том числе электротехнической и приборостроительной. Их интенсивное развитие было определено на VIII съезде Коммунистической партии Молдавии.

В соответствии с этими решениями в Молдавии созданы либо существенно расширены и реорганизованы ранее построенные заводы по производству самой различной электротехнической продукции в Кишиневе, Тирасполе, Бендерах, Бельцах.

До революции в Молдавии вообще не было ни

одного ни научно-исследовательского, ни высшего учебного заведения. В 1930 г. в «левобережной» части Молдавии (Молдавской автономной ССР) были открыты Плодоовощной и Педагогический институты в Тирасполе, в 1939 г. — Учительский институт в Балте, в 1940 г. — Сельскохозяйственный институт в Кишиневе.

Интенсивное развитие науки в Молдавии получила после окончания Великой Отечественной войны. Уже в 1945—1946 гг. создаются Государственный университет и Медицинский институт в Кишиневе, Учительский институт в Бельцах и другие учебные заведения, в которых велись также и научные исследования в различных отраслях знаний; в 1946 г. в республике работали 7 вузов и 32 техникума.

Важным событием явилось создание в 1946 г. Молдавской базы Академии наук СССР (директор — вице-президент АН СССР акад. В. П. Волгин), преобразованной вначале (1949 г.) в Молдавский филиал АН СССР (первый председатель — чл.-корр. АН СССР П. А. Баранов, затем проф. Я. С. Гросул), а затем (1961 г.) в Академию наук МССР (первый президент — чл.-корр. АН СССР Я. С. Гросул), затем тем чл.-корр. АН СССР А. А. Жученко). В настоящее время в ней 20 научно-исследовательских учреждений, в том числе два из них имеют прямое отношение к исследованиям в области электротехники и электроэнергетики: Отдел энергетической кибернетики (на правах института) и частично Институт прикладной физики.

Вначале в Отделе (с 1958 по 1982 г. чл.-корр. АН МССР Г. В. Чалый, с 1982 г. — канд. техн. наук В. М. Постолатий) проводились исследовательские работы, непосредственно связанные с энергетикой Молдавии того времени; с годами тематика исследований претерпела ряд существенных изменений. Отдел вел сам и курировал комплексные исследования более чем 50 организаций страны по проблеме повышения частоты промышленного переменного тока и приводил ряд других работ.

Исследования по оптимизации структуры и режимов энергосистем, проводившиеся вначале применительно к развивавшейся Молдавской энергосистеме, значительно расширились и развились в разработку алгоритмических проблем оптимального управления режимами энергосистем и их элементами. В творческом содружестве с ЭНИН и Энергосетьпроект был создан комплекс высокоэффективных алгоритмов и программ оптимизации режимов энергосистем с учетом потерь в электрических сетях, ограничений по петокам мощности и по водному балансу. Был создан и внедрен на Молдавской ГРЭС программный комплекс оптимизации режима мощной тепловой электростанции по минимуму расхода топлива с опти-

мальным распределением нагрузки между энергоблоками и выбором наиболее выгодного состава работающих агрегатов. Разработана и внедрена программа эквивалентирования сложных электрических сетей. Создается программный комплекс оптимального планирования сроков ремонта основного генерирующего оборудования электростанций с учетом основных эксплуатационных ограничений, имеющегося резерва, ремонтных возможностей и др.

Сотрудниками Отдела совместно с кафедрой электрических систем МЭИ разработаны новые — самокомпенсирующиеся — управляемые высоковольтные ЛЭП переменного тока, обладающие повышенной пропускной способностью и уменьшенным экологическим влиянием; выполнен комплекс теоретических и экспериментальных работ по исследованию параметров, характеристик, режимов и технико-экономических показателей таких линий.

По заданию Министерства электротехнической промышленности в ОЭК ведутся успешные исследования, направленные на повышение эффективности использования конденсаторов в электротехнических и электронных устройствах, работающих при существенно несинусоидальных напряжениях и токах разной формы, в частности, в различных силовых полупроводниковых преобразователях. Результаты исследований позволили разработать практические рекомендации по оптимальному выбору конденсаторов для конкретных установок.

В Отделе разработаны основные элементы теории автоматизированных частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с питанием от полупроводниковых преобразователей, создана методика расчетов оптимальных по быстродействию переходных процессов в таких приводах.

Предложены и исследованы новые оригинальные способы формирования, регулирования и стабилизации выходного сигнала автономных инверторов регулируемых полупроводниковых преобразователей; созданы, изготовлены и исследованы тиристорные и транзисторные преобразователи. Разработана и внедрена на предприятиях электротехнической промышленности система автоматизированного синтеза асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт общего и специального назначения.

С целью автоматизации исследований в области полупроводниковых электроприводов создан оригинальный аналого-цифровой (гибридный) вычислительный комплекс, программно-ориентированный на исследование динамики машинно-вентильных систем, имеющих большое количество дискретных и других существенно нелинейных элементов.

Одна из основных задач ученых ОЭК на ближайшую перспективу — разработка научных основ генерального плана оптимального развития республикан-

ской энергосистемы с учетом перспектив развития основных отраслей народного хозяйства.

Среди научно-исследовательских работ Института прикладной физики АН МССР (акад. АН МССР [Б. Р. Лазаренко], чл.-корр. АН МССР М. К. Болога) — разработка новых применений электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве. К их числу могут быть отнесены, в первую очередь, исследования в области электроискровой обработки металлов, завершившиеся широким внедрением соответствующих установок.

Успешно разрабатываются и внедряются эффективные методы и способы электрохимической размерной обработки и гальванопокрытий — для ремонта и восстановления деталей машин, в том числе сельскохозяйственных, для электрофлотации, электроплазмолиза и электросепарации, позволяющих существенно интенсифицировать технологические процессы переработки растительного сырья и пищевых продуктов и резко увеличивающих выход конечных продуктов.

Следует также отметить исследования по изучению электрической природы кавитации и влияния электрических полей на протекание процессов тепло- и массообмена, позволивших разработать ряд важных рекомендаций по защите различных промышленных объектов от кавитационной эрозии и существенной интенсификации теплоотдачи и др.

Исследования, запланированные в институте на XI пятилетку, направлены, в первую очередь, на расширение возможностей применения электрической энергии для решения основных проблем развития аграрно-промышленного комплекса республики.

В 1964 г. был создан Кишиневский политехнический институт, среди факультетов которого в настоящее время работают энергетический с кафедрами электрических сетей и систем, электрических машин и аппаратов, электроснабжения промышленных предприятий и городов, электрификации сельского хозяйства и электропривода, а также электрофизический факультет с кафедрами конструирования и производства электронно-вычислительной и радиоаппаратуры, эксплуатации ЭВМ, автоматики и телемеханики. Все эти кафедры, помимо учебной, ведут и значительные научно-исследовательские работы в области электроэнергетики, электротехники и электроники.

Большую помощь в подготовке кадров для энергетики и электропромышленности республики оказывает Кишиневский электромеханический техникум. Энергетики и электротехники МССР работают в постоянном творческом содружестве с ведущими научно-исследовательскими и учебными институтами страны, активно участвуют в развитии науки и техники Советского Союза.

## ЛАТВИЙСКАЯ ССР

В буржуазной Латвии электротехническая наука серьезного развития не получила. Это связано с упадком промышленного производства после первой мировой войны и ничтожным количеством выпускаемых университетом инженеров-электриков (около десяти человек в год). В составе преподавателей был один профессор (приглашенный из Германии) и несколько

доцентов. Их творческая работа выражалась в публикации научно-популярных статей, особенно по радиотехнике, и участием в разработке проектов небольших местных электростанций, подстанций и сетей.

Стремительное развитие электротехнической науки в Латвийской ССР началось после организации Физико-технического института АН ЛатвССР (1946 г.).

Руководителем института долгие годы был президент АН ЛатвССР К. Плауде, в настоящее время институтом руководит академик АН ЛатвССР А. Крогерис.

Первые исследования были посвящены развитию энергетики республики и оптимальному использованию энергоресурсов. В результате этих исследований (К. Плауде, Ю. Мазур) повышена мощность каскада гидроэлектростанций Даугавы, в сельских сетях введено экономически выгодное напряжение 20 кВ и разработан ряд других экономически эффективных рекомендаций.

Вторым основным научным направлением института является исследование магнитных полей в электрических машинах. Разработана теория и оригинальные конструкции бесконтактных электрических машин. Созданы бесконтактные генераторы постоянного тока для транспортных средств, на железных дорогах страны внедрена новая система энергоснабжения пассажирских вагонов. Разработками руководили академик АН ЛатвССР Э. Якубайтис, член-корр. АН ЛатвССР В. Апсит, проф. Г. Штурман, проф. В. Куцевалов.

Исследования в области физики полупроводников и теории полупроводниковых приборов проводятся под руководством А. Крогериса.

В электротехнике используются также некоторые разработки Института физики АН ЛатвССР. Институт является ведущим в области магнитогидродинамики; на основе его исследований разработан целый ряд электромагнитных насосов для проводящих жидкостей, в том числе для расплавленных металлов (академик АН ЛатвССР И. Кирно, член-корр. АН ЛатвССР Я. Лиелпетерис). При институте работает специальное конструкторское бюро, занимающееся разработкой и внедрением в промышленность магнитогидродинамических машин и приборов.

Решением проблем прикладного характера заняты отраслевые институты и некоторые подразделения академии. Например, в институте механики полимеров под руководством проф. И. Матиса создана серия приборов для неразрушающего контроля свойств полимерных материалов и изделий.

Вторым научным центром электротехники в республике является восстановленный в 1958 г. Риж-

ский политехнический институт, который в настоящее время стал самым большим вузом Прибалтики. На базе двух небольших электротехнических кафедр Латвийского государственного университета в течение нескольких лет было создано три факультета: электроэнергетический, автоматики и вычислительной техники, радиотехники и электросвязи. Выпуск специалистов одного энергетического факультета (около 200 человек в год) больше, чем в университете по всем специальностям, вместе взятым.

Плодотворно работает проблемная лаборатория электроэнергетического факультета (организатор и долгие годы руководитель проф. В. Фабрикант), ряд разработок которой внедрен и принят к серийному производству. На кафедре теоретической электротехники (заведующий проф. К. Табакс) разработаны методы исследования и моделирования электромагнитных и температурных полей в электрических машинах и аппаратах. Широко проводятся научные исследования также на других кафедрах и факультетах института.

В республике издаются всесоюзный журнал «Магнитная гидродинамика», «Известия АН ЛатвССР. Серия физических и технических наук», периодические сборники статей «Электромеханика», «Электрические машины», а также большое количество монографий, учебников и учебных пособий в области электротехники.

Очень большое значение в развитии науки в республике имеет помощь вузов и научных организаций братских республик. Важную роль в подготовке научных кадров и выборе научных направлений в электротехнике сыграла помощь Московского энергетического института, Ленинградского политехнического института, Энергетического института им. Г. М. Кржижановского и других научных и учебных учреждений.

Расцвет электротехнической науки в республике вызван восстановлением советской власти в Латвии и бурным развитием ее промышленности. Встречая славную годовщину создания Советского государства, научные работники и инженеры-электротехники готовы приложить все силы для дальнейшего развития народного хозяйства страны.

## КИРГИЗСКАЯ ССР

До Великой Октябрьской социалистической революции в Киргизстане не было ни одного научного учреждения, ни одного высшего и среднего специального учебного заведения. Ныне в республике насчитывается свыше 7100 научных работников, в том числе более 200 докторов и 2200 кандидатов наук (1977 г.), развернуты широкие научно-исследовательские работы по различным направлениям электротехники. Научной базой в основном являются Киргизский научно-исследовательский отдел энергетики (КирНИОЭ), Всесоюзный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации мелиоративных систем (ВНИИКАМС), энергетический факультет Фрунзенского политехнического института (ФПИ), Институт автоматики АН Киргизской ССР, Научно-исследовательский институт электромашиностроения (НИИЭМ) и другие.

2—286

В январе 1953 г. в составе Киргизского филиала АН СССР был организован Институт водного хозяйства и энергетики, вошедший затем как Институт энергетики и водного хозяйства в Академию наук Киргизской ССР, созданную в 1954 г. От этого института, поле его реорганизации в 1963 г., ведут свое начало успешно работающие ныне в Киргизии два научно-исследовательских подразделения: ВНИИКАМС и КирНИОЭ. В свою очередь, созданию Института энергетики и водного хозяйства (ИЭВХ) АН Киргизской ССР предшествовал подготовительный этап, начавшийся в 1946 г. организацией при Президиуме Киргизского филиала АН СССР (КирФАН) сектора водного хозяйства (рук. С. В. Семенов, М. Н. Большаков), в котором начались первые исследования в области сельской электрификации республики.

Первые энергетические исследования, проведенные в КирФАН, позволили оценить энергетические ресурсы малых рек Киргизии и наметить пути их использования для электрификации сельского хозяйства республики. Основным практический результат этих исследований — внедрение в сельских районах Киргизии местных энергетических систем — в течение ряда лет давал определенный экономический эффект.

Начиная с 1955 г. в тематике энергетических лабораторий ИЭВХ ведущую роль стали играть вопросы комплексного использования основных водных и топливных ресурсов республики. Серьезные работы по оптимизации топливно-энергетического баланса Киргизской ССР провел к. т. н. И. С. Колосов. В то же время была развернута программа исследований с целью выяснения влияния геофизических условий высокогорья на электрические и механические характеристики горных электропередач большой мощности.

К 1960 г. в ИЭВХ (В. С. Луговой, С. С. Панков) с помощью НИИПТ было обосновано и в дальнейшем развито новое техническое направление — горные электропередачи постоянного тока. В дальнейшем после реорганизации ИЭВХ в 1963 г. и образования КирНИОЭ интенсивное развитие получили исследования климатических параметров гололедных и ветровых нагрузок на ЛЭП, вопросы их механической прочности (О. А. Подрезов). В КирНИОЭ сложились следующие основные направления научных исследований: изучение перспектив развития энергетики Киргизии и путей использования ее энергоресурсов, изучение вопросов, связанных со строительством высокогорных ЛЭП, разработка методов обеспечения оптимальной надежности элементов энергосистем; разработка научных основ электрификации сельского хозяйства в условиях горной Киргизии.

ВНИИКАМС, являющийся ведущей научно-исследовательской организацией в Союзе по вопросу автоматизации гидромелиоративных систем, определил основные концепции автоматизации мелиоративных систем, разработал базовые алгоритмы управления технологическими процессами водозабора и водораспределения, пакеты прикладных программ для решения наиболее важных задач мелиорации. Были разработаны автоматическая система планирования и оперативного перераспределения воды с применением ЭВМ, микропроцессорный регулятор для управления подкачивающими насосами оросительных систем типа «Фрегат». Институтом сделано немало для внедрения результатов научных исследований в производство. Так, внедрена АСУ пуска воды из водохранилища Орто-Токой, автоматизирован и телемеханизирован восточный Большой Чуйский канал (БЧК), сдается в эксплуатацию АСУ ТП на Чумышской плотине, разработан проект АСУ западным БЧК. На базе ВНИИКАМС в 1977 г. было создано Всесоюзное научно-производственное объединение «Союзавтоматика». В составе этого НПО образован проектно-технологический институт, в котором исследуются вопросы электроснабжения рассредоточенных потребителей на объектах ирригации и отгонного животноводства (рук. к. т. н. Токомбаев К. А.).

Институт автоматики АН КиргССР, созданный в 1960 г., разработал метод централизованного контроля и управления оросительными системами, а также ряд теоретических вопросов гидродинамики и ее принципов, уплотнения телемеханических каналов

связи. В этом институте создан ряд устройств телемеханики на бесконтактных элементах, различные автоматические универсальные регуляторы уровней и расхода воды. Проводились также работы по автоматизации добычи нефти в условиях Киргизии, по комплексной автоматизации ртутно-сурьмяного производства с применением системы экстремального и оптимального регулирования производственного процесса и разработкой ряда неконтактных методов автоматического контроля технологических параметров. Велись исследования по изысканию новых методов автоматического контроля различных физических параметров и отдельных измерительных узлов и преобразователей.

Большую роль в формировании научного профиля института в период его становления сыграл академик АН КиргССР Н. Н. Шумиловский. С именем академика АН КиргССР Ю. Е. Неболюбова связано развитие направления, ставшего одним из основных: разработка и создание АСУ ТП промышленности строительных материалов. Следует отметить работы академика АН КиргССР Э. Ж. Маковского и чл.-корр. АН КиргССР В. П. Живоглядова.

Энергетический факультет ФПИ создан в 1957 г. На факультете ведутся научно-исследовательские работы согласно профилю кафедр: электрические станции, сети и системы; электроснабжение промпредприятий и городов; электропривод и автоматизация пром-установок; автоматика и телемеханика; электрические машины и аппараты; ЭВМ; вычислительная техника и АСУ; электроника, теоретические основы электротехники и общая электротехника.

Наиболее значительным являются работы, проводимые под руководством д. т. н. А. А. Акаева в области создания нового поколения ЭВМ — когерентных оптических вычислительных машин. Работы проводятся совместно с ЛИТМО. Следует также отметить работы, проводимые на кафедре автоматики и телемеханики под руководством доцента к. т. н. Ж. Ш. Шаршеналиева по разработке теории и определению оптимальных алгоритмов управления для некоторого класса автоматических систем управления.

Исследования по разработке методов расчета электрических полей проводит кафедра ТОЭ и ОЭ (к. т. н. И. М. Грач). Вопросами создания более точных измерительных приборов занимается к. т. н. Н. А. Филиппов, разработкой методов проектирования дискретных логических устройств с помощью графов — к. т. н. В. В. Образцов. Создание новых технических средств автоматики и развитие методов обеспечения их надежности является темой исследований, проводимых под руководством к. т. н. В. М. Журавлева. Нужно отметить работы по созданию теории и методики расчета двухроторных асинхронных двигателей (к. т. н. В. Н. Цой, к. т. н. М. Н. Филатов).

Исследования по использованию гидроэнергоресурсов и повышению эффективности работы энергосистемы Киргизии ведутся на кафедре электрических станций, сетей и систем (рук. к. т. н. К. Р. Рахимов).

НИИЭМ первоначально был создан в 1961 г. как Фрунзенский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики. Основные направления этого института — теоретические исследования, расчет и разработка новых конструкций электрических машин малой мощности общепромышленного и бытового назначения, разработка новых тех-

нологических процессов производства электрических машин. Институтом разработаны серии коллекторных электродвигателей малой мощности, однофазные асинхронные электродвигатели малой мощности, проведена большая работа по повышению их качества и надежности (рук. к. т. н. К. А. Алымкулов).

Электротехнические предприятия Киргизской республики изготавливают и поставляют народному хозяйству полупроводниковые приборы, провода и кабельные изделия, электродвигатели малой мощности, крупные электрические машины, электрические лам-

пы и специальное технологическое оборудование для их производства, электроизоляционные материалы, электрические приборы быта. В составе электротехнической промышленности республики насчитывается шесть самостоятельных заводов, одно производственное объединение. Ученые вузов и НИИ, работники электротехнической промышленности и энергетики Советской Киргизии вносят достойный вклад в сокровищницу достижений всей советской науки и техники, в укрепление могущества Союза Советских Социалистических республик.

## АРМЯНСКАЯ ССР

К моменту образования СССР в 1922 г. производство электроэнергии в Армении составляло около 10 тыс. кВт·ч (в 1981 г. — 14,3 млрд. кВт·ч). Мощность всех электростанций была 2 тыс. кВт (3,55 млрд. кВт в 1979 г.). Численность населения АрмССР на конец 1925 г. равнялась 720 тыс. чел. (3074 тыс. чел. в 1980 г.).

К 1924 г. в АрмССР действовали семь гидроэлектростанций: Аллавердская, Зангезурская, Ереванские (две станции), Шагалахская, Дилижанская, Степанаванская; в июне 1927 г. было принято решение о строительстве Дзорагетской ГЭС. В довоенные годы были построены и введены в эксплуатацию гидроэлектростанции на ряде мелких и средних по дебиту рек, такие как: Иджеванская, Мегринская, Шакинская. Сооружена Канакерская ГЭС на р. Раздан, четыре агрегата которой были пущены в декабре 1936 г. С этой станции начато было строительство ГЭС Севано-Разданского каскада: Севанской (1949 г.), Гюмушской (1953 г.), Арзнинской (1957 г.), Атарбекянской (1959 г.), Ереванской (1962 г.).

В августе 1961 г. ученые и инженеры республики приняли решение о переброске части стока р. Арпа в озеро Севан с целью сохранения его уровня на отметке, близкой к естественным условиям. С 1963 г. начала строиться Ереванская ТЭЦ, мощность которой в 1966 г. достигла 550 тыс. кВт. В 1965 г. попуски воды из оз. Севан были снижены почти в три раза и 3/4 этих попусков определялись ирригационно-энергетическими нуждами. В этом же году начала строиться Кироваканская ТЭЦ, в 1966 г. построена Разданская тепловая электростанция (ГРЭС и ТЭЦ), в 1970 г. пущена Татевская ГЭС, представляющая третью станцию Воротанского каскада ГЭС; Шамбская ГЭС этого каскада пущена в 1978 г. В 1979 г. завершено строительство Армянской атомной электростанции.

В связи с отсутствием в АрмССР ископаемых видов топлива предстоит решить серьезные задачи развития генерируемой мощности Армянской энергосистемы.

Научные исследования в области электроэнергетики в республике представлены в следующих разделах: моделирование электроэнергетических систем; теория и методы расчета электрических систем; расчеты установившихся режимов сложных электроэнергетических систем; их оптимизация, дальние линии электропередачи; переходные процессы; электрическая технология.

2\*

Разработана теория многополюсника, и ее приложения к методам расчета установившихся режимов системы представляются множествами: генераторных, нагрузочных, сетевых узлов и ветвей.

Большой цикл исследований был посвящен методам решения уравнений установившихся режимов сложных электрических систем. Были разработаны алгоритмы и программа определения структуры расхода мощности и энергии в сетях энергосистемы напряжением 35 кВ и выше. Программы позволяют определить структуру потерь для каждого сетевого предприятия энергосистемы, что, в свою очередь, дает возможность реализовать различные мероприятия по уменьшению потерь в сетях.

Разработаны методы, алгоритм и программа оптимизации режимов энергосистемы с целью минимизации суммарных затрат на генерацию активной мощности на тепловых станциях, потерь активной мощности в электрических сетях. В этом методе управляющими оптимальным режимом системы принимаются: фазы напряжений тепловых станций, модули напряжений всех узлов с источниками реактивной мощности системы и модули комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов в ветвях системы.

Для обоснования и проектирования межсистемной линии электропередачи Акстафа — Атарбекян на напряжении сначала в 220 кВ, а затем 330 кВ был выполнен большой объем научно-исследовательских работ. В Институте электротехники АН АрмССР были получены экспериментальные данные для выбора проводов высокогорных, высоковольтных линий электропередачи по условиям минимума потерь энергии на корону и расчету годовых потерь энергии на корону.

Результаты этих исследований были использованы не только в проектах ЛЭП Акстафа — Атарбекян, но и в проекте ЛЭП Шинуайр — Атарбекян, обеспечивающей параллельную работу с электростанциями энергосистемы Воротанского каскада ГЭС. В проектах этих ЛЭП было использовано предложение о расщеплении фазы на два провода с целью уменьшения реактивного сопротивления линии и уменьшения потерь энергии на корону. Следует отметить активное участие акад. В. И. Попкова в выполнении этих исследований.

Исследования по потерям мощности и энергии на корону, выполненные на двух экспериментальных участках в Норке и на оз. Севан, были использованы для

соответствующего раздела «Руководящих указаний по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330—750 кВ и постоянного тока 800—1500 кВ».

Исследования потерь мощности на корону были начаты в 1955 г. и завершены в 1970 г. Было исследовано явление короны на 15 типоразмерах проводов с числом расщеплений фазы до четырех проводов применительно к ЛЭП 220—500 кВ. Была разработана методика расчета потерь мощности на корону с учетом изменений давления, температуры, влажности, плотности воздуха.

В НПО «Армсельхозмеханизация» Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения СССР с 1976 г. выполняются исследования электрических явлений в сыпучих средах. Направление исследований в инженерной электрофизике было сформулировано акад. В. И. Попковым в 60-х годах. В объединении выполнены исследования движения диэлектрического и проводящего электричество сыпучих материалов, получено свыше 16 авторских свидетельств на способ дозирования проводящих и полупроводящих материалов; питатель для диэлектрических материалов, дозатор сыпучих материалов и устройство для регулирования соотношения компонентов сыпучих материалов. Показано, что силы взаимодействия между частицами достаточны для осуществления регулирования расхода, дозирования, смешивания и

контроля параметров сыпучих материалов. Указанные технологические процессы основаны на преобразовании малой величины электрической энергии в механическую без потребности движущихся узлов.

Вопросы использования возобновляемых источников энергии в первую очередь решаются для сельского хозяйства страны. Первая Всесоюзная конференция под руководством А. Г. Иосифьяна по электрификации сельского хозяйства была создана Академией наук АрмССР в Ереване в 1949 г. Основная цель конференции состояла в разработке мероприятий по использованию электроэнергии в сельском хозяйстве и, в частности, применения энергии солнца, ветра, малых рек. Электрификация сельского хозяйства АрмССР выполнена на базе использования электроэнергии крупных электроэнергетических систем путем подключения электрических сетей сельскохозяйственных районов к высоковольтным подстанциям.

Из числа советских ученых, оказавших помощь (консультации, подготовка кадров) в развитии научно-исследовательских работ по энергетике в республике, следует отметить: академиков Г. О. Графтио, Ф. Ю. Левинсон-Лесинга, А. В. Винтера, В. И. Попкова, Н. А. Стыриковича; докторов технических наук Г. И. Атабекова, В. А. Веникова, И. М. Марковича, Г. М. Ломидзе, Л. Г. Мамиконянца, М. А. Мосткова, Э. А. Мееровича, А. А. Эфендизаде, А. А. Хачатурова, Г. А. Джимшелейшвили, Г. Н. Тер-Газаряна, Г. П. Забриева и др.

## ЭСТОНСКАЯ ССР

Территория Эстонской ССР была полностью освобождена от фашистских захватчиков 23 ноября 1944 г. Началось энергичное восстановление народного хозяйства, культурных и научных учреждений, школ и высших учебных заведений.

Очагом развития электротехники в Советской Эстонии по праву считается Таллинский политехнический институт, который стал быстро расти в послевоенные годы. В то время сильноточные электротехнические специальности — электрические станции и сети, электрические машины и аппараты — входили в состав механического факультета ТПИ. Малочисленный состав преподавателей электротехнических дисциплин не имел опыта научной работы в современном понимании этого слова. Тем не менее их положительная роль заключается в активном усвоении методов организации учебной работы в советской высшей технической школе, новых для вуза Эстонии. В те годы были изданы впервые на эстонском языке учебники «Теоретические основы электротехники» (Р. Холлман) и «Общая электротехника» (авторский коллектив под руководством Х. Рийкоя), которые, безусловно, содействовали подготовке электротехнических инженерных кадров в республике.

В 1950 г. в ТПИ приступили к работе первые два кандидата технических наук из братских республик — Александр Иванович Вольдек и Сергей Родионович Буачидзе. Воспитанник Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, представитель известной в мире науки школы электромеханики академика М. П. Костенко, носитель научных традиций этой школы, талантливый ученый А. И. Вольдек (1911—1977 гг.) оставил неизгладимый след в разви-

тии электротехники в Эстонии. Он поднял научную работу по электротехнике на соответствующую ее значению высоту, ввел новый стиль преподавания электротехнических дисциплин в ТПИ и энергично направлял молодых специалистов в аспирантуру при вузах братских республик — прежде всего Москвы, Ленинграда, Львова и других городов. Эту помощь вузов страны в становлении электротехнических наук в Советской Эстонии невозможно переоценить. Только благодаря ей сейчас более 80% преподавательского состава электротехнических кафедр ТПИ имеет ученые степени и звания, многие исследовательские коллективы являются полноправными партнерами в выполнении всесоюзных комплексных целевых программ и пользуются заслуженным признанием. А. И. Вольдек предвидел значимость автоматизации, электроники, радиотехники и вычислительной техники и добился введения этих специальностей в ТПИ.

В области сильноточной электротехники направления научной работы в ЭССР связаны с производством, распределением и преобразованием электрической энергии.

Четверть века тому назад появились первые результаты работ по проблемам управления электрическими системами. С 1965 г. начинается использование вероятностных методов для этих целей. Разработанные на базе теоретических исследований энергосистем программы ЦВМ были внедрены в ЕЭС СССР, в Башкирской, Ленинградской, Татарской и Эстонской энергосистемах. Научные работы электроэнергетиков ТПИ относятся к оптимизации нормальных режимов энергосистем и тепловых электростанций, расчету и регулированию установившихся режимов электрических

систем и сетей, математическому моделированию и прогнозированию нагрузок в энергосистемах и управлению аварийными режимами энергосистем. Исследовались разрядные характеристики стеклянных штыревых изоляторов с целью разработки новых типов с повышенной надежностью.

За цикл работ по оптимизации режимов работы больших энергосистем в 1980 г. авторский коллектив под руководством к. т. н. М. Х. Валдма удостоен премии Советской Эстонии.

Развитие энергетики республики на базе крупных тепловых электростанций (Прибалтийская и Эстонская ГРЭС) с использованием горючих сланцев поставило проблему рационального использования электроэнергии, его преобразования в другие виды, главным образом в механическую работу, а также увеличило потребность в специалистах — инженерах по электрическим машинам и автоматизированному электроприводу. Для удовлетворения этой потребности в 1956 г. А. И. Вольдек организовал кафедру электрификации промышленности, а в 1961 г. была создана кафедра электрических машин. В 1956 г. были завершены первые исследования магнитных полей и индуктивностей лобовых частей обмоток электрических машин, которые заложили основы школы электромехаников в ЭССР.

В 1954 г. в ТПИ начато изучение проблем прикладной магнитной гидродинамики и ее приложений к задачам преобразования энергии для нужд металлургии и литейного производства. Был заложен фундамент теории индукционных магнитогидродинамических машин с жидкометаллическим рабочим телом. С самого начала эти исследования проводились в тесном сотрудничестве с учеными Института физики Академии наук ЛатвССР. Затем к этим работам присоединились многочисленные научные учреждения страны. На базе уравнений Максвелла для медленно движущихся проводящих сред исследованы магнитные поля линейных индукционных машин конечных размеров, задачи компенсации пульсирующего магнитного поля, электромагнитные процессы во вторичной среде индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом, схемы их замещения и краевые задачи в таких машинах.

К настоящему времени возникла проблема создания специального линейных электроприводов двухцелевого назначения, МГД- и линейных приводов для манипуляторов и многокоординатных электроприводов.

В 1967 г. за разработку устройств для перемещения жидких металлов авторский коллектив во главе с А. И. Вольдеком был удостоен премии Советской Эстонии.

Различные электротехнические задачи из области МГД-техники стали объектом исследования в Научно-исследовательском электротехническом институте (ныне НИИТЭЗ) Министерства электротехнической промышленности СССР, в котором А. И. Вольдек руководил научной работой со времени его организации. В этом институте разработаны различные варианты винтовых электромагнитных насосов и их теория, проведены исследования современных полупроводниковых преобразователей.

Была разработана теория магнитных полей электромагнитных преобразователей расхода, заложена основа теории электромагнитных измерителей локаль-

ной скорости с обращенным магнитным полем, созданы методы расчета метрологических показателей расходомерных установок.

Результаты этих работ стали внедряться в производство.

К началу 60-х годов появилась возможность внедрения в практику результатов научных исследований, разработки комплекса устройств, обеспечивающих работу МГД-двигателей в весьма тяжелых производственных условиях. Актуальными стали задачи управления МГД-техникой, т. е. задачи автоматизированного МГД-привода, требующие системного подхода, математического описания статических и динамических режимов работы с тем, чтобы приблизить степень его разработки к уровню теории классического электропривода. Были получены уравнения гидромеханических характеристик МГД-привода в установившихся режимах работы, создана методика их расчета, разработаны линеаризованные модели таких приводов, описаны их передаточные характеристики, составлены уравнения движения МГД-привода и получены аналитические решения для частных случаев, разработаны машинные методы расчета и моделирования переходных процессов, методы управления МГД-приводами, проведены основательные экспериментальные исследования.

Академией наук ЭССР исследования по электротехнике были начаты в 50-х годах в Институте энергетика. Первые аспиранты в этой области были подготовлены в ЭНИН им. Г. М. Кржижановского и ЛЭТИ им. В. И. Ульянова.

В начальный период исследований были разработаны вопросы рационализации систем распределения электроэнергии, главным образом связанные с применением установок продольно-емкостной компенсации. Были созданы простые инженерные методы расчета этих установок на основе минимальной исходной информации, установлена зависимость их рабочих режимов от характера нагрузки и разработана простая и надежная защита от перенапряжений.

В области электромеханики были выяснены особенности характеристик электроприводов постоянного тока при регулировании магнитного потока машин по частям (т. е. при раздельном питании полюсов) и разработаны методы их расчета, а также исследован асинхронный электропривод, регулируемый с помощью насыщающихся дросселей.

В начале 60-х годов Институт энергетика был реорганизован в Институт термофизики и электрофизики (ИТЭФ). Был проведен цикл работ по исследованию электромагнитных процессов в магнитных преобразователях частоты, создан ряд новых магнитных умножителей частоты с внутренней обратной связью и трансформаторных магнитных усилителей с умножением частоты, отличающихся большим диапазоном регулирования (1 : 500 и более) и хорошими динамическими свойствами.

В связи с развитием силовой полупроводниковой техники в последний период основное внимание уделяется проблемам электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей с нагрузкой и сетью питания. Развита работа по теории и практике применения силовых сглаживающих фильтров, в частности активных, разработаны основы создания новых малоискажающих магнитно-полупроводниковых регуляторов переменного и постоянного то-

ков с применением принципа межфазного энергообмена, разрабатывается основа создания источников тока для питания объектов новой техники.

В ИТЭФ разработана методика и создана оригинальная электронно-оптическая аппаратура для исследования быстротекающих процессов в силовых полупроводниковых структурах и прогнозирования качества силовых полупроводниковых приборов в процессе производства.

Все эти работы развивались и развиваются в тесном контакте и сотрудничестве с ведущими научными центрами, в первую очередь РСФСР, а также УССР и других республик.

Энергичное развитие работ по электротехнике благоприятно влияло на организацию учебного процесса и повышение качества подготовки инженерных кадров

всех электротехнических специальностей в ТПИ. На эстонский язык были переведены «Теоретические основы электротехники» П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана, «Электрические машины» А. И. Вольдека и ряд других учебников, что способствовало повышению уровня подготовки кадров молодой Эстонской республики и расценивается как неоценимая помощь ученых братских республик.

По мере становления и приобретения опыта научной работы в республике стала издаваться и оригинальная учебно-методическая литература. Это позволило добиться к 60-летию СССР удовлетворения основных потребностей Эстонской ССР в кадрах инженеров-электриков на предприятиях, в энергосистеме, проектных и исследовательских институтах, а также в системе технического образования республики.



УДК 621.31:658.562

## Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения

ШИДЛОВСКИЙ А. К., член-корр. АН УССР (Киев), ГРИНБЕРГ И. П. (Житомир),  
ЖЕЛЕЗКО Ю. С. (Москва), кандидаты техн. наук  
РСФСР — Украинская ССР

Широкое использование электроэнергии во всех отраслях народного хозяйства и существенное влияние ее параметров на эффективность производственных процессов делают особо важными задачи контроля и повышения ее качества. Основные показатели качества электроэнергии (ПКЭ) нормированы в ГОСТ 13109—67. К ним относятся<sup>1</sup>: отклонение напряжения, отклонение частоты, размах колебаний напряжения, размах колебаний частоты, коэффициент несинусоидальности напряжения и коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжения.

Лишь один из перечисленных показателей — отклонение частоты — является общесистемным параметром, имеющим одинаковое значение во всех точках электрически связанной сети. Поэтому контроль за отклонениями частоты может производиться по измерениям текущих значений, выполняемым с помощью обычных приборов, что не связано с большими затратами труда.

С другой стороны, нарушение норм ГОСТ по этому показателю в отличие от других ПКЭ не является следствием отсутствия специальных средств регулирования частоты или средств контроля за ее значениями, а объясняется сложившимся топливно-энергетическим балансом. Поэтому создание специализированных средств измерения (СИ) отклонений частоты не является первоочередной задачей, хотя для непосредственного измерения их в виде, нормированном ГОСТ<sup>2</sup>, соответствующие средства отсутствуют.

Остальные ПКЭ имеют различные значения в раз-

ных узлах сети. Нарушения норм ГОСТ по этим показателям объясняются, как правило, отсутствием или неправильной работой средств повышения качества, что в значительной степени обусловлено отсутствием СИ этих показателей и невозможностью вследствие этого организовать действенный контроль за их значениями и установить ответственность за нарушение ГОСТ.

Следует отметить, что теоретические основы статистического анализа качества напряжения были впервые разработаны в нашей стране [1]. Известен положительный опыт Латвглавэнерго, Ленэнерго и других энергосистем в практической организации контроля за качеством электроэнергии. Однако этот контроль приходилось основывать на существовавших СИ (в основном это выпускавшиеся опытным заводом «Энергоавтоматика» приборы типа САКН, АН и АНЕС), не полностью удовлетворявших требованиям Государственной системы обеспечения единства измерений. С другой стороны, эти СИ не позволяли решить весь комплекс задач в области нормализации качества электроэнергии, о котором будет сказано ниже.

Разработки лабораторных образцов приборов, осуществленные в последние 10 лет различными организациями, внесли несомненный вклад в теоретическое решение проблемы, однако, не смогли стать основой ее практического решения, требующего серийного изготовления СИ, а следовательно, строгого соблюдения требований ГОСТ 15.001-73 «Разработка и постановка продукции на производство».

Вместе с тем наличие средств измерения ПКЭ является необходимым условием развертывания работ по повышению качества электроэнергии в эксплуатируемых сетях. Отсутствие данных о фактических зна-

<sup>1</sup> Показатели качества электроэнергии приводятся по терминологии ГОСТ 23875—79. Качество электрической энергии. Термины и определения.

<sup>2</sup> ГОСТ 13109—67 устанавливает нормы на отклонения частоты, определяемые как величины, усредненные за 10 мин.

чениях ПКЭ не позволяет намечать соответствующие мероприятия. К наиболее существенным недостаткам, обусловленным отсутствием СИ ПКЭ, можно отнести следующие.

1. Преждевременный выход из строя электрооборудования часто ошибочно относят к качеству его изготовления, а не к качеству электроэнергии. Например, наблюдавшийся в последнее время повышенный выход из строя ламп накаливания практически повсеместно вызывал нарекания в адрес их изготовителей, хотя основной причиной его являются недопустимые уровни напряжения в сети. Наличие СИ ПКЭ позволит осуществлять правильную диагностику причин выхода оборудования из строя, а также прогнозировать подобные нежелательные явления.

2. Отсутствие достоверной информации о фактических значениях ПКЭ в различных местах сети не позволяет решить задачу выбора оптимальной мощности и мест установки средств повышения качества электроэнергии.

3. Имеющиеся в сетях средства повышения качества не могут использоваться с должной эффективностью без соответствующей их настройки, возможной лишь при наличии специализированных средств измерения ПКЭ.

4. Отсутствие специализированных СИ ПКЭ затрудняет создание организационно-распорядительных документов, предписывающих проведение контроля. Это в свою очередь приводит к еще худшему использованию имеющихся средств повышения качества электроэнергии. В этих условиях, например, для повышения срока службы ламп накаливания пришлось принять вынужденное решение о выпуске их на повышенные напряжения (230—240 В), хотя более правильным было бы приведение отклонений напряжения в допустимые пределы.

5. Недостаточное внимание к вопросам контроля качества электроэнергии создает у персонала мнение о незначимости данной задачи, что затрудняет организацию серийного производства средств повышения качества из-за практического отсутствия заявок на их изготовление.

Изложенное показывает, что требования к СИ ПКЭ должны исходить не только из необходимости решения определенных технических задач, но и, в первую очередь, из необходимости построения на их основе организационного механизма контроля и управления качеством электроэнергии в стране. Это обуславливает необходимость увязанности всех СИ ПКЭ в определенную систему, позволяющую обеспечить информацией решение всего комплекса задач нормализации качества. Формирование обоснованных технических требований к средствам измерений ПКЭ, составляющим указанную систему, включает в себя следующие этапы:

описание задач, которые должны решаться в сфере нормализации качества электроэнергии;

выявление параметров электроэнергии, подлежащих измерению для решения этих задач;

определение рациональной номенклатуры приборов, состоящее в выявлении целесообразного конструктивного объединения измерителей нескольких параметров в одном приборе;

обоснование требований к метрологическим характеристикам приборов.

В данной статье рассмотрены задачи первых трех этапов.

Задача последнего этапа должна решаться путем сравнения значимости уточнения информации, с одной стороны, и трудностей создания более точных приборов (с учетом создания соответствующих поверочных устройств), с другой.

**Специфика задач нормализации качества электроэнергии** обуславливается в основном тремя факторами:

физическим существом задачи, характеризуемым наличием большого числа потребителей, влияющих друг на друга через общую сеть;

организационной структурой управления сетями, характеризуемой различием ведомственной принадлежности различных частей сети;

эргатическим характером задачи, обусловленным наличием человека в цепи управления и значительной зависимостью конечного результата от его действий.

Первый из перечисленных факторов приводит к тому, что часть потребителей, имеющая спокойную нагрузку и не ухудшающая качество электроэнергии в сети, вынуждена терпеть определенный ущерб вследствие отрицательного воздействия на технологический процесс и сроки службы электрооборудования искажений, вносимых в сеть другими потребителями. Поэтому СИ ПКЭ должны позволять не только проверять соответствие ПКЭ нормированным значениям, но и выявлять виновника ухудшения качества.

Реализовать это требование можно различными путями. Иногда достаточным может оказаться одно-временное измерение показателя в различных точках сети, например, на границе раздела балансовой принадлежности сетей и в глубине сети потребителя. Сравнение результатов замера в ряде случаев позволяет судить о направлении потока искажений. В этом случае специальных требований к техническим характеристикам СИ не предъявляется — выявление источника искажений осуществляется за счет соответствующего способа использования приборов.

Дополнительной информацией, способствующей решению этого вопроса на практике, являются сведения о характере технологического процесса потребителя энергии (наличие вентильных преобразователей энергии, несимметричных или резкопеременных нагрузок и т. п.).

Следует отметить, что указанная информация позволяет делать однозначные выводы об источнике искажения лишь в очевидных ситуациях. Например, несимметрия напряжения в узлах сети, электрически малоудаленных от узлов с тяговой нагрузкой, может быть отнесена на счет последней; наличие высших гармонических токов и напряжений в сети, от которой получает питание металлургический комбинат с мощными преобразовательными установками и дугowymi сталеплавильными печами при относительно спокойной нагрузке остальной массы потребителей, также не оставляет сомнений об основном источнике искажений. Совершенствование технологии производства приводит к увеличению доли электроприемников со специфическими режимами работы практически у всех потребителей. Количество очевидных ситуаций будет постепенно снижаться, увеличится весомость информации, получаемой с помощью измерений. По-

этому требования по определению направления потока искажения целесообразно предъявлять непосредственно к единичному прибору, установленному в пункте контроля.

Реализовать это требование в общем случае можно с помощью измерителей вторичной мощности [2]. При известном характере реактивного сопротивления сети достаточно измерять фазовый угол между током и напряжением исследуемого параметра. Последнее реализуется проще.

Различие ведомственной принадлежности сетей энергосистемы и потребителей энергии приводит к необходимости оформления юридических взаимоотношений сторон и установления финансовой ответственности за нарушение договорных условий. В настоящее время в Правилах пользования электроэнергией оговаривается, что при несоблюдении нормированного качества электроэнергии виновная сторона выплачивается штраф в размере 25% стоимости электроэнергии. В будущем система штрафных санкций несомненно должна быть усовершенствована в сторону дифференциации ответственности по различным ПКЭ и по «глубине» их нарушения. Очевидно, что одинаковая мера не может предъявляться к виновнику незначительного нарушения норм по одному показателю и к виновнику значительного нарушения, да еще возможно по ряду показателей, так как последствия нарушения норм по различным ПКЭ различны.

С этой точки зрения СИ должны давать возможность судить о количестве электроэнергии, потребленной при различных значениях ПКЭ. Строго говоря, для этого нужно было бы иметь счетчики электроэнергии, фиксирующие ее потребление в каждом из диапазонов ПКЭ. Однако конечная цель получения этой информации — определение скидок и надбавок к тарифам, численные значения которых обычно устанавливаются из общих соображений для обеспечения определенного стимулирующего воздействия — не дает оснований предъявлять повышенные требования к точности измерения долевого распределения суммарного потребления энергии по диапазонам ПКЭ<sup>3</sup>. Можно, например, потребление энергии в каждый момент времени считать пропорциональным току в цепи и использовать предложенный Н. С. Маркушевичем способ, состоящий в измерении двумерной гистограммы, по одной оси которой отложено значение тока, а по другой — исследуемого ПКЭ. Такая гистограмма одновременно дает полноценную информацию для выбора законов регулирования средств повышения качества.

Эргатический характер задачи предъявляет к характеристикам приборов ряд требований, основой которых является стремление минимизировать затраты труда, обеспечив при этом максимальную возможную полноту и достоверность получаемой информации.

Минимизация затрат труда достигается в основном двумя способами: автоматизацией измерений, обеспечивающей исключение человека из части или всех операций по получению информации;

облегчением измерений с участием человека путем создания приборов, позволяющих: сократить время

<sup>3</sup> Суммарное потребление энергии измеряется отдельным прибором — электросчетчиком — с установленной точностью.

измерений, требуемое для получения информации; получать при измерении одновременно информацию, необходимую для решения ряда задач; производить эпизодические и спорадические замеры ПКЭ при выполнении других операций по обслуживанию сетей, например, при выездах оперативных бригад на обслуживаемые подстанции и т. п.

Требования последнего способа наиболее значимы для переходного периода, в котором автоматизированные системы телеизмерений отсутствуют.

Исходя из изложенного, к СИ ПКЭ могут быть предъявлены требования минимальных весогабаритных характеристик, максимальной полноты измерительной информации и возможности их использования в качестве датчиков автоматизированных систем телеизмерения в будущем.

Кроме задач, относящихся к сфере метрологического обеспечения юридических взаимоотношений энергоснабжающих организаций и потребителей энергии, в условиях эксплуатации должна решаться техническая задача — выбор наиболее целесообразных мероприятий по повышению качества. Набор параметров, подлежащих измерению для решений этой задачи, как правило, шире, чем необходимый для решения предыдущих задач.

В дальнейшем для измерений, проводимых с целью выбора мероприятий по повышению качества, используется термин «технический контроль», а для проводимых с целью проверки соответствия ПКЭ требованиям ГОСТ или предъявления финансовых претензий — термин «расчетный контроль», аналогично терминологии, используемой при учете электроэнергии.

В соответствии с изложенным основными задачами, решаемыми с помощью информации, получаемой от СИ ПКЭ, являются: проверка соответствия качества электроэнергии нормам ГОСТ; выявление виновника ухудшения качества (определение направления потока искажений); определение размера скидок с тарифа за поставку электроэнергии пониженного качества и надбавок к тарифу за внесение искажений в сеть энергосистемы; выбор мероприятий по нормализации качества. Перечень параметров, подлежащих измерению для решения каждой из перечисленных задач, приведен в таблице, где индексами 1, 2 и 0 обозначены величины, относящиеся соответственно к прямой, обратной и нулевой последовательностям системы симметричных составляющих, индексом  $\nu$  — номер гармоники.  $K^{\nu}_{нс}$  и  $K^{I\nu}_{нс}$  — коэффициенты несимметричности кривых напряжения и тока.

**Подход к оптимизации номенклатуры СИ ПКЭ.** Проведенные во ВНИИЭ исследования показали, что эффективность работы технических средств повышения качества электроэнергии снижается в среднем на 15—20% при выборе их оптимальной мощности и законов регулирования на основе той информации, которая может быть получена без специализированных СИ ПКЭ. Это говорит о том, что сверх наиболее важного, но труднооцениваемого в денежном выражении эффекта, обусловленного приведением в действие организационного механизма контроля и управления качеством электроэнергии на СИ ПКЭ может быть прямо отнесено как минимум 15% эффекта от применения средств его повышения. С другой стороны, стоимость самих СИ в количестве, необходимом для получения указанного эффекта, тоже оказывается зна-

Измеряемый параметр	Цель измерения					Обеспечение адаптации к изменениям ГОСТ
	Проверка соответствия нормам ГОСТ		Выявление виновника ухудшения качества	Определение размера скидок или надбавок	Выбор мероприятий по нормализации качества	
	прямая	косвенная				
$V_1$ $U_2$ $U_0$	+	+	+	+	+	+
$I_1$ $I_2$ $I_0$			+	+	+	+
$\arg \dot{U}_2, \dot{U}_0$ $\arg \dot{I}_2, \dot{I}_0$		+	+		+	+
$K_{нс}^U$ $K_{нс}^I$	+			+		+
$U_v$ $I_v$			+		+	+
$\arg \dot{U}_v$ $\arg \dot{I}_v$			+		+	+
Относительное время превышения нормы	+					
Одномерная гистограмма					+	+
Двухмерная гистограмма				+	+	+
Корреляционные функции					+	+

чительной, так как по существующим оценкам в сетях энергосистем и потребителей должны эксплуатироваться несколько десятков тысяч таких средств. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки рациональной номенклатуры СИ ПКЭ, позволяющих решить возлагаемые на них задачи наиболее экономичным путем.

Решение такой оптимизационной задачи возможно при системном, межотраслевом подходе, предполагающем учет ценности информации о том или ином параметре, с одной стороны, и стоимости аппаратурной реализации его измерения, с другой. При определенном таким образом перечне параметров должен быть решен вопрос о рациональном конструктивном объединении их измерителей в малом числе приборов.

В предельном случае число типов приборов может быть равным числу измеряемых параметров. Естественно, такой путь не может быть рациональным, так как приводит к неудобствам в их использовании и увеличению затрат труда эксплуатационного персонала. Кроме того, стоимость совместной реализации измерений обычно ниже суммы отдельных за счет использования общих элементов. С другой стороны, объединение в одном приборе различных измерителей приводит к увеличению общей потребности в них в случае, если частота их совместного использования  $p_{ij} < 1$ . При этом многофункциональные приборы могут оказываться менее рентабельными из-за малого коэффициента использования отдельных возможностей. Кроме того, такие приборы при существующих характеристиках комплектующих изделий могут не обла-

дать приемлемыми весогабаритными характеристиками.

Математическая запись целевой функции данной задачи

$$\sum_{i=1}^n \left[ d_i \mathcal{E}_i k_p - \Pi_i C_i(N_{пр}) \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \right] - \mathcal{Z}_{тр}(N_{пр}, T) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_i$  — экономический эффект от мероприятий по повышению качества электроэнергии по  $i$ -му ПКЭ в целом по стране;  $d_i$  — доля эффекта, относимая на СИ;  $k_p$  — коэффициент, учитывающий увеличение эффекта за счет применения измерителя в других областях для решения дополнительных задач;  $\Pi_i$  — потребность в измерителях  $i$ -го параметра;  $C_i(N_{пр})$  — стоимость приборной реализации измерения  $i$ -го параметра (приведенная к году), зависящая от числа приборов  $N_{пр}$ ;  $k_{ij}$  — коэффициент увеличения потребности в измерителях за счет объединения в одном приборе измерителей, не всегда используемых совместно: при отдельной приборной реализации  $i$ -го и  $j$ -го параметров  $k_{ij} = 1$ , при совместной  $k_{ij}$  определяется по формуле:

$$k_{ij} = \frac{2}{1 + p_{ij}}; \quad (2)$$

$\mathcal{Z}_{тр}(N_{пр}, T)$  — затраты труда на производство измерений (в денежном выражении), зависящие от числа приборов и от продолжительности измерений  $T$ . Эта составляющая (1) содержит, как правило, штрафную функцию, обусловленную дефицитом трудовых ресурсов.

Строгое решение задачи (1) затруднено отсутствием достоверной исходной информации. В частности, если параметры  $\mathcal{E}_i$ ,  $d_i$ ,  $\Pi_i$  и  $k_{ij}$  можно считать достаточно известными, то стоимость приборной реализации измерения конкретного параметра  $C_i$  зависит от выбранного способа измерения и может быть определена лишь приближенно; количественно не определена и зависимость затрат труда от удобства измерений, конструктивного объединения в одном приборе нескольких измерителей и т. п.

Однако независимо от трудностей решения задачи для общего случая целый ряд конкретных вопросов рационализации номенклатуры СИ ПКЭ может быть практически решен в виду очевидной близости некоторых составляющих функции (1) к предельно возможным значениям. Например, если стоимость приборной реализации измерения какого-либо параметра близка к нулю (его измерение появляется как побочное, выполняемое при измерении другого параметра), было бы бессмысленным отказываться от его получения. Однозначным получается и решение об объединении нескольких измерителей в одном приборе, если частота их совместного использования близка к единице.

Наиболее «самостоятельным» ПКЭ, мероприятия по нормализации которого могут разрабатываться по результатам измерения самого показателя, является отклонение напряжения [3].

Для определения источника искажения симметрии напряжений и эквивалентных сопротивлений узлов нагрузок необходимо определить токи и напряжения симметричных составляющих и углы сдвига между ними. Для оценки отклонений однофазных напряже-

ний по результатам измерений симметричных составляющих трехфазной системы напряжений (косвенный контроль) необходимо кроме значений  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_0$  измерять и углы сдвига между ними.

Учитывая, что косвенный контроль позволяет значительно сократить время измерений, а также то, что отклонение напряжения прямой последовательности  $V_1$  и значения  $U_2$  и  $U_0$  определяют фактически все симметричные составляющие трехфазной системы напряжений и для их измерения необходимы одинаковые присоединения к измерительным цепям, целесообразно объединить все измерители в одном приборе несмотря на то, что измерения  $U_2$  как самостоятельно нормируемой величины производятся несколько реже, чем измерения  $V_1$ .

Для определения угла сдвига между током и напряжением любой составляющей в общем случае необходимо измерять эти величины одновременно. Предварительные оценки показали, что при предъявлении такого требования к прибору стоимость его увеличивается на 60—80% по сравнению с последовательным измерением тока и напряжения путем переключения. Последний способ позволяет использовать для измерения тока тот же измерительный графт, что и для измерения напряжения, снимая сигнал со встроенного шунта. Последовательное измерение напряжений и токов вместе с измерением углов сдвига между симметричными составляющими увеличивает стоимость прибора лишь на 10—15% по сравнению с измерением только напряжения.

Между тем, измерения, требующие одновременно получения токов и напряжений, производятся гораздо реже, чем измерения напряжений. Поэтому с экономической точки зрения для массовых приборов целесообразно осуществлять приборную реализацию последовательных измерений. Одновременные измерения в необходимых случаях могут быть произведены с помощью двух приборов, один из которых включен в режим измерения токов, а другой — напряжений. Дополнительно потребуется фазометр, измеряющий угол сдвига между током и напряжением прямой последовательности.

Аналогичные выводы применимы и к измерению гармоник тока и напряжения.

**Возможные изменения способов нормирования ПКЭ.** Организация серийного производства новых изделий всегда связана с рядом производственных трудностей. Изготовителю изделия более рентабельно производить продукцию, пользующуюся долговременным и устойчивым спросом, нежели продукцию, требования к которой постоянно меняются и требуют частой перестройки производственного процесса.

Поэтому, кроме требований к функциональным характеристикам СИ ПКЭ, при разработке их рациональной номенклатуры должны быть учтены требования максимальной адаптации к возможным изменениям способов нормирования ПКЭ.

Различные виды искажений системы напряжений и токов по-разному влияют на различные электроприемники. По мере выяснения физической сути этого влияния возможна выработка новых показателей, отражающих его более адекватно. Известно, например, что влияние токов обратной последовательности на вращающиеся машины зависит от взаимного положения векторов прямой и обратной последовательности [4], максимальное значение мгновенного на-

пряжения, которое может оказаться критериальным для электронной аппаратуры, зависит от фазовых сдвигов высших гармоник по отношению к основной гармонике, влияние резких изменений напряжения зависит от скорости этого изменения и т. п. Установленные ГОСТ показатели качества электроэнергии в настоящее время не учитывают этих различий, что позволяет предполагать возможность их изменения или дополнения в будущем.

Прогнозировать изменения в способах нормирования с полной уверенностью, естественно, нельзя, однако, некоторые наиболее очевидные возможности целесообразно предусмотреть. При этом очевидно, что влияние на номенклатуру СИ ПКЭ окажут лишь изменения вида ПКЭ, а не изменение численных значений нормы.

Наиболее вероятны изменения вида тех ПКЭ, в способах определения которых в настоящее время присутствует значительный волевой элемент. К ним в первую очередь относятся колебания напряжения и частоты, к которым в соответствии с ГОСТ относятся изменения, происходящие со скоростью более 1%/с и 0,2 Гц/с соответственно. Указанные границы не имеют достаточно четких обоснований и вряд ли могут быть уточнены в будущем.

Вопрос об организации серийного производства СИ данных ПКЭ в этих условиях представляется преждевременным. В настоящее время целесообразно применение опытных образцов приборов различных модификаций и совершенствование на основе полученного опыта способов нормирования этих ПКЭ.

Что касается отклонений трехфазного напряжения и характеристик его симметрии, то в настоящее время нет оснований предполагать, что способы их нормирования перестанут базироваться на классическом разложении несимметричной системы на системы симметричных составляющих. Аналогично обстоит дело и с нормированием искажений формы кривой напряжения, которое основывается на ее разложении в гармонический ряд. Возможным изменением норм здесь может быть наложение дополнительных ограничений на величины отдельных гармоник, на взаимное расположение основной и высших гармоник, а также прямой, обратной и нулевой последовательностей. Возможно также введение дополнительных норм на токи гармоник и симметричных составляющих.

Существенная зависимость допустимых значений одних ПКЭ от значений, принимаемых в это время другими [5], позволяет предполагать возможности установления норм на совместное воздействие ПКЭ. Для этого потребуется получение по крайней мере двумерной гистограммы, необходимость которой уже выявилась для задачи определения размера скидок и надбавок к тарифам.

Большое значение для номенклатуры СИ имеет и способ определения допустимости ПКЭ при случайном характере их изменения. В ГОСТ 13109—67 говорится, что в этом случае установленные нормы должны соблюдаться в течение не менее 95% времени измерения. Указанное значение выбрано из общих соображений и не имеет строгих обоснований. Между тем в [5 и 6] показано, что для определенного класса случайных процессов существует критерий, позволяющий однозначно определить допустимый уровень интегральной вероятности. Данные, приведенные в [5], показывают, что ориентация на величину 95% приво-

дит к необоснованному завышению мощности средств повышения качества, причем иногда в несколько раз. Такие существенные просчеты позволяют предполагать изменение способов нормирования ПКЭ при случайном характере их изменения в самом недалеком будущем.

В соответствии с [5 и 6] эквивалентный уровень интегральной вероятности зависит от характеристик случайного процесса и не может устанавливаться априорно. Применительно к номенклатуре СИ ПКЭ это означает, что для проверки допустимости режимов работы оборудования получение гистограммы обязательно, и изготовление упрощенных статистических приборов, фиксирующих только относительное время превышения нормы, нецелесообразно.

Параметры, измерение которых может потребоваться при предполагаемых авторами изменениях способов нормирования ПКЭ, также приведены в таблице.

**Рациональная номенклатура СИ ПКЭ.** В соответствии с изложенным выше в конструктивном отношении целесообразно создание трех измерительных приборов:

прибора для измерения отклонений напряжения, напряжений и токов обратной и нулевой последовательности основной частоты и фазовых углов между симметричными составляющими;

прибора для измерения коэффициентов несинусоидальности, уровней высших гармоник напряжений и токов и фазовых углов между основной частотой и высшими гармониками;

прибора для измерения колебаний напряжения и частоты. (Колебания напряжения и частоты всегда сопровождают друг друга и поэтому объединение их измерителей в одном приборе наиболее целесообразно. Однако, как отмечалось выше, в связи с неустоявшимся характером способа нормирования этих ПКЭ серийное производство данного прибора пока нецелесообразно).

Перечисленные приборы представляют собой измерители текущих значений ПКЭ. Они могут использоваться в будущем и как датчики системы телеизмерений и как основная часть устройств автоматического управления соответствующими средствами повышения качества.

Для получения информации о статистических характеристиках процессов изменения ПКЭ необходимо дополнительно к указанным иметь прибор, определяющий статистические характеристики унифицированных входных сигналов. При этом каждый из приборов измерения текущих значений ПКЭ должен иметь выход унифицированного аналогового сигнала, к которому может подключаться как статистический прибор, так и в случае необходимости серийно выпускаемые самописцы. В таком виде статистический прибор может использоваться и в других областях техники для анализа случайных процессов любой природы, преобразованных в электрические сигналы. Более широко он может использоваться и в электроэнергетике, в частности, статистический анализ тока позволяет оценить допустимость перегрузок электрооборудования [6] и т. п.

Основной задачей статистического прибора является запоминание информации в виде гистограммы. Вычисление статистических характеристик может производиться отдельно при обработке результатов мас-

совых замеров на ЦВМ. Одновременно с наличием сложного статистического прибора, позволяющего получать одномерные и двумерные гистограммы распределения нескольких сигналов одновременно, и гистограммы для различных, заранее заданных периодов суток было бы целесообразно иметь более простой, малогабаритный и недорогой прибор, выполненный в виде кассеты, вставляемой в любой из приборов измерения текущих значений ПКЭ.

Такая задача может быть, по всей видимости, поставлена на будущее, так как при существующем уровне интеграции микросхем и необходимости использования пока еще дорогих элементов (аналогоцифровых преобразователей, запоминающих устройств различных типов и т. п.) как в сложном, так и в простом приборе, последний не получается существенно более компактным и дешевым, чем первый.

**Измерительно-вычислительные комплексы.** Для подавляющего большинства задач, которые будут решаться в конкретных ситуациях на практике, информация, получаемая с помощью описанных выше приборов, окажется достаточной. Однако в некоторых случаях потребуется более детальная и оперативная информация, которая позволит осуществлять экспресс-анализ ситуации на месте измерения.

Решить эту задачу можно, используя более сложные средства информации, содержащие кроме измерителей специализированные вычислительные машины. Такие средства называются измерительно-вычислительными комплексами (ИВК).

Наличие в составе ИВК вычислительной машины позволяет отказаться от приборной переработки исходных физических величин, например, вместо измерения предварительно выделенных обратной и нулевой последовательностей могут измеряться непосредственно три фазных тока (напряжения), а разложение их на симметричные составляющие может быть возложено на вычислительную машину. Такой принцип измерения обеспечивает большую точность и меньшую постоянную времени, так как исключает погрешности и постоянные времени фильтров симметричных составляющих. Аналогичные рассуждения могут быть приложены и к измерению параметров несинусоидальности.

Основные требования к функциональным характеристикам ИВК:

комплексное определение всех ПКЭ и факторов, определяющих их значения, с целью получения характеристик процесса потребления энергии одновременно по всем параметрам;

одновременное определение параметров по нескольким каналам;

определение мощности потоков искажения по всем ПКЭ и их составляющим с определением направления каждого потока и оценка количества электроэнергии, потребленной при различных комбинациях параметров;

определение эквивалентных сопротивлений сетей и узлов нагрузки по обратной и нулевой последовательности, а также на частотах высших гармоник;

глубокая вычислительная переработка результатов измерений (вычисление коэффициентов корреляции параметров по различным каналам, двумерных законов распределения, авто- и взаимно-корреляционных функций, выбросов и т. п.);

оперативное представление информации в форме, удобной для анализа и принятия решений на месте измерения.

Комплексное определение всех ПКЭ позволит получить всю информацию, необходимую для однозначной характеристики ситуации: модули и фазовые углы всех векторов, параллельную выдачу токов и напряжений симметричных составляющих и высших гармоник, выделение симметричных составляющих самих гармоник и т. п.

Измерительно-вычислительные комплексы стационарной установки найдут применение на подстанциях крупных промышленных предприятий, содержащих большое количество электроприемников, отрицательно влияющих на качество электроэнергии, а также на подстанциях энергосистем, питающих большое количество более мелких потребителей такого рода.

В передвижном варианте ИВК будет использоваться в энергосистемах для эпизодических замеров в случаях, когда измерения с помощью приборов массового контроля не дает возможности однозначно решить вопрос, а также в конфликтных ситуациях.

Заложенный в ИВК принцип измерения обеспечивает широкие возможности адаптации к любым изменениям способов нормирования ПКЭ, так как изменению в этом случае подлежат лишь способы обработки данных, т. е. программное обеспечение.

**Работы по созданию СИ ПКЭ.** В соответствии с разработанной выше номенклатурой СИ ПКЭ Институтом электродинамики АН УССР совместно с ПО «Электроизмеритель» закончены научно-исследовательские работы по созданию лабораторных образцов приборов. В настоящее время проводятся опытно-конструкторские работы по созданию промышленных образцов.

Опытно-промышленный образец средства комплексного контроля стационарной установки (ИВК «Качество») в апреле 1981 г. принят межведомственной комиссией и в настоящее время выпускается серийно [7].

Описанный комплекс приборов позволит организовать на практике действенный контроль качества электроэнергии. Учитывая создание отечественных приборов контроля качества и внедрение их в ближайшее время в практику, можно считать что ГОСТ 13109—67 становится метрологически обеспеченным.

С целью ускорения внедрения приборов и эффективного использования их в сетях потребителей в Правила пользования электроэнергией, введенные в действие с 1 января 1982 г., внесен пункт об обя-

занности потребителя производить по требованию энергоснабжающей организации непрерывный, периодический или эпизодический контроль ПКЭ, обусловленных работой его электроустановок.

К показателям качества электроэнергии, в основном обусловленным работой электроустановок потребителя, относятся показатели несимметрии и несинусоидальности напряжения и колебания напряжения и частоты.

Значения отклонений напряжения в узлах сети определяются как работой регулирующего оборудования энергоснабжающих организаций, так и режимами работы потребительских электроустановок. Поддержание его в допустимых пределах с помощью регулирующих устройств только энергоснабжающих организаций часто бывает невозможным из-за низкой оснащенности сетей потребителей средствами компенсации реактивной мощности и, что еще более существенно, работой последних в нерегулируемом режиме. В связи с этим в новую форму типового договора на пользование электроэнергией внесено положение о том, что энергоснабжающая организация обеспечивает допустимые отклонения напряжения на границе раздела балансовой принадлежности сетей лишь в случае, если потребитель выдерживает заданные режимы потребления реактивной мощности как в максимум, так и в минимум нагрузки. В соответствии с этим положением приведен и весь комплекс нормативных документов, определяющих требования к режимам потребления реактивной мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан Я. Д., Маркушевич Н. С. Использование статистической информации о качестве напряжения в электрических сетях. — М.: Энергия, 1972.
2. Зыкин Ф. А. Некоторые проблемы измерения и учета электрической энергии. — Промышленная энергетика, 1979, № 1.
3. Маркушевич Н. С. Информационное обеспечение процесса управления качеством электроэнергии. — Электричество, 1974, № 11.
4. Церазов А. Л., Якименко Н. И. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей. — Информационные материалы. № 70. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
5. Заславская Т. Б., Железко Ю. С., Нейман В. В. О допустимых значениях токов и напряжений обратной последовательности при случайном характере их изменения. — Электричество, 1981, № 9.
6. Железко Ю. С. О допустимой вероятности выхода случайного процесса за установленный уровень. — Изв. вузов. Энергетика, 1982, № 3.
7. Брайко В. В., Гринберг И. П. Опыт и достижения двух коллективов. — Техническая электродинамика, 1981, № 1. [17.05.82]

УДК 621.314.214.332

## Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства

Кулинич В. А.  
РСФСР, Горький

В современной электроэнергетике используются различные виды линейных преобразований параметров электрической энергии переменного тока, осуществляемые при помощи разнообразных статических

электромагнитных аппаратов. Наиболее распространенные из них — трансформаторы.

Несмотря на широкое использование этих аппаратов единого определения для них нет, и различные

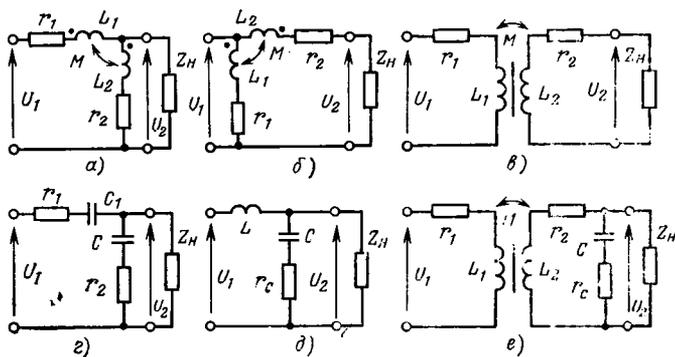


Рис. 1

авторы дают им свои собственные. Не случайна поэтому попытка в [1] дать такое определение трансформаторов, в рамках которого укладывались бы всевозможные их модификации и технические приложения. Авторы [1] понимают под трансформатором «статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной — первичной системы переменного тока в другую — вторичную той же частоты, имеющую в общем случае иные характеристики, в частности, другое напряжение и другой ток». Приняв такое определение, справедливо пользоваться более широким термином «трансформирующее устройство», которое в рамках общего класса охватывает электромагнитные преобразовательные аппараты различного функционального назначения, где используются чисто линейные преобразования [2—5].

Приведенное определение трансформирующего устройства дает возможность рассматривать его в общем случае в виде некоего  $n$ -полюсника при  $n \geq 4$ , внутри которого имеют равные права на существование принципиально различные системы электромагнитного преобразования. Использование взаимных индуктивных связей, например, является здесь лишь технической частностью. Таким образом, трансформирующие устройства с высокими технико-экономическими характеристиками могут быть построены на базе нескольких преобразовательных систем.

1. Наиболее распространенная — индуктивная — использует для преобразования процессы, происходящие в переменном магнитном поле. Различные модификации принципиальных схем этой системы для  $n=4$  приведены на рис. 1, а, б и в. Рассматривая варианты а и б, нетрудно заметить, что исключение явления взаимной индукции приведет к способности устройств к одностороннему преобразованию уровней напряжений и токов поступающей электроэнергии в сторону снижения их значений, но сохранит фазо-преобразующие свойства.

2. Емкостная, представленная на рис. 1 схемой г система для преобразования использует процессы, происходящие в переменном электрическом поле. К сожалению, потенциальный, т. е. безвихревой, характер электрического поля, не дает возможности реализовать аналогию взаимной индуктивности, поэтому такое устройство способно только на снижение значений входных величин.

3. Индуктивно-емкостная модификация — наиболее общий случай реализации трансформирующих устройств — отличается также и наиболее широким спектром преобразовательных возможностей. Эти устройства способны наряду с изменением количественных соотношений между первичными и вторичными систе-

мами напряжений и токов определять и их фазовые соотношения, а также величину и характер потребляемой мощности.

Изложенное позволяет сделать вывод, что определение трансформатора, принятое в [1], распространяется на широкий класс устройств, преобразующих параметры электрической энергии. Логичным было бы пользоваться им для определения обобщенного трансформирующего устройства, и таким образом в рамках широкого класса органически объединить самые разнообразные системы, служащие для линейного преобразования параметров электрической энергии переменного тока.

Обобщенное трансформирующее устройство наиболее полно реализуется технически в виде индуктивно-емкостной трансформирующей системы. Многочисленные представители группы индуктивно-емкостных трансформирующих устройств, отличающаяся друг от друга и схемно, и по функциональной принадлежности [2—5], получили широкое распространение в промышленной технике статического преобразования параметров электроэнергии переменного тока. Наличие в них процесса внутреннего обмена энергии оказывает существенное влияние на их преобразовательные свойства и дает возможность создать на их базе высокоэффективные управляемые трансформирующие системы путем использования управляемых реактивных элементов. В этих устройствах заложена возможность осуществления одновременного управляющего воздействия на несколько параметров электрической энергии: уровень и симметрию системы напряжений и токов, их гармонический состав, а также уровень и характер потребляемой мощности.

Переходя к детальному рассмотрению свойств индуктивно-емкостных трансформирующих устройств, обратимся к рис. 2, а, где приведен один из вариантов принципиальной схемы промышленного управляемого трансформатора, предназначенного для регулирования

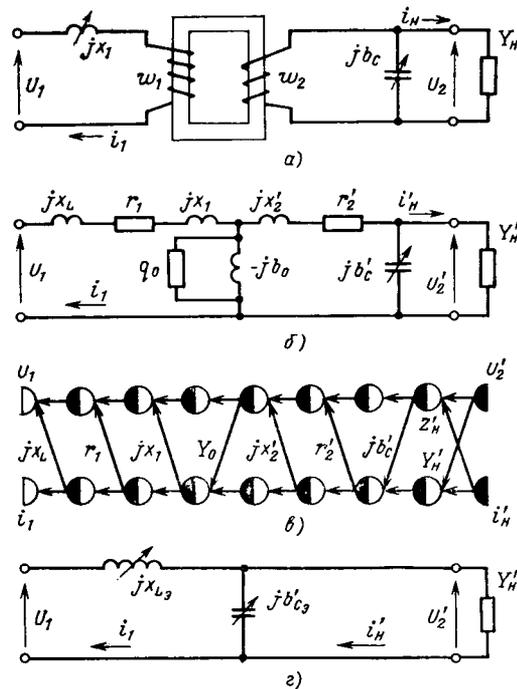


Рис. 2

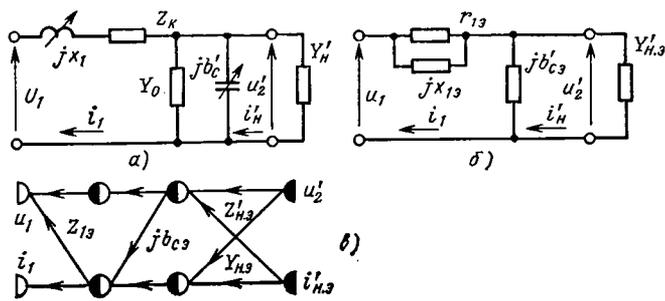


Рис. 3

уровня напряжения на нагрузке. Для установившегося режима работы в пределах допустимости использования чисто линейных соотношений справедливы приведенная на рис. 2,б схема замещения содержащегося в составе исполнительного органа устройства традиционного трансформатора и построенный с ее учетом направленный граф всей системы (рис. 2,в). Пренебрегая потерями в элементах и намагничивающим током трансформатора, получаем наиболее простую схему замещения устройства, приведенную на рис. 2,г, которая может быть применена для ориентировочного инженерного определения параметров ее элементов. Более точная схема замещения (рис. 3,а) может быть получена на базе Г-образной схемы замещения трансформатора. На рис. 3,б дано ее линейное преобразование, где потери в стали отнесены к нагрузке, а намагничивающий ток учтен в результирующей проводимости емкостной ветви. Нетрудно узнать в ней один из вариантов схемы замещения статического трансформатора (т. е. преобразователя) числа фаз [2].

Для анализа конкретных схем индуктивно-емкостных трансформирующих устройств удобно использовать аналитические выражения их коэффициента трансформации  $\tilde{K}(j\omega)$  — аналога общепринятому в трансформаторостроении, представляющего собою отношение входной величины к выходной. Соответствующие коэффициенты трансформации по напряжению и току имеют ярко выраженный комплексный характер, что и свидетельствует об отмеченных выше возможностях трансформации фазовых соотношений. Уравнения для определения  $\tilde{K}(j\omega)$  являются одновременно и выражениями статических характеристик соответствующих устройств. Для их определения, положив, что преобразование параметров электроэнергии — чисто линейный процесс, воспользуемся теорией четырехполюсников. С этой целью рассмотрим линейный четырехполюсник (см. рис. 4) в установившемся режиме, положив, что  $Z_H$  — сопротивление внешней нагрузки, а напряжение на нем  $U_2 = I_2 Z_H$ . Матричное уравнение для этого трансформирующего четырехполюсника

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = [\gamma_0]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где элементами обратной характеристической матрицы  $[\gamma_0]^{-1} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  являются его постоянные.

Подставив в первое уравнение системы (1) значения напряжения на полезной нагрузке  $U_2 = I_2 Z_H$ , получаем выражение комплексного коэффициента трансформации обобщенного трансформирующего устройства по напряжению:

$$\tilde{K}_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_1}{U_2} = A + \frac{B}{Z_H}, \quad (2)$$

которое при холостом ходе устройства вырождается в

$$\tilde{K}_U(j\omega) = A. \quad (3)$$

Из второго уравнения системы (1) следует выражение для коэффициента трансформации по току:

$$\tilde{K}_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_1}{I_2} = C + D Z_H, \quad (4)$$

преобразующееся при коротком замыкании трансформирующей системы в

$$\tilde{K}_I(j\omega) = C. \quad (5)$$

На рис. 5 приведены различные модификации схем индуктивно-емкостных трансформирующих четырехполюсников, содержащих возможные комбинации включения нагрузки, индуктивного и емкостного элементов. Наиболее универсальный вид приобретают схемы рис. 5,ж и и, где при необходимости в составе активных сопротивлений могут быть учтены и потери энергии в реальных реактивных элементах. Эти две схемы приняты в дальнейшем в качестве основных схем индуктивно-емкостных трансформирующих четырехполюсников. Нетрудно показать, что более сложные варианты приводятся к их схемной комбинации, а более простые являются их частным случаем. Поэтому для наиболее общего случая существования многофазной индуктивно-емкостной системы трансформации считается, что узлы многофазной системы связаны двухполюсниками (относительно входных зажимов  $I, I'$ ) типа рис. 5,ж или 5,и. Такие двухполюсники условно названы обобщенными ветвями связи (ОВС) обобщенных схем индуктивно-емкостных трансформирующих устройств. Не останавливаясь на детальном рассмотрении характерных свойств ОВС, отметим, что не представляет труда показать их дуальность при определенных условиях и сделать вывод, что соответствующий четырехполюсник в первом случае является минимальнофазным и неуравновешенным, а во втором — наоборот. Отметим также появление в них новых комплексных потенциалов  $\dot{\varphi}_{12}, \dot{\varphi}'_1, \dot{\varphi}''_1$ . Образуя многофазный источник питания так, чтобы каждый зажим источника был соединен со всеми остальными при помощи ОВС, а точки с новым потенциалом — некими проводимостями, получим соответственно две базовые модификации обобщенных принципиальных схем индуктивно-емкостных трансформирующих устройств.

Система уравнений обобщенного трансформирующего устройства индуктивно-емкостного типа, которое по определению является преобразователем чисто линейной, базируется на уравнениях Кирхгофа. Для конкретного случая использования ОВС типа рис. 5,ж удобно воспользоваться методом узловых потенциа-

$$\left. \begin{aligned} &(\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_1) Y_L + (\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_2) Y_C + \dots \\ &\dots + (\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_{gh}) Y_{12, gh} + \dots \\ &\dots + (\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_{(n-1)n}) Y_{12, (n-1)n} + \\ &+ (\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_{n1}) Y_{12, n1} = 0; \\ &\dots \\ &(\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_g) Y_L + (\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_r) Y_C + \dots \\ &\dots + (\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_{ij}) Y_{gh, ij} + \dots \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 & \dots + (\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_{(n-1)n}) Y_{gh, (n-1)n} + \\
 & + (\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_{n1}) Y_{gh, n1} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & (\dot{\varphi}_{ij} - \dot{\varphi}_i) Y_L + (\dot{\varphi}_{ij} - \dot{\varphi}_j) Y_C + \dots \\
 & \dots + (\dot{\varphi}_{ij} - \dot{\varphi}_{gh}) Y_{ij, gh} + \dots \\
 & \dots + (\dot{\varphi}_{ij} - \dot{\varphi}_{(n-1)n}) Y_{ij, (n-1)n} + \\
 & + (\dot{\varphi}_{ij} - \dot{\varphi}_{n1}) Y_{ij, n1} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & (\dot{\varphi}_{n1} - \dot{\varphi}_n) Y_L + (\dot{\varphi}_{n1} - \dot{\varphi}_1) Y_C + \dots \\
 & \dots + (\dot{\varphi}_{n1} - \dot{\varphi}_{ij}) Y_{n1, ij} + \dots \\
 & \dots + (\dot{\varphi}_{n1} - \dot{\varphi}_{(n-1)n}) Y_{n1, (n-1)n} + \\
 & + (\dot{\varphi}_{n1} - \dot{\varphi}_{(n-1)n}) Y_{n1, (n-1)n} = 0; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{12}) Y_L + \dots + (\dot{\varphi}_1 - \\
 & - \dot{\varphi}_{1g}) Y_C + \dots + (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_{1n}) Y_C + \\
 & + (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) Y_1 = \dot{E}_1 Y_1; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & (\dot{\varphi}_g - \dot{\varphi}_{g(m>g)}) Y_L + \dots + (\dot{\varphi}_g - \\
 & - \dot{\varphi}_{g(m<g)g}) Y_C + \dots + \\
 & + (\dot{\varphi}_g - \dot{\varphi}_0) Y_g = \dot{E}_g Y_g; \\
 & \dots \dots \dots \\
 & \dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_{n1}) Y_L + \dots + (\dot{\varphi}_n - \\
 & (- \dot{\varphi}_{n(m<n)}) Y_C + \dots \\
 & \dots + (\dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_0) Y_n = \dot{E}_n Y_n.
 \end{aligned}$$

(6)

Здесь  $Y_L, Y_C, \dots, Y_{gh, ij}$  — проводимости ветвей между соответствующими узлами;  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  — потенциалы узлов приключения исходной  $n$ -фазной системы питания;  $\varphi_{12}, \dots, \varphi_{gh}, \dots, \varphi_{ij}, \dots, \varphi_{n1}$  — потенциалы узлов, образованных включенными ОВС. Решая эту систему, получим

$$\tilde{K}_{gh, (gh, ij)}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{gh}}{\dot{U}_{gh, ij}} = \frac{\dot{\varphi}_g - \dot{\varphi}_h}{\dot{\varphi}_{gh} - \dot{\varphi}_{ij}} = \frac{\Delta_g - \Delta_h}{\Delta_{gh} - \Delta_{ij}}, \quad (7)$$

где  $\Delta_g, \Delta_h, \Delta_{gh}, \Delta_{ij}$  — соответствующие частные определители системы уравнений (6).

Система уравнений (7) представляет собой одновременно и систему для определения статических характеристик соответствующего индуктивно-емкостного трансформирующего устройства. Из всего множества этих характеристик в расчет имеет смысл принимать только те, которые выражают отношение линейных напряжений первичной системы к их условным аналогам во вторичной.

Обратим внимание, что в связи с появлением в рассматриваемой системе новых комплексных потенциалов, вносимых ОВС, полное число фазовых состояний напряжений в ней определится уравнением:

$$N_\theta = C^k, \quad (8)$$

где  $k$  — число узлов, что свидетельствует о том, что индуктивно-емкостное трансформирующее устройство может служить также ли-

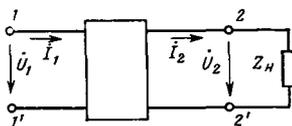


Рис. 4

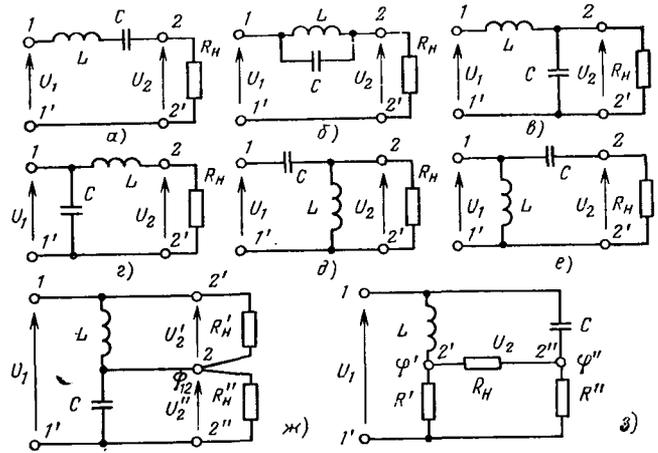


Рис. 5

нейным трансформатором числа фаз.

Заметив, что элементарное ОВС-звено обобщенной схемы индуктивно-емкостного трансформирующего устройства может стать местом подключения новой ОВС, нетрудно заключить, что подобные устройства способны умножить число фаз первичной системы в произвольное число раз, кратное трем. Из этого следует, что элементарная ОВС является также трансформатором однофазного напряжения в трехфазное. Следует отметить, что особый интерес представляют собой симметричные многофазные системы, характерные равенством их комплексных коэффициентов трансформации. Налагая такое условие на систему уравнений (6), получаем область существования многофазной симметрии.

Выводы и уравнения, сделанные на базе рассмотренной обобщенной схемы, можно распространить также и на другую ее модификацию. При необходимости за основу исследования может быть взят также и комплексный коэффициент трансформации по току  $\tilde{K}_j(j\omega)$  (4) и записаны аналоги системы обобщенных уравнений (6).

Возвращаясь к рассмотрению свойств конкретного индуктивно-емкостного трансформирующего устройства, схема исполнительного органа которого приведена на рис. 2,а, по упрощенной схеме замещения этого соединения рис. 2,г и ее направленному графу, получаемому из рис. 3,б, пренебрегая активными потерями в серийной ветви комплексного коэффициента трансформации запишем:

$$\tilde{K}_U = 1 - x_{L3} b'_{c3} + jx_{L3} Y'_{н}, \quad (9)$$

где

$$A = 1 - x_{L3} b'_{c3}; \quad B = jx_{L3}; \quad Z'_{н} = 1/Y'_{н}.$$

Из (9) следует, что изменение  $\tilde{K}_U$  такого трансформирующего устройства может быть осуществлено регулированием параметров реактивных элементов, нагрузки и частоты, т. е. и при сохранении неизменных витковых соотношений в согласующем трансформаторе устройства со схемой рис. 2,а. Практически это означает, что в индуктивно-емкостной трансформирующей системе можно получить регулирование напряжения всеми перечисленными выше методами. Наиболее удобным способом практического осуществления регулирования является воздействие на параметры реактивных элементов.

Для общности дальнейшего рассмотрения приведем (9) к безразмерному виду, введя величины:  $\alpha = g/b_{L\beta}$ ,  $\beta = b'_{c\beta}/b_{L\beta}$  и  $\gamma = \text{atg}\varphi$ . Подставив эти значения в (9), получим выражение для его модуля:

$$K^2_U = (1 - [\beta^2 + \gamma]^2) + \alpha^2. \quad (10)$$

Расчетные соотношения для определения реактивных мощностей и напряжений элементов трансформирующего устройства, выраженные через безразмерные параметры, имеют следующий вид [4]:

$$Q_L = P \left[ \frac{\alpha^2 + (\beta_{\max} - \gamma)^2}{\alpha} \right] = \\ = P \left[ \frac{1 + K^2_{U \min} - 2\sqrt{K^2_{U \min} - \alpha^2}}{\alpha} \right]; \quad (11a)$$

$$U_L = \frac{U}{K_U} \sqrt{\alpha^2 + (\beta_{\max} - \gamma)^2}; \quad (11б)$$

$$Q_C = P \frac{\beta_{\max}}{\alpha} = \\ = P \left[ \frac{(1 + \gamma) - \sqrt{K^2_{U \min} - \alpha^2}}{\alpha} \right]; \quad (11в)$$

$$U_C = \frac{U}{K_U}. \quad (11г)$$

Здесь  $P$  — активная мощность нагрузки;  $U$  — напряжение питающей сети, а  $K_{U \min}$  — минимальное расчетное значение  $K_U$ .

Соотношения (11) не дают возможности определить расчетные значения мощностей элементов исполнительного органа однозначно, так как входящие в них величины взаимосвязаны. Достиж однозначности можно лишь при определенных условиях. В простейшем случае условный минимум суммарной расчетной мощности обоих реактивных элементов исполнительного органа может быть получен из выражений (11a) и (11в) при использовании (10) как уравнения связи [4]. При этом

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{\text{опт}} &= \sqrt{K^2_{U \min} - (1 - \beta_{\text{опт}})^2}; \\ \beta_{\text{опт}} &= \frac{2(1 - K^2_{U \min})}{2 + K^2_{U \min}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь  $\beta_{\text{опт}} = \beta_{\max} - \gamma$ , так как при расчете должна быть учтена реактивная мощность конденсаторной батареи компенсации реактивной составляющей нагрузки.

Безразмерные параметры дают возможность определить также и коэффициент мощности такого индуктивно-емкостного трансформирующего устройства:

$$\cos \varphi = \cos \text{arctg} \left( \frac{\alpha^2 + \beta^2 - \beta}{\alpha} \right), \quad (13)$$

который, как это следует из (13), не зависит от реактивной мощности нагрузки, а определяется только режимом работы установки.

Соотношения (10) — (13) характеризуют работу идеализированного индуктивно-емкостного трансформатора. При проектировании подобных устройств для промышленного изготовления они могут быть использованы на первом этапе для ориентировочных оценок устанавливаемых мощностей элементов и технико-экономических показателей установки. На втором этапе

проектирования для определения конструктивных данных элементов исполнительного органа следует использовать более полную схему замещения.

В настоящее время в промышленных установках широко используется регулирование выходного напряжения традиционных трансформирующих устройств при помощи управляемой конденсаторной батареи, подключенной к выходным зажимам [6]. Такое подключение, как следует из схемы рис. 2,а преобразует традиционный трансформатор в управляемый индуктивно-емкостный. Следует при этом подчеркнуть, что подобное непосредственное регулирование выходного напряжения трансформатора простым изменением емкостной составляющей его нагрузки, приводит к весьма далекому от оптимальных для индуктивно-емкостной системы режимам работы как в смысле устанавливаемой для этого мощности конденсаторной батареи, так и в смысле использования установленной мощности самого трансформатора. Приближение подобных регулирующих систем к оптимуму, определяемому соотношениями (12) или иным критерием оптимальности [4], может быть достигнуто путем введения дополнительной управляемой или неуправляемой серийной индуктивности. Это мероприятие позволяет существенно снизить как устанавливаемую мощность конденсаторной батареи, требуемой для обеспечения заданной глубины регулирования уровня выходного напряжения, так и общую установленную мощность элементов исполнительного органа управляемой трансформирующей системы.

Для ориентировочной оценки технико-экономических перспектив практической реализации индуктивно-емкостных управляемых трансформаторов был выполнен расчет устанавливаемых мощностей дополнительных элементов и весовых показателей таких устройств, построенных на базе промышленной серии трансформаторов ТСЗ. Управляемые трансформирующие устройства предназначены для автоматического поддержания постоянным выходного напряжения при его изменении в питающей сети 10 кВ в пределах  $\pm 10\%$ , а также при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения. Результаты расчета (см. таблицу) для упрощенной Г-образной схемы замещения трансформатора без учета потерь в серийных ветвях позволяют сделать вывод о перспективности выбранного направления решения проблемы регулирования трансформаторов под нагрузкой.

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства работает ряд промышленных стабилизирующих установок индуктивно-емкостной системы, общая установленная мощность которых достигает многих мегаватт. Установки представляют собою распределительные подстанции, трансформаторы которых оснащены дополнительными реакторами и управляемыми косинусными конденсаторными батареями. Они поддерживают на стороне 0,4 кВ неизменный уровень напряжения во всех режимах, не выходящий за пределы  $\pm 1,5\%$  установленного номинала, и позволяют наряду с существенной экономией электроэнергии ликвидировать ущерб, наносимый ранее низким ее качеством.

В заключение отметим, что технико-экономические показатели индуктивно-емкостных трансформирующих устройств высоки. Собственные потери энергии в них лишь немного превышают номинальные потери в самих трансформаторах, а с учетом неизменности

Тип трансформатора	Установленная мощность, кВ·А	Масса, кг	$u_k, \%$	$I_0, \%$	$Q_C, \text{квар}$	$Q_0, \text{квар}$	$Q_{к.б'}, \text{квар}$	$Q_{L'}, \text{квар}$	$Q_{\lambda'}, \text{квар}$	$Q_{P'}, \text{квар}$	Масса		Масса присоединения, кг	$k_M$	$k_H$	$k_y$	$\cos \varphi / \text{tg } \varphi$	
											$Q_{к.б'}, \text{кг}$	$Q_{P'}, \text{кг}$					установки	
																	$u_{\min}$	$u_{\max}$
ТСЗ 160/10—65	160	1290	5,5	4,0	101	11,1	112	68	15,2	53	224	267	491	1,38	0,77	2,03	} 0,97/—0,27	} 0,94/0,33
ТСЗ 250/10—65	250	1630	"	3,5	158	15,1	173	106	23,8	82	346	373	719	1,44	0,77	2,02		
ТСЗ 400/10—65	400	2270	"	3,6	252	20,1	272	169	38	131	545	531	1076	1,48	0,77	2,01		
ТСЗ 630/10—65	630	3220	"	3,0	397	32,7	430	266	60	206	860	747	1607	1,5	0,77	2,01		
ТСЗ 1000/10—65	1000	4470	"	2,5	630	43	673	424	95	329	1352	1056	2408	1,54	0,77	2,0		
ТСЗ 1600/10—65	1600	6220	"	2,5	1008	69	1077	678	152	526	2155	1503	3658	1,59	0,77	2,0		

напряжения на зажимах трансформатора и нагрузки, а также высокого коэффициента мощности, общие годовые потери энергии оказываются более низкими. Наряду с техническими удобствами осуществления регулирования и высокой надежностью, устройства этого типа способны, как отмечено выше, оказывать комплексное воздействие на качество электроэнергии в системе, позволяя обеспечить его нормы, превышающие требования ГОСТ 13109—67 по точности поддержания уровня и симметрии системы напряжений, улучшая также и их гармонический состав [4]. Эти устройства при наличии соответствующего регулирования позволяют воздействовать на уровень и характер потребляемой реактивной мощности. При их помощи можно решать многоцелевые задачи оптимизации процесса электроснабжения промышленных предприятий и их взаимодействия с питающей энергосистемой. Трансформирующие устройства индуктивно-емкостной системы, являясь альтернативой трансфор-

маторам, оборудованным РПН, превосходят их по надежности, быстродействию, а также по реализуемым возможностям воздействия на систему электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. — М.: Энергия, 1964, ч. 1.
2. Бамдас А. М., Кулинич В. А., Шапиро С. В. Статические электромагнитные преобразователи частоты и числа фаз. — М.: Госэнергоиздат, 1961, ч. 1.
3. Милых А. Н., Кубышин Б. Е., Волков И. Е. Индуктивно-емкостные преобразователи. — Киев: Наукова думка, 1964.
4. Кулинич В. А. Резонансные стабилизаторы напряжения. — ЭП. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы и силовые конденсаторы, 1970, вып. 3.
5. Кулинич В. А., Неклюдов В. П. Универсальные симметрирующие устройства. — ЭП. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы и силовые конденсаторы, 1970, вып. 3.
6. Аберсон М. Л. Оптимизация регулирования напряжения. — М.: Энергия, 1975.

[11.03.81]

УДК 621.313.322.018.782.3:62-5

## Управление переходным процессом синхронного генератора кратковременного действия

САБЛИН А. Д., инж., ХОДЖАЕВ К. Ш., доктор физ.-мат. наук  
РСФСР, Ленинград

**Постановка задачи.** В настоящее время технически актуально использование синхронных генераторов, в особенности турбогенераторов, в кратковременных нестационарных режимах [1]. Примером может служить рассматриваемая далее машина, работающая за счет кинетической энергии предварительно раскрученного маховика, механически связанного с ротором.

Эта машина работает следующим образом. Вначале ротор и маховик раскручиваются вспомогательным двигателем при разомкнутых цепях возбуждения и нагрузки генератора до угловой скорости, близкой к номинальной. Затем замыкается цепь возбуждения и по окончании переходного процесса в ней к генератору подключается нагрузка. В последующем рабочем процессе вследствие потребления мощности в нагрузке уменьшается кинетическая энергия маховика и ротора и падает их угловая скорость. Рабочий процесс продолжается, пока угловая скорость не уменьшится до заданного значения, например, не упадет вдвое.

Виды нагрузки и способы ее подключения к генератору могут быть различными [1]. Далее рассматривается наиболее простой и в то же время технически интересный случай симметричной активно-индуктивной нагрузки. Активное сопротивление нагрузки предполагается того же порядка, что и индуктивное сопротивление статорных обмоток генератора. Индуктивное сопротивление нагрузки может быть любым от нуля до значения активного сопротивления.

При постоянном напряжении возбуждения активная мощность в нагрузке изменяется из-за переходных электромагнитных процессов и уменьшения угловой скорости. Но такое «самопроизвольное» изменение мощности не всегда допустимо. В ряде случаев требуется, чтобы мощность во время рабочего процесса поддерживалась постоянной или изменялась по заданному закону. Этого можно добиться регулированием напряжения возбуждения, но нужно найти требуемый закон регулирования.

При заданном значении нагрузки ток в ней, напряжение статора и мощность однозначно связаны

между собой, поэтому решение задачи о поддержании заданной мощности дает одновременно и решение задачи о поддержании тока и напряжения.

**Уравнения медленных переходных процессов.** Длительность рабочего процесса в рассматриваемых машинах примерно равна постоянной времени обмотки возбуждения или бо́льшая. Такие режимы достаточно точно описываются уравнениями медленных переходных процессов, полученных в [2] из уравнений Парка—Горева асимптотическим отделением быстрых процессов от медленных. Быстрыми считаются процессы, затухающие на промежутке времени, малом по сравнению с постоянными времени демпферных контуров.

Уравнения медленных процессов в безразмерных переменных запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_l}{dt} + \nu_{ll}(\omega) \Psi_l - \nu_{lp}(\omega) \Psi_p &= \alpha_f \nu_f e_f; \\ \frac{d\Psi_p}{dt} + \nu_{pl}(\omega) \Psi_l + \nu_{pp}(\omega) \Psi_p &= 0; \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{m_\omega \omega}{\Delta^2(\omega)} \left[ \left( \Psi_l + \frac{\omega}{\omega_d} \Psi_p \right)^2 + \left( \Psi_p - \frac{\omega}{\omega_q} \Psi_l \right)^2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $t$  — время;  $\omega$  — угловая скорость;  $e_f$  — напряжение возбуждения;  $\Psi_l, \Psi_p$  — потокосцепления обмотки возбуждения и поперечного демпферного контура, связанные с токами статора  $i_d, i_q$ , током возбуждения  $i_f$  и демпферными токами  $i_t, i_k$ , соотношениями

$$\Psi_l = i_d + i_f + i_t; \quad \Psi_p = i_q + i_k. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнений (1) выражаются через введенные в [2] безразмерные параметры  $\nu_f, \nu_t, \nu_k, \sigma_d, \sigma_q, \omega_d, \omega_q, m_d, m_q$  с помощью соотношений:

$$\alpha_f = \nu_f / (\nu_f + \nu_t); \quad m_\omega = m m_d; \quad \Delta(\omega) = \omega^2 + \omega \omega_d;$$

$$\nu_{ll}(\omega) = \alpha_f \nu_f (1 + \omega^2 / \sigma_d \Delta); \quad \nu_{lp}(\omega) = \alpha_f \nu_f \omega_q \omega / \sigma_d \Delta;$$

$$\nu_{pl}(\omega) = \nu_k \omega_d \omega' \sigma_q \Delta; \quad \nu_{pp}(\omega) = \nu_k (1 + \omega^2 / \sigma_q \Delta).$$

Параметры  $\nu_f, \nu_t, \dots, m_d$  зависят от базисных значений времени  $t^*$ , угловой скорости  $\omega^*$  и продольного тока статора  $i_d^*$  (см. [2]). Конкретизируя [2], возьмем за  $t^*$  постоянную времени поперечного демпферного контура, а в качестве  $\omega^*, i_d^*$  примем номинальные угловую скорость и ток статора. После этого параметры  $\nu_f, \nu_t$  и т. д. можно вычислить по соотношениям, приведенным в [2], исходя из размерных параметров машины (индуктивностей в Гн, сопротивлений в Ом и т. д.). Однако обычно удобнее использовать для вычисления указанных величин безразмерные параметры машины, поэтому приведем выражения  $\nu_f, \nu_t, \dots, m_d$  через безразмерные индуктивности и сопротивления в системе « $x_{ad}$ ». В этой системе уравнения Парка—Горева имеют вид (см. например, [3 и 4]):

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{d\tau} - \omega \Psi_q + r_{\text{н}} i_d &= 0; \quad \frac{d\Psi_q}{d\tau} + \omega \Psi_d + r_{\text{н}} i_q = 0; \\ \frac{d\Psi_f}{d\tau} + r_f i_f &= u_f; \quad \frac{d\Psi_k}{d\tau} + r_k i_k = 0; \\ \frac{d\Psi_t}{d\tau} + r_t i_t &= 0; \quad H_j \frac{d\omega}{d\tau} = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d; \\ \Psi_d &= (x_{ad} + x_{\text{н}}) i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_t; \\ \Psi_q &= (x_{aq} + x_{\text{н}}) i_q + x_{aq} i_k; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_f &= x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_t; \quad \Psi_k = x_{aq} i_q + x_k i_k; \\ \Psi_t &= x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_t i_t. \end{aligned} \right\}$$

В уравнениях (3) индуктивность рассеяния и активное сопротивление обмотки якоря включены соответственно в индуктивное  $x_{\text{н}}$  и активное  $r_{\text{н}}$  сопротивления нагрузки. Тогда

$$\begin{aligned} \nu_f &= r_f x_k / r_k x_{ad}; \quad \nu_t = r_t x_k / r_k x_{ad}; \quad \nu_k = 1; \\ \omega_d &= r_{\text{н}} / x_{\text{н}}; \quad \omega_q = r_{\text{н}} / x_{\text{н}} k_\sigma; \quad k_\sigma = 1 + (x_k - x_{aq}) x_{aq} / x_k x_{\text{н}}; \\ \sigma_d &= x_{\text{н}} / x_{ad}; \quad \sigma_q = x_{\text{н}} x_k k_\sigma / x_{aq}^2; \\ m_\omega &= r_{\text{н}} x_k \omega_d \omega_q^2 / H_j r_k \sigma_d. \end{aligned}$$

Время  $t$  в (1) и  $\tau$  в (3) связаны соотношением  $t = (r_k / x_k) \tau$ , а напряжения возбуждения  $e_f$  и  $u_f$  соотношением  $e_f = u_f / r_f$ . Токи  $i_d, i_f, i_t$  в (2) совпадают с одноименными величинами в (3), а токи  $i_q, i_k$  в (2) получаются соответственно из токов  $i_q, i_k$  в (3) умножением на коэффициенты  $x_{aq}^2 / x_{ad} x_k$  и  $x_{aq} / x_{ad}$ .

Далее используется выражение для медленной составляющей активной мощности в нагрузке

$$N_s = \frac{m_n \omega^2}{\Delta^2(\omega)} \left[ \left( \Psi_l + \frac{\omega}{\omega_d} \Psi_p \right)^2 + \left( \Psi_p - \frac{\omega}{\omega_q} \Psi_l \right)^2 \right]; \quad m_n = \frac{\omega_q^2}{\sigma_d^2}. \quad (4)$$

Этому соответствует базисная мощность  $N^* = N_{\text{н}} x_{ad}$ ,  $N_{\text{н}}$  — номинальная мощность генератора.

**Медленные процессы при регулировании возбуждения с целью поддержания заданной мощности.** Рассмотрим изменение активной мощности в течение рабочего процесса. В момент включения нагрузки тока статора  $i_d, i_q$  и, следовательно, мощность равны нулю. Затем за время, малое по сравнению с постоянными времени демпферных контуров, происходят и заканчиваются быстрые процессы. При этом медленные переменные  $\omega, \Psi_l, \Psi_p$  практически сохраняют свои начальные значения. По завершении быстрых процессов мощность и токи статора становятся и в дальнейшем остаются [2] практически равными их медленным составляющим  $N_s, i_{ds}, i_{qs}$ , которые выражаются через величины  $\omega, \Psi_l, \Psi_p$ . Аналогично изменяются и остальные токи  $i_f, i_t, i_k$ .

Для воздействия на быструю составляющую мощности требуются [2] весьма большие и быстрые изменения напряжения возбуждения. Но, даже допуская такие трудно реализуемые законы управления  $e_f(t)$ , можно лишь несколько сократить интервал времени, в течение которого мощность «выходит» с нулевого на заданное значение. Вообще же «уничтожить» этот интервал нельзя, поэтому рассмотрение и практическое использование быстрых управлений нецелесообразно.

Таким образом, при управлении мощностью можно основываться на уравнениях медленных процессов. В итоге приходим к задаче: найти неизвестные функции  $\omega(t), \Psi_l(t), \Psi_p(t)$  и  $e_f(t)$ , удовлетворяющие уравнениям (1) и соотношению

$$N_s(\omega, \Psi_l, \Psi_p) = N(t). \quad (5)$$

Здесь функция  $N_s$  описывается выражением (4), а  $N(t)$  — требуемый закон изменения мощности.

Полученная в результате решения этой задачи зависимость  $e_f(t)$  обеспечит заданное изменение мощности в течение всего рабочего процесса, исключая малый интервал времени после включения нагрузки.

Начальные значения переменных  $\Psi_l$ ,  $\Psi_p$  определяются [см. (2)] значениями токов до включения нагрузки, из которых только  $i_f \neq 0$ , поэтому  $\Psi_l(0) = i_f$ ,  $\Psi_p(0) = 0$  (индексом «-» отмечаются значения величин на режиме холостого хода). Начальное значение угловой скорости задано:  $\omega(0) = \omega_-$ , а значение  $e_f(0)$  находится в ходе решения задачи.

Установить значение  $\Psi_l(0)$  можно, задавая напряжение  $e_{f-}$ . Эти величины связаны соотношением  $\Psi_l(0) = i_{f-} = e_{f-}$ , откуда, используя (4), (5) и принимая  $i_{f-} > 0$ , получим

$$e_{f-} = \frac{\omega_q \Delta(\omega_-)}{\omega_-} \sqrt{\frac{N(0)}{m_n(\omega_q^2 + \omega_-^2)}} \quad (6)$$

Значения  $e_{f-}$  и  $e_f(0)$ , вообще говоря, не совпадают, поэтому в момент включения нагрузки напряжение возбуждения должно быть изменено скачком от значения  $e_{f-}$  до  $e_f(0)$ . Практически это изменение можно производить непрерывным образом за время до момента окончания быстрых переходных процессов.

Решение сформулированной задачи сводится к интегрированию одного дифференциального уравнения первого порядка. Сравнивая выражение (4) для  $N_s$  с правой частью последнего уравнения (1) и используя (5), запишем это уравнение в виде

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T} \frac{N(t)}{\omega}; \quad T = m_n/m_\omega \quad (7)$$

Интегрируя (7), найдем зависимость  $\omega(t)$ :

$$\omega^2 = \omega_-^2 - \frac{2}{T} \int_0^t N(\tau) d\tau \quad (8)$$

Далее из соотношения (5) с учетом (4) можно выразить одну из переменных  $\Psi_l$ ,  $\Psi_p$  через другую и  $\omega$ . Удобнее выразить  $\Psi_l$ :

$$\Psi_l = a(\omega) \Psi_p + \sqrt{b(\omega) N(t) - c(\omega) \Psi_p^2} \quad (9)$$

Здесь

$$a(\omega) = \sigma_{dq} \omega_q \omega' / \Delta_q(\omega); \quad \sigma_{dq} = 1 - \omega_q' / \omega_d;$$

$$b(\omega) = \Delta^2(\omega) / \omega^2 \Delta_q(\omega); \quad \Delta_q(\omega) = \omega^2 + \omega_q^2;$$

$$c(\omega) = \omega^2 \Delta_d(\omega) / \omega^2 \Delta_q(\omega) - a^2(\omega); \quad \Delta_d(\omega) = \omega^2 + \omega_d^2.$$

Знак перед радикалом в (9) выбран в соответствии с (6). Подставляя  $\Psi_l$  из (9) во второе уравнение (1), приходим к уравнению для переменной  $\Psi_p$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_p}{dt} &= -d(\omega) \Psi_p - \nu_{pl}(\omega) \sqrt{b(\omega) N(t) - c(\omega) \Psi_p^2}, \\ d(\omega) &= \nu_{pp}(\omega) + a(\omega) \nu_{pl}(\omega) \end{aligned} \right\} (10)$$

с начальным условием  $\Psi_p(0) = 0$ .

Затем из (9) получается соответствующая зависимость  $\Psi_l(t)$ . Искомый закон  $e_f(t)$  найдется после этого из первого уравнения (1):

$$e_f = g(\omega) \Psi_l - h(\omega) \Psi_p - \frac{1}{\alpha_f \nu_f} \frac{d\Psi_l}{dt} \quad (11)$$

Здесь  $g(\omega) = 1 + \omega^2 / \sigma_d \Delta(\omega)$ ;  $h(\omega) = \omega_q \omega / \sigma_d \Delta(\omega)$ , а производная  $d\Psi_l/dt$  определяется из (9):

$$\frac{d\Psi_l}{dt} = \frac{\partial \Psi_l}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial \Psi_l}{\partial \Psi_p} \frac{d\Psi_p}{dt} + \frac{\partial \Psi_l}{\partial N} \frac{dN}{dt} \quad (12)$$

В выражении (12) производная  $dN/dt$  — известная функция времени, а производные  $d\omega/dt$ ,  $d\Psi_p/dt$  с помощью (7) и (10) выражаются через  $\omega(t)$ ,  $\Psi_p(t)$ ,

$N(t)$ . Частные производные  $\Psi_l$  в (12) связаны с  $\omega$ ,  $\Psi_p$ ,  $N$  соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Psi_l}{\partial \omega} &= -a_1(\omega) \Psi_p - a_2(\omega) r(\omega) N + a_3(\omega) r(\omega) \Psi_p^2; \\ \frac{\partial \Psi_l}{\partial \Psi_p} &= a(\omega) - c(\omega) r(\omega) \Psi_p; \quad \frac{\partial \Psi_l}{\partial N} = \frac{1}{2} b(\omega) r(\omega); \\ r(\omega) &= [b(\omega) N(t) - c(\omega) \Psi_p^2]^{1/2}, \end{aligned} \right\} (13)$$

где

$$a_1(\omega) = \sigma_{dq} \omega_q (\omega^2 - \omega_q^2) / \Delta_q^2(\omega);$$

$$a_2(\omega) = \sigma_d^2 \omega_d \omega_q (1 + \sigma_{dq} \omega^2 / \Delta_q) \Delta(\omega) / \omega^3 \Delta_q(\omega);$$

$$a_3(\omega) = 2\sigma_{dq} \omega_q^2 (1 - \sigma_{dq} \omega^2 / \Delta_q) \omega^2 / \Delta_q^2(\omega).$$

Таким образом, решение задачи о поддержании мощности сводится к интегрированию уравнения (10), выполняемому в общем случае численно. При этом целесообразно одновременно интегрировать уравнение (7); это удобнее, чем вводить в ЭВМ зависимость  $\omega(t)$  из (8).

**Численный анализ переходных процессов.** Численное интегрирование уравнения (10) с последующим определением медленных составляющих токов и потокоцеплений было проведено в практически наиболее интересном случае, когда требуется поддерживать мощность генератора постоянной,  $N(t) = \text{const}$ .

Вычисления были выполнены для ряда серийных турбогенераторов различной мощности. Несмотря на существенное различие мощностей, безразмерные параметры машин оказываются близкими. Соответственно близкими получаются и зависимости безразмерных переменных в переходном процессе. Приведем поэтому результаты расчетов для одного турбогенератора с параметрами:  $x_d = 2,15$ ;  $x_{ad} = 2,05$ ;  $x_f = 2,1$ ;  $x_t = 2,08$ ;  $x_q = 1,93$ ;  $x_h = 1,86$ ;  $x_{aq} = 1,84$ ;  $r_f = 1,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $r_t = r_h = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ;  $H_f = 34$ .

Заданная мощность принималась равной номинальной мощности машины,  $N_s/r_n = 1$ . Зависимости напряжения возбуждения для нагрузок с параметрами  $r_n = 1$  и различными  $x_n$  приведены на рис. 1. Зависимости  $i_{fs}(t)$ ,  $\Psi_l(t)$ ,  $\Psi_p(t)$ ,  $i_{ds}(t)$ ,  $i_{qs}(t)$ ,  $\omega(t)$ , соответствующие кривой 1 рис. 1, показаны на рис. 2; токи при этом рассчитывались по соотношениям (11) в [2].

Как видно из рис. 1, напряжение возбуждения на режиме холостого хода должно быть равным  $e_{f-}$ , см. (6). Сразу после включения нагрузки  $e_f$  следует изменить до значения  $e_f(0)$ . Затем наступает «провал» напряжения возбуждения, отсутствующий в токе возбуждения; в дальнейшем  $e_f$  возрастает.

Описанные свойства закона управления согласуются с известными [5, с. 115] зависимостями  $e_f(t)$ , реализуемыми быстродействующим регулятором при набросе нагрузки.

Проверка полученных результатов осуществлялась интегрированием исходных уравнений Парка — Горева при найденном законе  $e_f(t)$ . Расчеты показали, что отличие токов и мощности от медленных составляющих становится малым (3—4% в токах и 6% в мощности) уже через 0,03 отн. ед. времени после включения нагрузки. При больших временах отклонения уменьшаются.

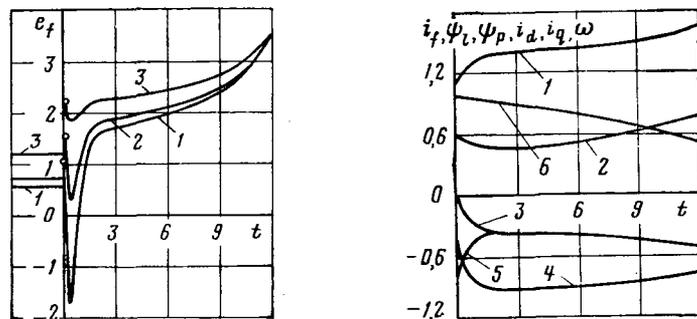


Рис. 1. Изменение напряжения возбуждения, обеспечивающее  $N_s = \text{const}$ :

1 —  $x_n = 0,5$ ; 2 —  $x_n = 1$ ; 3 —  $x_n = 2$

Рис. 2. Переходный процесс при  $N_s = \text{const}$ :

1 —  $i_{fs}(t)$ ; 2 —  $\Psi_l(t)$ ; 3 —  $\Psi_p(t)$ ; 4 —  $i_{ds}(t)$ ; 5 —  $i_{qs}(t)$ ; 6 —  $\omega(t)$

Для выяснения причины возникновения «провала» в законе был рассчитан переходный процесс при  $\omega=1=\text{const}$ ,  $e_f=e_f-\text{const}$ . Значение  $e_f-$  определялось согласно (6) из условия  $N_s(0)/r_n=1$ . Соответствующие зависимости для нагрузки  $r_n=1$ ,  $x_n=0$  приведены на рис. 3. Там же указан закон  $e_f(t)$  при  $N_s=1$  и  $\omega=1$ . При  $e_f=\text{const}$  кривая  $N_s(t)$  в начале процесса имеет подъем, для «уничтожения» которого и требуется резкое уменьшение напряжения возбуждения.

Подъем мощности связан с «особенным» начальным значением  $\Psi_p(0)=0$ , которое сильно отличается от установившегося значения  $\Psi_p$  при  $e_f=\text{const}$ ,  $\omega=\text{const}$ . Начальное же значение  $\Psi_i$  ближе к установившемуся, поэтому после включения нагрузки  $|\Psi_p|$ , стремясь к установившемуся значению, возрастает быстрее, чем уменьшается  $\Psi_i$ . В результате уменьшение  $\Psi_i$  не компенсирует увеличение  $|\Psi_p|$  и мощность возрастает. В дальнейшем скорость роста  $|\Psi_p|$  падает, этот рост компенсируется падением  $\Psi_i$  и мощность снижается до установившегося значения.

Отсюда следует, что при  $\Psi_p(0) \neq 0$  можно получить плавный, без резких провалов закон  $e_f(t)$ . Задать же начальное значение  $\Psi_p(0) \neq 0$  можно, установив на роторе по оси  $q$  еще одну обмотку возбуждения (см. [4]) или вспомогательную обмотку на статоре. Уравнения медленных процессов машины с двумя обмотками возбуждения приведены в [2].

Дальнейшее разделение процессов при малых постоянных времени демпферных контуров. Если постоянные времени демпферных контуров значительно меньше постоянной времени обмотки возбуждения, уравнения (1) можно упростить. В этом случае  $v_h$ ,  $v_t$  оказываются существенно больше, чем  $v_f$ ,  $m_\omega$ . В результате переменная  $\Psi_p$  будет быстрой и ее можно асимптотически отделить от медленных  $\omega$  и  $\Psi_i$ . В первом приближении это выполняется следующим образом. Считая  $\omega$  и  $\Psi_i$  постоянными, интегрируем второе уравнение (1), получим

$$\Psi_p = C \exp(-v_{pp}t) - v_{pi}\Psi_i/v_{pp}, \quad C = \text{const}. \quad (14)$$

Подставим  $\Psi_p$  из (14) в первое и третье уравнения (1) и возьмем среднее по времени  $t$ , что в данном случае сводится к отбрасыванию члена с экспонентой. Придем к уравнениям

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = v_f [e_f - d_1(\omega)\Psi_i]; \quad \frac{d\omega}{dt} = -v_f d_2(\omega)\Psi_i^2. \quad (15)$$

Здесь  $d_1(\omega)$ ,  $d_2(\omega)$  определяются соотношениями:

$$d_1(\omega) = 1 + (1 + \sigma_q^{-1})\omega^2/\sigma_d \Delta_1(\omega); \quad \Delta_1(\omega) = \Delta + \omega^2 \sigma_q^{-1};$$

$$d_2(\omega) = n_\omega [\omega^2 + (1 + \sigma_q^{-1})^2 \omega^2]/\sigma_d^2 \Delta^2; \quad n_\omega = m_\omega/m_n v_f.$$

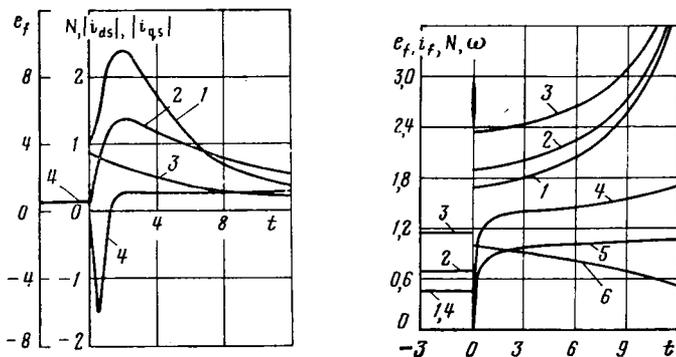


Рис. 3. Мощность и токи при  $e_f$ ,  $\omega=\text{const}$  и напряжение возбуждения, обеспечивающее  $N_s=\text{const}$  при  $\omega=\text{const}$ : 1— $N_s(t)$ ; 2— $i_a(t)$ ; 3— $i_q(t)$ ; 4— $e_f(t)$

Рис. 4. Напряжение возбуждения при  $N_s=\text{const}$  (кривые 1—3) ток возбуждения, мощность и угловая скорость (кривые 4—6), рассчитанные по уравнениям Парка—Горва.

Второе уравнение (15) можно также записать, используя выражение (4) для мощности,

$$\frac{d\omega}{dt} = -v_f n_\omega \sigma_d^2 N_c / \omega; \quad N_c = \frac{\omega^2 [\omega^2 + (1 + \sigma_q^{-1})^2 \omega^2] \Psi_i^2}{\sigma_d^2 \Delta^2(\omega)}. \quad (16)$$

Здесь  $N_c$  — «самая медленная» составляющая активной мощности в нагрузке.

Выражение для  $N_c$  получается, если принять в соотношении (4)  $\Psi_p = -v_{pi}\Psi_i/v_{pp}$ .

Уравнениям (15) соответствует следующее представление о переходных процессах в машине. После затухания самых быстрых процессов продолжается и заканчивается процесс с постоянной времени, близкой к постоянной времени демпферного контура в поперечной оси. При этом  $\Psi_i$  и  $\omega$  изменяются мало и их можно приближенно считать постоянными. После затухания указанного процесса переменная  $\Psi_p$  принимает значение, равное своей медленной составляющей  $\Psi_{pc} = -v_{pi}\Psi_i/v_{pp}$ . Далее  $\Psi_i$  и  $\omega$  изменяются в соответствии с уравнениями (15), а остальные величины остаются примерно равными их самым медленным составляющим, являющимся функциями  $\omega$  и  $\Psi_i$ .

Принятое в настоящем разделе предположение, что  $\Psi_p$  есть быстрая переменная по сравнению с  $\omega$ ,  $\Psi_i$  не противоречит предположению о том, что  $\Psi_p$  можно считать медленной переменной при отделении первоначальных быстрых процессов. Уравнения (1), полученные после отделения этих процессов, остаются справедливыми и при малых  $v_f$ ,  $m_\omega$ .

**Управление самой медленной составляющей мощности.** В случаях, когда допустимо отличие мощности от заданной во время затухания процессов в демпферных контурах, можно ограничиться поддержанием самой медленной составляющей мощности  $N_c$ .

В результате приходим к задаче: найти зависимости  $\Psi_i(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $e_f(t)$  из уравнений (15), (16) и соотношения  $N_c=N(t)$ .

Задача решается следующим образом. Как и ранее, из первого уравнения (16) определяется квадратурой зависимость  $\omega(t)$ . После этого из второго соотношения (16) находится  $\Psi_i(t)$ :

$$\Psi_i = \frac{\sigma_d \Delta_1(\omega)}{\omega} \sqrt{\frac{N(t)}{\omega^2 + (1 + \sigma_q^{-1})^2 \omega^2}}. \quad (17)$$

Затем из первого уравнения (15) определяется закон  $e_f(t)$ :

$$e_f(t) = d_1(\omega)\Psi_i(t) + v_f^{-1} \frac{d\Psi_i}{dt}. \quad (18)$$

Значения напряжения возбуждения до и после включения нагрузки определяются соотношениями:

$$e_{f-} = \Psi_i(0); \quad e_f(0) = d_1(\omega_-)\Psi_i(0) + v_f^{-1} \left( \frac{d\Psi_i}{dt} \right)_{t=0}. \quad (19)$$

Первое значение  $e_{f-}$  устанавливается до включения нагрузки, чтобы получить необходимое значение  $\Psi_i(0)$  и  $N_c(0)$ . Второе значение  $e_f(0)$  определяет напряжение возбуждения после включения нагрузки. Переход от  $e_{f-}$  к  $e_f(0)$  с рассматриваемой точностью можно выполнять произвольным образом за время затухания быстрых процессов.

Законы изменения напряжения возбуждения, рассчитанные по соотношениям (17)—(19) для тех же условий, что и зависимости рис. 1, приведены на рис. 4, кривые 1—3. Там же приведены зависимости

тока возбуждения, мощности и угловой скорости (кривые 4—6) от времени, соответствующие кривой 1 рис. 4 и найденные при численном интегрировании уравнений Парка — Горева.

Как видно из рис. 4, найденные законы  $e_f(t)$  оказываются достаточно плавными и более удобными для реализации, но это преимущество достигается за счет значительного увеличения времени, в течение которого мощность отлична от заданной.

Следует обратить внимание на соотношение (11). Здесь переменная  $\Psi_i$ , вычисляемая из (9), является функцией времени  $t$ , но не «медленного» времени  $\nu_f t$ , как в (18), поэтому при достаточно малых  $\nu_f$  третий член в правой части (11) будет равен примерно  $1/\nu_f$ , т. е. большим. Соответственно, найденные по (11) значения  $|e_f(t)|$  во время затухания переходных процессов в демпферных контурах должны примерно в  $1/\nu_f$  раз превосходить значения  $|e_f(t)|$  по окончании указанных процессов.

Однако приведенные выше результаты расчетов (кривые 1—3 на рис. 1) указывают, что при реальных значениях параметров машины значения  $e_f$  в начале и в конце рабочего процесса примерно одного порядка. Это объясняется следующим. Хотя функция  $\Psi_p$  изменяется быстро, а  $\Psi_i$  выражается через  $\Psi_p$ , пределы изменения  $\Psi_i$  практически невелики, и производная  $d\Psi_i/dt$  оказывается такой же малой, что и  $\nu_f$ . Иначе говоря, соотношение (9) в практических случаях содержит неявно малый параметр порядка  $\nu_f$ . Таким образом, анализ соотношения (9) нужно проводить, учитывая конкретные значения параметров.

**О регулировании возбуждения.** Выше найден закон  $e_f(t)$  изменения напряжения возбуждения, обес-

печивающий заданное изменение мощности. Для реализации зависимости  $e_f(t)$  можно использовать замкнутую систему регулирования, включающую измеритель мощности и регулятор возбуждения. Однако такая система оказывается довольно сложной из-за принципиально нестационарного характера объекта регулирования.

Значительно более простой должна быть система программного регулирования, изменяющая напряжение возбуждения в соответствии с рассчитанным законом. Однако такой системе присущи ошибки, обусловленные погрешностью задания исходных параметров машины и т. п., поэтому оптимальной представляется комбинированная система, включающая программный регулятор и корректирующую замкнутую систему.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И. А., Кашарский Э. Г., Рутберг Ф. Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. — Л.: Наука, 1977.
2. Власов Е. Н., Саблин А. Д., Ходжаев К. Ш. Уравнения медленных переходных процессов синхронной машины. — Электричество, 1980, № 9.
3. Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. — М.; Л.: Госэнергиздат, 1960.
4. Вольдек А. И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1978.
5. Характеристики и режимы агрегатов электропитания с инерционными накопителями/ В. Н. Калганов, Э. Г. Кашарский, Н. Н. Кустов и др. — В кн.: Мощные генераторы низкотемпературной плазмы и методы исследования их параметров. — Л.: ВНИИЭлектромаш, 1977.

[28.04.82]

УДК 621.313.32.001.24

## Расчет токов в цепи дополнительной обмотки синхронной машины

АРУТЮНЯН В. С., канд. техн. наук  
Армянская ССР, Ереван

В синхронных машинах применяется авторегулируемое самовозбуждение от 3-й гармоники поля, в частности, реализованное в серии явнополюсных генераторов ОС мощностью до 100 кВт. В схему этих машин (рис. 1) входит основная якорная обмотка  $OO$  (рис. 1), обмотка возбуждения  $f$ , питаемая через выпрямитель от цепи дополнительной обмотки  $DO$  якоря с числом полюсов  $2p_{до} = 6p_{оо}$ .

В  $DO$  генерируются э. д. с. и мощность от 3-й гармоники поля (ЗГП), которые при должном проектировании с изменением нагрузки изменяются приемлемо для авторегулируемого самовозбуждения.

В [1] показано, что в магнитопроводе основной машины размещен также вентильный возбудитель — своеобразный синхронный генератор, у которого поток возбуждения двухосен и входит в общий поток как гармоническая составляющая; явнополюсность этого возбудителя слабее, чем основной машины.

Основы теории таких многообмоточных и разнополюсных совмещенных машин разработаны в [1]. Здесь дано их приложение к актуальной практической

задаче определения токов в цепи возбуждения в установившемся режиме.

1. Определение токов всей цепи  $DO$  рассмотрим для разомкнутой схемы (рис. 1), с независимым возбуждением (током  $I_f$ ), при  $DO$ , через выпрямитель подключенной к эквиваленту обмотки  $f$  (с током  $I_B$ ). Вентили выпрямителя идеальны и соединены по трехфазной мостовой схеме.

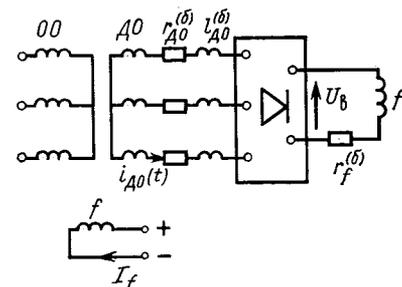


Рис. 1. Принципиальная схема машины с дополнительной обмоткой от ЗГП для авторегулируемого самовозбуждения

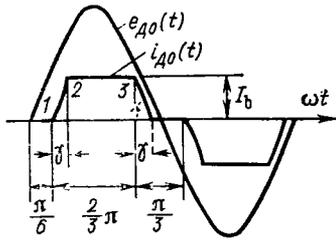


Рис. 2. Кривая тока в фазе дополнительной обмотки при работе на выпрямительную нагрузку

Рис. 3. Эквивалентная схема замещения цепи дополнительной обмотки с выпрямительной нагрузкой

В рассмотрении использованы только амплитуды напряжений, токов; напряжения, токи, сопротивления, индуктивности приведены в отн. ед. по [2].

Принимаются во внимание следующие особенности фазового тока  $i_{до}(t)$  (рис. 2).

1. Учтены участки междупазовой коммутации — углы  $\gamma$ , т. е. питание обмотки  $f$  рассматривается как от источника с неискаженной э. д. с. за коммутационной индуктивностью, отражающей трансформаторные связи с  $ДО$  при коммутации и обуславливающей значение  $\gamma$  (здесь  $\gamma=0-\pi/3$ ).

2. Учтена только основная гармоника тока  $ДО$  ( $\dot{I}_{до}$ ) (тройной частоты). Для э. д. с. холостого хода и неискаженной э. д. с. также рассматриваются только основные гармоники ( $\dot{E}_{до}$  и  $\dot{E}'_{до}$  соответственно); в выпрямленном токе пульсациями пренебрегается.

3. Учтен угол  $\psi_{до}$  между э. д. с.  $\dot{E}_{до}$  и током  $\dot{I}_{до}$ , обусловленный коммутацией.

В вентильном генераторе ток  $I_b$  определяется током  $\dot{I}_{до}$ , представляемым двумя составляющими по индукторным осям [3]. Эти два неизвестных могут быть определены решением системы из двух уравнений: одно уравнение определяет угол между векторами  $\dot{E}'_{до}$  и  $\dot{I}_{до}$ ; другое — отношение модулей этих векторов. При этом подходе аналитическое решение громоздко и недостаточно наглядно. Здесь же при учете специфики возбудителя  $I_b$  представляется в простой аналитической форме, притом из коммутационных показателей связанной лишь с углом  $\gamma$ . Результат получен замещением цепи с  $ДО$  (по рис. 1) схемой с эквивалентными элементами  $r_{до}^n$ ,  $l_{до}^n$  (по рис. 3), учитывающими нагрузку выпрямителя и особенности коммутации (1, 2, 3).

II. Токи и э. д. с. цепи  $ДО$  определяются преобразованными уравнениями ее напряжения в индукторных осях  $D-Q$  [1], сдвинутых между собой на  $90^\circ:3$  в поле 1-й гармонической (1ГП). Уравнение э. д. с.  $ДО$ , включенной на автономную нагрузку  $r_{до}^n$ ,  $l_{до}^n$  (рис. 3), в установившемся синхронном режиме по [4]:

$$\left. \begin{aligned} E_{доо-до} &= (r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n) I_D - 3(l_{до}^{(3)} + l_{до}^6 + l_{до}^n) I_Q; \\ -E_{qf оо-до} &= (r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n) I_Q + 3(l_{до}^{(3)} + l_{до}^6 + l_{до}^n) I_D. \end{aligned} \right\} (1)$$

В (1) продольная ( $D$ ) и поперечная ( $Q$ ) составляющие э. д. с.  $E_{до}$  тройной частоты, индуктированные в  $ДО$  токами  $OO$  и  $f$ , по [4] равны:

$$\left. \begin{aligned} E_{D оо-до} &= 3l_{Q оо-до}^{(3)} I_q; \\ E_{qf оо-до} &= 3l_{Df-до}^{(3)} I_f + 3l_{D оо-до}^{(3)} I_d. \end{aligned} \right\} (2)$$

В (1) и (2):  $I_f$  — ток возбуждения;  $I_d$ ,  $I_q$  — обычные продольная ( $d$ ) и поперечная ( $q$ ) составляющие тока  $IOO$  обмотки  $OO$ . Значения  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_f$  при автономной работе определены в [4];  $I_D$ ,  $I_Q$  — продольная ( $D$ ) и поперечная ( $Q$ ) составляющие тока  $I_{до}$ ;  $l_D^{(3)}$ ,  $l_Q^{(3)}$  — синхронные индуктивности  $ДО$  по ЗГП в осях  $D$  и  $Q$ ;  $r_{до}$ ,  $r_{до}^6$ ,  $r_{до}^n$  — активные сопротивления  $ДО$  (собственное, балластное и нагрузочное);  $l_{до}^6$ ,  $l_{до}^n$  — балластная и нагрузочная индуктивности  $ДО$ ;  $l_{доо-до}^{(3)}$ ,  $l_{доо-до}^{(3)}$  — взаимные индуктивности от  $OO$  к  $ДО$  по ЗГП в осях  $D$  и  $Q$ ;  $l_{Df-до}^{(3)}$  — взаимная индуктивность от  $f$  к  $ДО$  по ЗГП.

Из (1), учитывая пониженную степень явноплюсности для  $ДО$ , когда  $l_D^{(3)} \approx l_Q^{(3)} \approx 0,5(l_D^{(3)} + l_Q^{(3)}) = l_{до}$  имеем:

$$I_{до} \approx E_{до} [(r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n)^2 + 9(l_{до} + l_{до}^6 + l_{до}^n)^2]^{-1/2} = E_{до}/z_{до}; \quad (3)$$

$$\psi_{до} = \arg(\dot{E}_{до} \dot{I}_{до}) = \arctg \left[ \frac{3(l_{до} + l_{до}^6 + l_{до}^n)}{r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n} \right]. \quad (4)$$

Для учета особенностей выпрямления в (3) и (1) э. д. с.  $E_{до}$  и ее составляющие согласно [3] заменяются неискаженной э. д. с.  $E'_{до}$  с ее составляющими ( $E'_{D оо-до}$ ,  $E'_{Q оо-до}$ ); кроме того, индуктивности  $l_{до}$ ,  $l_D^{(3)}$ ,  $l_Q^{(3)}$  заменяются коммутационной  $l_{до}^k$ .

Таким образом,

$$I_{до} = E'_{до} / [(r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n)^2 + 9(l_{до}^k + l_{до}^6 + l_{до}^n)^2]^{-1/2} = E'_{до}/z'_{до}. \quad (3')$$

Составляющие  $I_{до}$  с использованием [4], равны:

$$\left. \begin{aligned} I_D &= (\cos \psi'_{до} E'_{D оо-до} - \sin \psi'_{до} E'_{Qf оо-до}) / z'_{до}; \\ I_Q &= (-\sin \psi'_{до} E'_{D оо-до} - \cos \psi'_{до} E'_{Qf оо-до}) / z'_{до}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Составляющие (5) служат для уточненной оценки намагничивающего воздействия  $ДО$  на  $OO$  по 1ГП в осях  $d$  и  $q$  [4]. Здесь

$$\psi'_{до} = \arg(\dot{E}'_{до} \dot{I}_{до}) = \arctg \left[ \frac{3(l_{до}^k + l_{до}^6 + l_{до}^n)}{r_{до} + r_{до}^6 + r_{до}^n} \right]. \quad (6)$$

Между составляющими рассматриваемых э. д. с. соблюдается соотношение:

$$\left. \begin{aligned} E'_{D оо-до} &= E_{D оо-до} + 3(l_Q^{(3)} - l_{до}^k) I_Q; \\ E'_{Qf оо-до} &= E_{Qf оо-до} + 3(l_D^{(3)} - l_{до}^k) I_D, \end{aligned} \right\} (7)$$

что соответствует известной [3] векторной диаграмме вентильного генератора.

III. Ток  $I_B$ , используя [3], можно выразить через ток  $I_{ДО}$  в отн. ед.:

$$I_B = \frac{1}{k_{ДОlf} \sqrt{a^2(\gamma) + b^2(\gamma)}} I_{ДО} = \frac{1}{k_{ДОlf} c(\gamma)} I_{ДО}. \quad (8)$$

Коэффициент приведения обмотки  $f$  к  $ДО$ :

$$k_{ДОlf} = 1,5 \omega'_{ДО} k_{wДО}^{(3)} / \omega'_f, \quad (9)$$

где  $\omega'_{ДО} k_{wДО}^{(3)}$  — эффективное число витков  $ДО$  на полюс;  $\omega'_f$  — число витков обмотки  $f$  на полюс.

Представляя для упрощения участки 1—2 и 3—4 (рис. 2) прямолинейными, для коэффициентов Фурье основной гармоники [ $a(\gamma)$  (косинусы),  $b(\gamma)$  (синусы),  $c(\gamma)$ ] при  $\gamma=0 - \frac{\pi}{3}$ , имеем:

$$a(\gamma) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{\cos \gamma - 1}{\gamma}; \quad b(\gamma) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin \gamma}{\gamma};$$

$$c(\gamma) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{\sin(\gamma/2)}{(\gamma/2)}, \quad (10)$$

где  $c(\gamma) = \sqrt{a^2(\gamma) + b^2(\gamma)}$ .

При этом основная гармоника тока

$$i_{ДО}^{осн}(t) = c(\gamma) \sin(3\omega t - \psi'_{ДО}). \quad (11)$$

В разложении Фурье кривой  $i_{ДО}(t)$  (рис. 2) при трехфазной мостовой схеме высших гармоник порядка, кратного трем, нет.

Выражение (8) можно представить как

$$I_B = \frac{1}{k_{ДОlf}} k_b(\gamma) \frac{I_{ДО}}{\sqrt{2}}. \quad (8')$$

Коэффициент выпрямления переменного тока в постоянный

$$k_b(\gamma) = \frac{\sqrt{2}}{c(\gamma)} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{(\gamma/2)}{\sin(\gamma/2)}, \quad (12)$$

при  $\gamma=0$   $k_b(0) = \frac{\pi}{\sqrt{6}} = 1,284$ .

На рис. 4 даны зависимости  $a(\gamma)$ ,  $b(\gamma)$ ,  $c(\gamma)$ ,  $k_b(\gamma)$ . Из (8') с учетом (3) и (3')

$$I_B = k_b(\gamma) E_{ДО} / (\sqrt{2} k_{ДОlf} z_{ДО}) = k_b(\gamma) E'_{ДО} / (\sqrt{2} k_{ДОlf} z'_{ДО}). \quad (13)$$

По (13) следует, что при известных введенных параметрах  $r^H_{ДО}$  и  $I^H_{ДО}$  ток  $I_B$  определяется и без привлечения такого понятия, оговариваемого [3], как искаженная э. д. с.

IV. Угол  $\psi'_{ДО}$  определяется с помощью (6). Так как

$$\operatorname{tg} \psi'_{ДО} = -\frac{a(\gamma)}{b(\gamma)}, \quad (14)$$

то из (10) и (14)

$$\psi'_{ДО} = \gamma/2. \quad (15)$$

V. Для определения параметров  $r^H_{ДО}$ ,  $I^H_{ДО}$  используем известную взаимосвязь между э. д. с.  $E'_{ДО}$  и

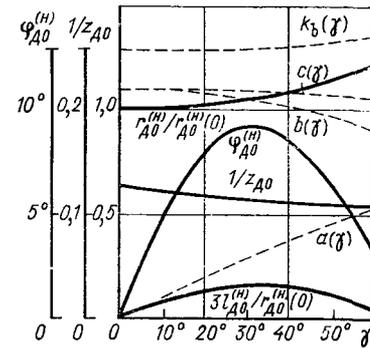


Рис. 4. Показатели выпрямления и величины цепи дополнительной обмотки в зависимости от угла коммутации

выпрямленным напряжением  $U_B$  — внешней характеристикой данного выпрямителя, питаемого от синхронного генератора [3]. Согласно [3] для  $\gamma=0 - \pi/3$  (в отн. ед.):

$$U_B = (r_f + r^{\delta}_f) I_B = k_{ДОlf} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} E'_{ДО} - r_b(\gamma) I_B. \quad (16)$$

Здесь  $r^{\delta}_f$  — балластное сопротивление в цепи обмотки  $f$ ;  $r_b(\gamma)$  — расчетное эквивалентное сопротивление «переменной» части цепи выпрямленному току.

Принимая  $r_b(\gamma)$  по [3] при записи в отн. ед., получаем

$$r_b(\gamma) = \frac{2}{3} k_{ДОlf} \left[ \frac{3}{\pi} 3(I^K_{ДО} + I^{\delta}_{ДО}) + \left( 2 - \frac{3\gamma}{2\pi} \right) (r_{ДО} + r^{\delta}_{ДО}) \right]. \quad (17)$$

Из совместного рассмотрения (16), (13) и (6):

$$\left. \begin{aligned} r_{ДО} + r^{\delta}_{ДО} + r^H_{ДО} &= \frac{[(r_f + r^{\delta}_f) + r_b(\gamma)]}{k^2_{ДОlf}} \times \\ &\times \frac{k_b(\gamma)}{2} \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cos \psi'_{ДО}; \\ 3(I^K_{ДО} + I^{\delta}_{ДО} + I^H_{ДО}) &= \frac{[(r_f + r^{\delta}_f) + r_b(\gamma)]}{k^2_{ДОlf}} \times \\ &\times \frac{k_b(\gamma)}{2} \frac{\pi}{\sqrt{6}} \sin \psi'_{ДО}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

VI. В итоге задача определения  $r^H_{ДО}$ ,  $I^H_{ДО}$  и  $I_B$  с учетом (15) свелась к определению угла  $\gamma$ , для которого с использованием [3] (в отн. ед.) может быть получено:

$$1 - \cos \gamma = k^2_{ДОlf} \frac{4}{\pi} \frac{3(I^K_{ДО} + I^{\delta}_{ДО})}{[(r_f + r^{\delta}_f) + r_b(\gamma)]}. \quad (19)$$

VII. Из (18) с помощью (19) с последующим исключением  $(I^K_{ДО} + I^{\delta}_{ДО})$  из рассмотрения [путем совместного решения (17) и (19)] приходим к следующему:

$$\left. \begin{aligned} r^H_{ДО} &= r \frac{\pi}{6} k_b(\gamma) \frac{\cos \psi'_{ДО}}{1 + \cos \gamma} - r_{ДО} - r^{\delta}_{ДО}; \\ 3I^H_{ДО} &= r \frac{\pi}{2} \left[ \frac{2}{\sqrt{6}} k_b(\gamma) \sin \psi'_{ДО} - \right. \\ &\quad \left. - (1 + \cos \gamma) / (1 + \cos \gamma) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Здесь

$$r = \frac{r_f + r^{\delta}_f}{k^2_{ДОlf}} + \frac{2}{3} \left( 2 - \frac{3\gamma}{2\pi} \right) (r_{ДО} + r^{\delta}_{ДО}). \quad (21)$$

При этом

$$3(l_{ДО}^k + l_{ДО}^6) = r \frac{\pi}{2} \operatorname{tg}^2(\gamma/2). \quad (22)$$

Учитывая значения  $k_b(\gamma)$  по (12) и  $\psi'_{ДО}$  по (15):

$$\left. \begin{aligned} r_{ДО}^H &= r \frac{\pi^2}{12} \frac{\gamma}{\sin \gamma} - r_{ДО} - r_{ДО}^6; \\ 3l_{ДО}^H &= r \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{\gamma/2}{\cos^2(\gamma/2)} - \frac{6}{\pi} \operatorname{tg}^2(\gamma/2) \right). \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Выражения (23) для выпрямительной нагрузки включают только реальные показатели: сопротивления  $r_f, r_{ДО}^6, r_{ДО}, r_{ДО}^H$  и угол  $\gamma$ . Оставшийся в рассмотрении показатель  $\gamma$  согласно (19) независим от нагрузки  $OO$ . Для вентильного генератора при фиксированных  $r$  и  $l$  (в цепи  $ДО$ ) угол  $\gamma$  фактически своеобразный наглядный параметр, реально существующий и, что важно, непосредственно измеряемый.

Из (13) с учетом (3), (23) получаем  $I_B$  в простой и удобной форме:

$$I_B = \frac{1}{k_{ДО/f}} \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{\gamma/2}{\sin(\gamma/2)} \times \frac{E_{ДО}/\sqrt{2}}{\left\{ \left( r \frac{\pi^2}{12} \frac{\gamma}{\sin \gamma} \right)^2 + \left[ 3(l_{ДО} + l_{ДО}^6) + r \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{\gamma/2}{\cos^2(\gamma/2)} - \frac{6}{\pi} \operatorname{tg}^2(\gamma/2) \right) \right]^2 \right\}^{1/2}}. \quad (24)$$

Для (24) характерно, что из показателей коммутации осталась только связь с углом  $\gamma$ .

**VIII. Рис. 4** иллюстрирует характер расчетных зависимостей  $z_{ДО}, I_B = f(\gamma)$  — для макетного образца генератора типа ОС мощностью 16 кВт с  $ДО$  от ЗГП (см. приложение). Объект возбуждается независимо при установившемся к. з.  $OO$  с  $I_{OO} = 0,25 I_{ном}$ . На рис. 4 приведены также зависимости  $r_{ДО}^H/r_{ДО}^H(0); 3l_{ДО}^H/r_{ДО}^H(0); \varphi_{ДО}^H = f(\gamma)$ . Значение  $r_{ДО}^H(0)$  соответствует случаю:  $\gamma = 0; r_{ДО} + r_{ДО}^6 = 0$ .

При этом

$$r_{ДО}^H(0) = \frac{r_f + r_{ДО}^6}{k_{ДО/f}^2} \frac{\pi^2}{12}; \quad 3l_{ДО}^H(0) = 0. \quad (25)$$

Результатом (25) подтверждается достигнутое эквивалентирование обмотки  $f$  с выпрямителем, так как к нему можно прийти по-иному: из условия равенства потерь в обмотке  $f$  и в эквивалентном активном сопротивлении [при коэффициенте выпрямления  $k_b(0) = \pi/\sqrt{6} (12')]$ . Определение  $I_B$  по (24) и опыту приводит к  $I_B = 1,3; I_B^{оп} = 1,2$ . Расхождение опыта с расчетом применительно к объекту с явлениями на уровне ЗГП — удовлетворительное. Основной источник расхождения — неточности при подсчете  $E_{ДО}$ .

Последовательность расчета тока  $I_B$  дана в приложении на конкретном примере.

Подход к решению и результаты могут быть использованы при рассмотрении также и обычных выпрямительных устройств и возбуждателей.

**Приложение 1.** Объект — образец генератора ОС на 16 кВт, 400 В, 29 А, 50 Гц, 1500 об/мин с  $ДО$  от ЗГП, с полузакрытыми пазами якоря, без демпферной обмотки на индукторе с  $k_{ДО/f} = 0,0314$ .

2. Активные сопротивления (с учетом соединений в схеме испытаний)

$$r_{ДО} + r_{ДО}^6 = 1,19; \quad r_f + r_{ДО}^6 = 0,00767.$$

3. Зависимости  $r_{ДО}^H/r_{ДО}^H(0); 3l_{ДО}^H/r_{ДО}^H(0) = f(\gamma)$  подсчитаны по (23), (25), а угол  $\varphi_{ДО}^H$  — по  $\varphi_{ДО}^H = \arctg(3l_{ДО}^H/r_{ДО}^H)$ ; зависимость  $1/z_{ДО} = f(\gamma)$  рассчитана по (3).

При расчетах принято: активные сопротивления — по п. 2;  $l_{ДО}^6 = 0; l_{ДО} = 2,3805$ . Графики даны на рис. 4.

4. Расчетные значения индуктивностей (без учета насыщения), подсчитанные для объекта по [4]:  $l_f = 2,762$  — индуктивность обмотки  $f$ .

Для ГП:

$l_d^{(1)} = 2,706; l_q^{(1)} = 1,649$  — синхронные индуктивности  $OO$  в осях  $d$  и  $q$ ;  $l_{df-oo}^{(1)} = 2,534; l_{doo-f}^{(1)} = 2,642$  — взаимоиנדуктивности от  $f$  к  $OO$  и наоборот;  $l_{doo-oo}^{(1)} = 0,163; l_{qoo-oo}^{(1)} = 0,894$  — взаимоиנדуктивности от  $ДО$  к  $OO$ .

Для ЗГП:

$l_D^{(3)} = 2,638; l_Q^{(3)} = 2,123$  — синхронные индуктивности  $ДО$  в осях  $D$  и  $Q$ ;  $l_{Df-до}^{(3)} = -0,4785; l_{Dдо-f}^{(3)} = -0,79$  — взаимоиנדуктивности от  $f$  к  $ДО$  и наоборот;  $l_{Doo-f}^{(3)} = -0,0543$  — взаимоиנדуктивность от  $OO$  к  $f$ ;  $l_{Doo-до}^{(3)} = 0,163; l_{Qoo-до}^{(3)} = 0,894$  — взаимоиנדуктивности от  $ДО$  к  $OO$ .

5. Последовательность подсчета тока  $I_B$ .

Значение  $l_{ДО}^k$ , необходимое для определения угла  $\gamma$ , в соответствии с [3]:

$$l_{ДО}^k = \frac{3l_D^{(3)'} + l_Q^{(3)'}}{4}. \quad (\text{П-1})$$

Переходные индуктивности  $l_D^{(3)'}$  и  $l_Q^{(3)'}$  (при остальных короткозамкнутых конгурах) с использованием [1 и 4]:

$$l_D^{(3)'} = l_D^{(3)} - \frac{l_{Df-до}^{(3)} [l_{dдо-f}^{(1)} + l_{Dдо-f}^{(3)}] l_d^{(1)} - [l_{doo-f}^{(1)} + l_{Doo-f}^{(3)}] l_{dдо-oo}^{(1)} - l_{Doo-до}^{(3)} [(l_{dдо-f}^{(1)} + l_{Doo-f}^{(3)}) - l_f l_{dдо-oo}^{(1)}]}{l_f l_d^{(1)}}. \quad (\text{П-2})$$

Подстановки индуктивностей п. 4 в (П-2) и (П-3) дают:

$$l_D^{(3)'} = 1,17; \quad l_Q^{(3)'} = 1,638; \quad l_{ДО}^k = 1,287.$$

Отсюда из (19) с использованием (17)  $\gamma = 57^\circ$  (из опыта  $\gamma^{оп} = 52^\circ$ ).

Ток  $I_{OO}^{к.з} = 0,25$ . Согласно [4]  $I_q \approx 0; I_d = -I_{OO}^{к.з}; I_f \approx -I_d \times \frac{l_d^{(1)}}{l_{df-oo}^{(1)}} = 0,267$ .

Из (2)  $E_{ДО} = 0,506 (E_{ДО}^{оп} = 0,46)$ ; из (24)  $I_B = 1,3 (I_B^{оп} = 1,2)$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян В. С. Потокосцепления и напряжения синхронной машины с дополнительной обмоткой по третьей гармонике поля. — Электричество, 1979, № 7.

2. Арутюнян В. С. Параметры и уравнения напряжений в относительных единицах для синхронной машины с дополнительной якорной обмоткой. — Ереван: Труды ВНИИКЭ, 1978, № 10.

3. Глебов И. А. Система возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями. — М.; — Л.: Изд. АН СССР, 1960.

4. Арутюнян В. С. Токи в цепях автономного синхронного генератора с самовозбуждением от третьей гармонике поля. — Электротехника, 1981, № 2.

## Уточненный метод теплового расчета сопряженных узлов электрических машин

МАМЕДШАХОВ М. Э., канд. техн. наук  
Узбекская ССР, Ташкент

В настоящее время известны результаты ряда исследований тепловых процессов в электрических машинах с учетом разницы потерь и параметров материалов узлов их конструкций. Разница параметров, как правило, учитывается либо методом эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [1, 2 и др.], либо методом температурного поля (ТП) [2 и 3].

Практически наиболее ценным является одновременный учет разницы потерь, параметров материалов конструкций электрических машин и их изменений в процессе преобразования энергии. Метод ЭТС, как известно, исходит из постоянства значений параметров внутри отдельных элементов и осредняет значения расчетных температур. Выявление же локальных температур (даже установившихся) на основе метода ТП с учетом действительной информации о характере распределения и изменения параметров в отдельных узлах или во всей электрической машине связано с трудностями математического характера. Объясняется это тем, что на стыках разнородных элементов (охлаждающая вода — медь, медь — изоляция, изоляция — сталь и т. п.) функции параметров (а иногда и потерь) претерпевают скачкообразные (разрывные) изменения.

Конкретным подходом к анализируемому случаю исследователи допускают упрощения, позволяющие с необходимой точностью рассчитать тепловое поле. Например, в [4 и 5] предлагается замена реальной картины нагрева нажимной плиты с внутренними каналами охлаждения физической моделью, в [6] обоснована необходимость применения нелинейных краевых задач при сравнительно больших значениях рабочих температур узлов конструкций электрических машин. Однако результаты [6] справедливы и применимы лишь для отдельных элементов, параметры которых не изменяются скачкообразно.

При расчете местных температур в электрических машинах, как в наборных конструкциях, приходится интегрировать дифференциальные уравнения в частных производных с соответствующими граничными условиями и условиями сопряжения на линиях стыков соседних областей. Достижение этой цели на основе решения краевой задачи, описывающей ход процесса во всей наборной области, и выявление на этой основе аналитической информации о распределении установившихся или нестационарных температур связано с включением в дифференциальное уравнение в качестве коэффициентов разрывных функций. Нетрудно установить, что исследователи практически во всех случаях сталкиваются с аналогичной ситуацией. Лишь упростив реальную картину, они избегают этой трудности, хотя и не получают при этом желаемой точности результатов.

Общезвестна ценность аналитической (особенно точной) информации о распределении и характере изменения во времени местных температур как в отдельных узлах конструкций, так и во всей электрической машине. Во многих практических случаях из-за рав-

номерности протекающих тепловых процессов в электрических машинах по направлениям одной или двух координатных осей оказывается достаточно использовать соответственно двух- или одномерные краевые задачи. В случаях, когда точная информация распределения температур выявляется на основе метода тепловых потенциалов (ТП), возникает возможность сделать это в областях с границами, параллельными не только координатным осям, но и с переменными границами несмотря на сложность и громоздкость метода.

Увеличение электромагнитных нагрузок, использование более эффективных систем охлаждения, внедрение в практику электромашиностроения сравнительно высоких рабочих температур в рабочих режимах требуют дальнейшего повышения точности тепловых расчетов в известной постановке тепловой задачи — на основе заданных потерь, внутренних параметров рассматриваемой области, коэффициентов связи границ области с окружающей средой надо рассчитать тепловое поле. Достижение повышенной точности особенно актуально при сравнительно высоких значениях рабочих температур активных узлов конструкций электромеханических преобразователей энергии [7 и 8].

В статье описываются некоторые результаты, полученные на основе приближенного интегрирования краевых задач, описывающие изменение во времени локальных температур в наборных узлах конструкций электрических машин. Приближенное решение такой краевой задачи с разрывными коэффициентами в принципе можно достичь или местной линеаризацией [9] разрывных функций — коэффициентов краевой задачи или вводом в аппаратуру реальных скачкообразных функций.

Рассмотрим двухмерную область (рис. 1), представляющую поперечное сечение наборного ротора линейного двигателя, состоящую из тонкого медного слоя толщиной  $OL_1$  и стальной накладке толщиной  $L_1L_2$ , служащих для уменьшения электрического и магнитного сопротивлений соответствующих цепей.

Распределение неустановившихся температур в этой области описывается следующей краевой за-

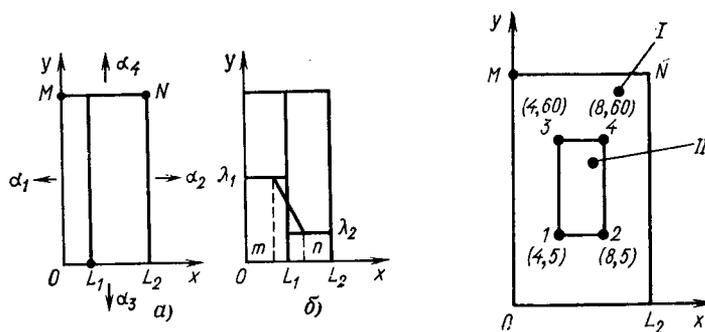


Рис. 1

Рис. 2

дачей с разрывными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 c(x, y, \tau) \gamma(x, y, \tau) \frac{\partial \theta}{\partial \tau}(x, y, \tau) = & \\
 = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_1(x, y, \tau) \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, y, \tau) \right] + & \\
 + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_2(x, y, \tau) \frac{\partial \theta}{\partial y}(x, y, \tau) \right] - & \\
 - F_1(x, y, \tau) \vartheta(x, y, \tau) + F_2(x, y, \tau); & \\
 \vartheta(x, y, 0) = 0 \Big|_{\tau=0}; & \\
 \mp \alpha_{1,2}(y, \tau) \vartheta(x, y, \tau) + & \\
 + \lambda(0, y, \tau) \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, y, \tau) = \varphi_{1,2}(y, \tau) \Big|_{x=0, L_2}; & \\
 \mp \alpha_{3,4}(x, \tau) \vartheta(x, y, \tau) + & \\
 + \lambda(x, 0, \tau) \frac{\partial \theta}{\partial y}(x, y, \tau) = \varphi_{3,4}(x, \tau) \Big|_{y=0, M}; & \\
 0 \leq x \leq L_2; 0 \leq y \leq M; 0 \leq \tau \leq T_{\text{кон}}. &
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Принятые здесь обозначения общеизвестны. Функции  $F_1$  и  $F_2$  обозначают соответственно интенсивность внутренних тепловых стоков, например, при наличии внутренних каналов с циркулирующим хладагентом и источников.

Функции внутренних параметров, например, коэффициент теплопроводности изменяется скачкообразно на стыке  $x=L_1$ .

В рассматриваемом случае разрывные изменения функций внутренних параметров и на границах идентичны. В более сложных случаях при наличии внутри  $OMNL_2$  (рис. 2) другой области с другими значениями внутренних параметров, например, канала с хладагентом такой идентичности не наблюдается.

Краевая задача (1) с разрывными интегрируется приближенным методом конечных разностей, используя локально-одномерную схему решения [7, 10, 11]. Программа написана на языке «Фортран» применительно к электронно-вычислительным машинам типа «ЕС».

В [9] с целью создания непрерывного счетного процесса разрывные коэффициенты сглаживаются на выбранном интервале той оси, в направлении которо-

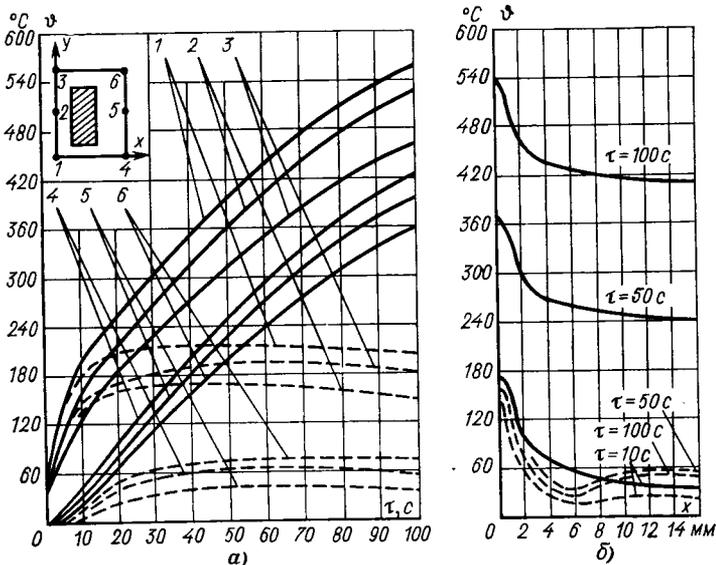


Рис. 3

го рассматривается распространение исследуемого процесса нестационарного нагрева. Например, коэффициент теплопроводности можно описать следующим образом (рис. 1,б):

$$\begin{aligned}
 \lambda(x) = 0,5\lambda_1 [\text{sign } x - \text{sign}(x - m)] + & \\
 + 0,5\lambda_{1,2}(x) [\text{sign}(x - m) - \text{sign}(x - n)] + & \\
 + 0,5\lambda_2 [\text{sign}(x - n) - \text{sign}(x - L_2)], &
 \end{aligned}$$

где

$$\lambda_{1,2}(x) = 0,5\lambda_1 - 0,5(\lambda_1 - \lambda_2)(x - m)(n - m).$$

Появление множителя 0,5 в правой части объясняется тем, что разности в квадратных скобках на рассматриваемом интервале изменения аргумента, равны 2.

Аналогично можно представить и другие функции разрывных параметров области, как внутри, так и на ее границах. Шаги по осям пространства при этом выбирались так, чтобы точки перегибов  $\lambda(x)$  не совпадали с узлами разностей сетки.

Для выделения участков координатных осей, на которых производится местное сглаживание, можно использовать не только знакпереключающий оператор  $\text{sign}$ , но и  $\delta$ -функцию Дирака, а также гиперболический тангенс.

При вводе в аппаратуру реальных разрывных функций параметров, коэффициент теплопроводности запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \lambda(x) = 0,5\lambda_1 [\text{sign}(x) - \text{sign}(x - L_1)] + & \\
 + 0,5\lambda_2 [\text{sign}(x - L_1) - \text{sign}(x - L_2)]. &
 \end{aligned}$$

Местная линейаризация по способу, показанному на рис. 1,б, при сравнительно больших разницах геометрических размеров (толщин) отдельных зон по направлению координатной оси приводит к выбору чрезмерно мелких шагов, что увеличивает счетную информацию и соответственно счетное (машинное) время, поэтому выбор способа описания разрывных функций необходимо производить с учетом конкретных условий, исходных данных, затрат машинного времени и необходимой точности конечных результатов расчета.

Расчет нестационарного нагрева двухмерной области с разрывными функциями внутренних потерь (источников и стоков) и параметров, которые могут измениться и во времени, произведем на следующем примере (рис. 2), аналогия которому часто встречается в электрических машинах. Внутри токоведущей области I, в которой выражен поверхностный эффект, действуют тепловые стоки, например, канал для потока охлаждающей воды II. В принятой аналитической модели (1) одинаково легко учитывается как «сплошность», так и шихтованность рассматриваемых областей (т. е. разница функций потерь и параметров по направлениям различных координатных осей).

Изменения во времени потерь и параметров здесь предполагаются линейными функциями. Правомерность этого предположения объясняется (применительно к рассматриваемому случаю) сравнительно невысокими значениями рабочих температур активных узлов конструкций электрических машин, когда в них циркулирует охлаждающая вода. Кроме того, считаются заданными интенсивности внутренних источников и стоков на основе соответствующих расчетов или опытной информации [11]. Разрывные функции пара-

метров внутри областей и на границах составляются на основе соответствующих справочных данных для сплошных или шихтованных сред, когда рассматриваемый параметр на данном участке рассматриваемой оси считается непрерывным.

Для упрощения также не учитываются гидродинамические явления движущегося потока и связанные с этим особенности, возникающие в тепловых расчетах. Практическая ценность этого упрощения заключается в том, что в разнородных узлах конструкций электрических машин отдельные компоненты не совершают относительного движения, например, медь—изоляция—сталь и т. п. При наличии разницы в начальных температурах отдельных зон эта информация вводится в начальное условие задачи (1).

Приняв коэффициент теплоотдачи в канале  $\alpha$ , равным  $4400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  (координаты вершин прямоугольника II в мм указаны на рис. 2 в скобках), имеем:

$$F_1(x, y, \tau) \vartheta(x, y, \tau) = 2,36 \cdot 10^6 \vartheta(x, y, \tau) \text{ Вт}/\text{м}^3$$

или

$$F_1(x, y, \tau) \vartheta(x, y, \tau) = 0,59 \cdot 10^6 [\text{sign}(x - 4) - \text{sign}(x - 8)] [\text{sign}(y - 5) - \text{sign}(y - 60)] \vartheta(x, y, \tau) \text{ Вт}/\text{м}^3.$$

Функция внутренних потерь в области I с размерами  $OL_2 = 0,016 \text{ м}$ ;  $OM = 0,07 \text{ м}$  изменяется согласно [9] по соотношению:

$$F_2(x, y, \tau) = 115 \cdot 3,96 \cdot 10^6 e^{-1,1x} \left(1 - \frac{0,3}{70} y\right) \times \\ \times (1 - 0,001\tau) \text{ Вт}/\text{м}^3.$$

Разрывные функции краевой задачи (1) составлены на основе справочных данных без местной линеаризации по вышеизложенной методике. Например, для коэффициента  $\lambda$  имеем:

$$\lambda(x, y, \tau) = \lambda_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_{II}}{4} [\text{sign}(x - x_1) - \text{sign}(x - x_2)] [\text{sign}(y - y_1) - \text{sign}(y - y_2)].$$

Коэффициенты теплоотдачи приняты согласно [8]. Результаты машинного интегрирования краевой задачи (1) для рассматриваемого случая приведены на рис. 3, а и б (сплошные линии — без канала охлаждения;

пунктирные — с каналом охлаждения). Анализ результатов показывает, что интенсивный отсос тепла каналом охлаждения наряду с снижением рабочих температур изменяет и перепад температур на ограничивающих поверхностях  $x=0$ ;  $x=L_2$ .

Хотя здесь рассматривался случай нестационарного нагрева двумерной области с прямоугольным каналом охлаждения, полученные результаты можно использовать и для других практических случаев с другими краевыми условиями независимо от числа рассматриваемых областей. Однако границы всех этих областей должны быть параллельны координатным осям.

Подход к анализу тепловых процессов в электрических машинах с учетом реального характера разрывности функций потерь, параметров и их изменений в сочетании с методом ТП отражает действительную картину протекающих процессов более достоверно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. — М.: Энергия, 1974.
2. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов/ Под ред. И. М. Постникова и Л. Я. Станиславского. — Киев.: Наукова думка, 1971.
3. Лыков А. В. Тепломассообмен (справочник). — М.: Энергия, 1972.
4. Анемподистов В. П., Смолин И. М. Тепловое поле нажимной плиты статора турбогенератора. — В кн.: Турбо- и гидрогенераторы. — Л.: Наука, 1974.
5. Анемподистов В. П., Смолин И. М. Нагрев нажимной плиты статора мощного турбогенератора при различных системах охлаждения. — Электротехника, 1973, № 10.
6. Мамедшахов М. Э. О применении нелинейных краевых задач при исследовании тепловых процессов в электрических машинах. — Электричество, 1981, № 10.
7. Мамедшахов М. Э. Исследование нестационарного нагрева вторичных систем электромагнитных тормозов — замедлителей на вихревых токах. Автореф. дис. на соиск. степ. канд. техн. наук. М., 1974. Мин-во высш. и сред. спец. образ. СССР. МЭИ.
8. Винокуров В. А., Мамедшахов М. Э. Учет изменений потерь и параметров при исследовании тепловых процессов в электрических машинах. — В кн.: Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. — Харьков, 1978, вып. 8.
9. Самарский А. А. Введение в теорию разностных систем. — М.: Наука, 1971.
10. Самарский А. А. Локально-одномерные разностные схемы на неравномерных сетках. — Вычислительная математика и математическая физика, 1963, т. 3, № 2.
11. Мамедшахов М. Э. Особенности термометрического метода измерения удельных потерь при нарушении его основополагающих условий. — Электричество, 1979, № 9.

[30.06.82]

УДК 62-52:621.313.333.001.2

## Выбор исполнительного электродвигателя переменного тока для систем автоматики

БОЧКАРЕВ И. В.

Киргизская ССР, Фрунзе

В настоящее время для систем автоматики в качестве исполнительных электродвигателей переменного тока используются в основном асинхронные двухфазные электродвигатели двух типов: с полым немагнитным ротором (ДПР) и с обычным шихтованным ротором, имеющим обмотку типа «беличья клетка» (ДБК). Эти электродвигатели выполняются обычно закрытой конструкции и без вентилятора (из-

за снижения быстродействия за счет маховых масс последнего). Для уменьшения габаритных размеров машин мощностью более 16 Вт иногда применяют принудительное охлаждение вентилятором при помощи дополнительного электродвигателя, встроенного в общий корпус [1].

Это, однако, ведет к резкому увеличению массы и габаритов системы в целом.

Для исключения этого недостатка был разработан новый тип исполнительных электродвигателей — малоинерционные асинхронные машины с двумя концентрично расположенными роторами (ДПФР) [2]. В сущности эти машины представляют собой совмещенные в одном корпусе исполнительный электродвигатель с полым немагнитным ротором и дополнительный электродвигатель-вентилятор с моноблочным ферромагнитным ротором, имеющие общий статор. Применение принудительной независимой вентиляции позволяет значительно уменьшить габаритные размеры исполнительного электродвигателя при сохранении основных динамических и энергетических показателей, что является нередко немаловажным, а иногда и решающим требованием при проектировании машины.

Таким образом, весьма актуальным является вопрос сравнения характеристик управляемых электродвигателей переменного тока для выбора наиболее рациональной конструкции в зависимости от требований и условий работы в различных автоматических устройствах.

Для оценки и выбора рационального типа исполнительного электродвигателя воспользуемся методом, разработанным в [3 и 4], который позволяет произвести сравнение характеристик без полного расчета электродвигателей.

При расчете и проектировании исполнительных электродвигателей в качестве основного режима работы принимают длительный стопорный режим. В этом режиме одним из наиболее важных показателей работы является удельный стопорный момент  $m_c$ , равный отношению максимального стопорного момента  $M_c$  к потребляемой мощности  $P_c$  при номинальных значениях напряжений обмоток, соответствующих круговому вращающему полю [4]:

$$m_c = \frac{M_c}{P_c} = \frac{p}{2\pi f} \eta_c, \quad (1)$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $f$  — частота питающей сети;  $\eta_c = P_{\text{эл}}/P_c$  — коэффициент использования;  $P_{\text{эл}}$  — электромагнитная мощность, передаваемая рабочему ротору в стопорном режиме:

$$P_{\text{эл}} = \begin{cases} P_c - p_{ms} & \text{для однороторных машин;} \\ P_c - p_{ms} - P_{22c} & \text{для двухроторных машин;} \end{cases}$$

$p_{ms}$  — потери в меди статора;  $P_{22c}$  — электромагнитная мощность вспомогательного ротора.

Удельный момент  $m_c$  может быть определен по относительным параметрам схемы замещения, связывающим главные геометрические размеры с основными выходными показателями машины и обеспечивающим заданную степень нелинейности механических характеристик. Из эквивалентной Т-образной схемы замещения для однороторных машин при круговом поле из (1) имеем:

$$m_c = \frac{p}{2\pi f} \frac{1}{1 + \frac{r_s}{r_1} \left[ \left( 1 + \frac{x_1}{x_m} \right)^2 + \left( \frac{r_1}{x_m} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где  $r_s$  — активное сопротивление обмотки статора;  $r_1$  и  $x_1$  — активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора, приведенные к обмотке возбуждения;  $x_m$  — индуктивное сопротивление намагничивающего контура, приведенное к обмотке возбуждения. Для полого немагнитного ротора можно принять  $x_1/x_m \ll 1$ .

Для массивного ротора отношение между активной и индуктивной составляющими полного сопротивления можно принять постоянным и равным  $x_2/r_2 \approx 0.6$ . Тогда для предварительных расчетов на основании схемы замещения ДПФР [5] с учетом того, что в стопорном режиме работы рабочего ротора внутренний вспомогательный ротор вращается с номинальной частотой вращения, близкой к частоте холостого хода, выражение для  $m_c$  из (1) после ряда упрощений, вносящих погрешность не более  $\pm 5\%$ , получаем в следующем виде:

$$m_c = \frac{p}{2\pi f} \frac{1 - 0,735r_1/r_{2c}}{1 + \frac{r_s}{r_1} \left[ 1 + \left( \frac{r_1}{x_m} \right)^2 + 0,735r_1/r_{2c} \right]}, \quad (3)$$

где  $r_{2c} = r_2/\sqrt{s_2}$ ;  $s_2$  — скольжение внутреннего ротора в стопорном режиме работы рабочего ротора (индексом «1» отмечены величины, относящиеся к рабочему ротору, а индексом «2» — к вспомогательному).

Для расчета параметров схем замещения рассматриваем управляемую машину с наиболее часто применяемыми отдельными симметричными двухфазными обмотками, занимающими равные числа пазов, и с зубцами с постоянной по высоте шириной. Тогда, используя для параметров схем замещения известные соотношения [4–6], выражения (2) и (3) можно привести к следующему виду:

$$m_c = \frac{p}{2\pi f} \frac{1}{1 + \frac{a_1 F_1}{b_1} \left[ 1 + \frac{a_2 F_2}{f D_H^2} \right]}, \quad (4)$$

для ДБК при оптимальном значении  $r_1$ , обеспечивающим максимальное значение  $m_c$  и отсутствие самохода, т. е. при  $r_{\text{опт}} = x_m + x_1$

$$m_c = \frac{p}{2\pi f} \frac{1}{1 + \frac{4b_2 p^2}{\pi b_1 D_H^2 f} \left( 1 + \frac{k_{\text{п.с}}}{k_1 p} \right)}, \quad (5)$$

для ДПФР

$$m_c = \frac{p}{2\pi f} \times \frac{1 - 0,735a_3 b_3 F_3}{D_H} \frac{1}{1 + \frac{a_1 F_1}{b_1} \left[ 1 + \left( \frac{a_2 F_2}{f D_H^2} \right)^2 + 0,735a_3 b_3 F_3 \frac{1}{D_H} \right]}. \quad (6)$$

В выражениях (4) — (6):

$$a_1 = \frac{4\rho_s k_\Delta}{\rho_1 k_{3,\text{п}} k_{\text{об}}^2 k_{R1}}; \quad a_2 = \frac{2\rho_1 (1 + \delta/\Delta) k_{R1}}{\pi \mu_0};$$

$$a_3 = \frac{0,4\rho_1 k_{R1}}{k_\Delta k_{R2}}; \quad b_1 = 1 - k_D \left( \frac{1}{\gamma_z} + \frac{1}{p\gamma_a} \right) -$$

$$- \left[ 1 - \frac{2}{\gamma_z} - \frac{2}{p\gamma_z \gamma_a} - \frac{1}{\gamma_z^2 a p^2} \right] k_D^2; \quad b_2 = \frac{4\rho_1 k_{\text{об}} f (1 + x_1/x_m)}{\mu_0 k_{3,\text{п}} k_{\text{об}}^2};$$

$$b_3 = \sqrt{\frac{s_2}{\mu_0 p_2 f}} \operatorname{cth} m_2 \Delta_2; \quad F_1 = \left( 1 + \frac{2}{k_1 p} \right) k_D^2;$$

$$F_2 = \left( \frac{p}{k_D} \right)^2; \quad F_3 = 1/k_D,$$

где  $\rho_s$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  и  $\rho_3$  — удельные сопротивления материала обмотки статора, беличьей клетки, рабочего и вспомогательного роторов;  $k_\Delta = \Delta_1/D$  — отношение

толщины полого ротора к его диаметру;  $k_{з.п}$  — коэффициент заполнения паза статора;  $k_{об}$  — обмоточный коэффициент обмотки статора;  $k_{R1}$  и  $k_{R2}$  — коэффициенты, учитывающие влияние лобовых частей полого и вспомогательного роторов;  $\delta$  — суммарный односторонний воздушный зазор;  $k_l = l_1/D$  — отношение длины рабочего ротора к его диаметру;  $k_D = D/D_H$  — отношение диаметра расточки к наружному диаметру пакета статора;  $\gamma_z = B_{mz}/B_{m\delta}$  и  $\gamma_a = B_{ma}/B_{m\delta}$  — отношение максимальной индукции соответственно в зубцах и ядре статора к максимальной индукции в воздушном зазоре;  $m_2$  — коэффициент распространения электромагнитной волны в материале вспомогательного ротора;  $\Delta_2$  — толщина вспомогательного ротора;  $\mu_e$  — значение магнитной проницаемости на поверхности вспомогательного ротора;  $k_{л.с}$  — коэффициент длины лобовой части секции;  $k_b = \delta'/D$  — отношение приведенного одностороннего воздушного зазора к диаметру расточки статора.

Целесообразность введения относительных величин определяется тем, что таким образом можно не только сократить число выбираемых величин, но и ограничить диапазон их изменения. На основании опыта проектирования одно- и двухроторных машин с полыми немагнитными роторами, а также рекомендаций [6] и анализа серийно выпускаемых электродвигателей, для предварительных расчетов можно принять:

$$\rho_s/\rho_1=0,5; k_{\Delta}=0,01; k_{з.п}=0,25; k_{об}^2=0,75; \delta/\Delta=1; \gamma_a = \gamma_z=3;$$

$$k_{R1} = \begin{cases} 1,3 & \text{— для двухполюсных электродвигателей;} \\ 1,1 & \text{— для многополюсных электродвигателей;} \end{cases}$$

$$k_{R2} = \begin{cases} 1 & \text{— при наличии торцевых короткозамкнутых колец;} \\ (1 + 1/k_{lp}) & \text{— в случае отсутствия торцевых колец;} \end{cases}$$

$$k_l=1,5 \div 2; k_D=0,35 \div 0,6; \text{cth } m_2 \Delta_2=1; b_3=2,5 \cdot 10^3.$$

Для ДБК усредненные значения коэффициентов и параметров, входящих в (5), взяты в соответствии с рекомендациями [1].

С помощью выражений (4) — (6) были рассчитаны зависимости  $m_c = f(\rho, D_H)$  для различных значений  $f$ . В качестве примера на рис. 1, а и б приведены кривые соответственно для частот 50 и 500 Гц. Поскольку в задании на проектирование исполнительного электродвигателя лимитируются его предельные габариты, т. е. диаметр  $D_K$  и длина  $l_K$  корпуса, то при использовании кривых рис. 1 необходимо учесть, что  $D_K = D_H + 2\Delta_K$ , где  $\Delta_K = 1,5 \div 4$  мм — толщина стенки корпуса; при этом значение  $D_K$  должно соответствовать унифицированным габаритным размерам по ГОСТ 12126—71.

Быстродействие исполнительного электродвигателя определяется в основном значением электро механической постоянной времени  $T_m$ , которая равна:

$$T_m = 2\pi f \nu_{01} / \rho M_c, \quad (7)$$

где  $\nu_{01}$  — относительная частота вращения холостого хода рабочего ротора, которая выбирается для ДБК по [1], а для машин с полым ротором — по [6] в зависимости от схемы управления;  $J_R$  — момент инерции ротора;

для ротора с обмоткой типа «беличья» клетка [1]

$$J_R = 8(k_D D_H)^5 k_l 10^{-8}, \text{ Нм} \cdot \text{с}^2; \quad (8)$$

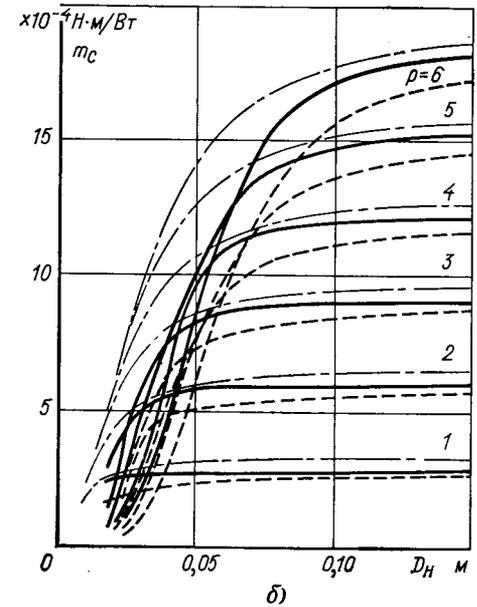
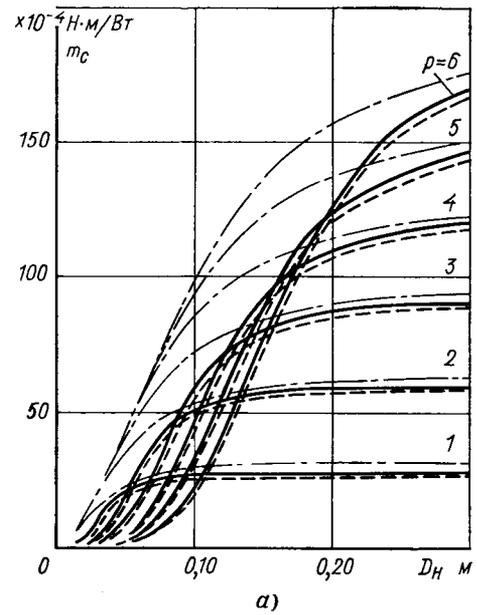


Рис. 1. Зависимость удельного стопорного момента от наружно-го диаметра пакета статора: а — при  $f=50$  Гц; б — при  $f=500$  Гц. — — ДПР; - - - ДПФР; - · - ДБК

для полого ротора, принимая толщину дна ротора  $\Delta_{дн} = 5\Delta_1$ , в соответствии с [6] получим

$$J_R = 1,35 k_{\Delta} (k_D D_H)^5 (1,6 k_l + 1) 10^{-7}, \text{ Нм} \cdot \text{с}^2. \quad (9)$$

Стопорный момент  $M_c$  рассчитываем из (1):

$$M_c = m_c P_c, \quad (10)$$

где

$$P_c = \begin{cases} \sigma_s, S_K & \text{— для однороторных машин;} \\ \sigma_s S_{к.н} + S_{к\sigma} \sigma_{sv} + P_{R2 \text{ мех}} & \text{— для двухроторных машин;} \end{cases}$$

$\sigma_s$  — удельный тепловой поток, который можно выбрать по [1 и 6] в зависимости от допустимого превышения температуры обмотки статора  $\theta_s$ ;  $S_K$  — наружная поверхность машины;  $P_{R2 \text{ мех}}$  — полезная механическая мощность вспомогательного ротора, рас-

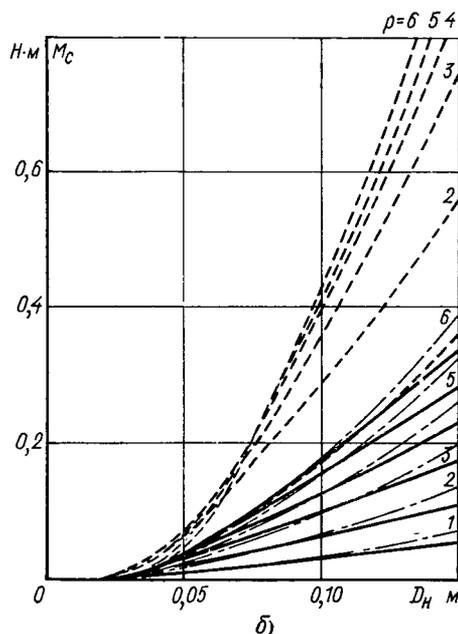
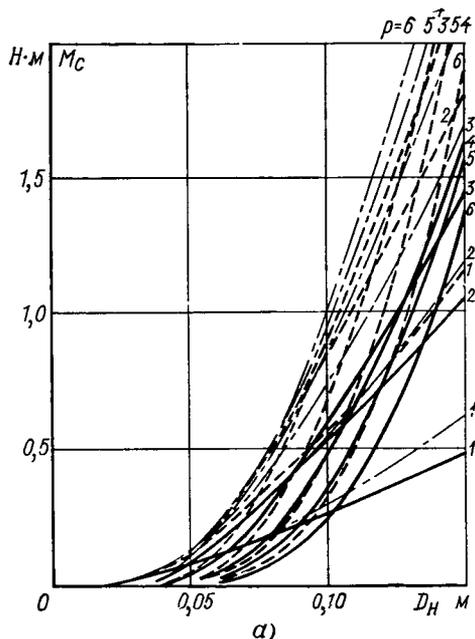


Рис. 2. Зависимость стопорного момента от наружного диаметра пакета статора:  
а — при  $f=50$  Гц; б — при  $f=500$  Гц. — — ДПР; - - - - ДПФР; ····· ДБК

ходуемая на вращение вентилятора;  $S_{к.н}$  и  $S_{к.в}$  — обдуваемая и необдуваемая части поверхности корпуса;  $\sigma_{sv} = k_{\sigma} \sigma_s$ ;  $k_{\sigma}$  — коэффициент увеличения теплоотдачи за счет внешнего обдува корпуса;

$$k_{\sigma} = \begin{cases} (1 + 0,1v) & \text{при } v < 25 \text{ м/с;} \\ (1 + 0,5\sqrt{v}) & \text{при } v > 25 \text{ м/с.} \end{cases}$$

В случае ДПФР, имеющего систему внутренней вентиляции, при которой активные части непосредственно омываются потоком воздуха,  $P_c$  можно увеличить на 25%.

Как показали проведенные теоретические и экспериментальные исследования ДПФР, для предварительных расчетов значением  $P_{R2\text{мех}}$  можно с достаточной степенью точности пренебречь, при этом скорость

охлаждающего воздуха  $v$  можно рассчитать по выражению:

$$v = 1,57 \cdot 10^{-2} \frac{D_n f}{p} v_{02} \text{ мс,} \quad (11)$$

где  $v_{02}$  — относительная частота вращения вспомогательного ротора.

В качестве примера результаты расчета  $M_c$  и  $T_m$  для частот 50 и 500 Гц и  $\theta_s = 105^\circ\text{C}$  представлены на рис. 2 и 3, при этом рассматривалась конструкция ДПФР с системой внутренней вентиляции. Полученные кривые на рис. 1—3 позволяют для заданных  $f$  и  $D_k$  выбрать оптимальное число пар полюсов  $p$  из условия получения соответственно или максимального значения  $m_c$  и  $M_c$ , или минимальной электромеханической постоянной времени  $T_m$ . Отметим, что при расчете основных выходных параметров электродвигателей линейность механических характеристик удовлетворяла требованиям, предъявляемым к ним в системах автоматики, т. е.  $\Delta m \leq 0,1 \pm 0,15$  [1 и 3].

Для подтверждения достоверности и применимости полученных данных было проведено их сравнение с параметрами серийных и экспериментальных образцов ДБК, ДПР и ДПФР, которое показало их хорошую сходимость в широком диапазоне изменения частоты питания  $f=50 \pm 1000$  Гц (см. таблицу). В случае использования исполнительного электродвигателя при других допустимых  $\theta_s$ , кривые рис. 2 и 3 имеют

Тип электродвигателя	Параметр						
	$f$ , Гц	$p$	$m_c$ , $10^{-4}$ Н·м/Вт	$M_c$ , Н·м	$T_m$ , мс	$D_k$ , м	$L_k$ , м
С полым немагнитным ротором							
АДП-362	50	1	24,3	0,17	6,0	0,085	0,122
			26,5	0,19	6,0		
ЭМ-50М	400	3	10,0	0,120	50,0	0,095	0,119
			11,1	0,108	40,0		
АДП-363А	500	3	7,9	0,085	51,0	0,085	0,122
			8,9	0,074	52,0		
АДП-024А	1000	3	2,4	0,009	40,0	0,040	0,064
			4,1	0,009	50,0		
Совмещенные двухроторные							
АДР-20/50	50	1	21,0	0,20	2,5	0,070	0,108
			23,0	0,22	2,8		
АДР-40/50	50	1	21,9	0,364	2,7	0,085	0,129
			24,5	0,370	3,3		
АДР-95/400	400	3	9,3	0,32	23,2	0,095	0,129
			10,3	0,30	15,0		
АДР-105/500	500	3	8,0	0,360	25,0	0,108	0,180
			8,5	0,366	24,0		
С «беличьей клеткой» на роторе							
ДАУ-10	50	1	31,4	0,128	22,0	0,075	0,104
			27,0	0,140	20,1		
ДКМ-2,5	400	2	3,2	0,009	30,0	0,040	0,064
			6,7	0,011	34,0		
ДА-32	400	3	7,2	0,008	10,0	0,032	0,037
			7,8	0,009	10,0		
АД-40	400	4	9,6	0,015	16,0	0,040	0,042
			10,7	0,017	12,0		

Примечание. В числителе приведены данные серийных (для ДБК и ДПР) и экспериментальных (для ДПФР) электродвигателей, а в знаменателе — расчетные данные.

ориентировочный характер и позволяют без пересчета провести лишь сравнительный анализ параметров. Однако, поскольку согласно (10) и (7)  $M_c$  прямо пропорционален, а  $T_m$  обратно пропорциональна  $\sigma_s$ , то их пересчет сводится к простым арифметическим действиям и не представляет никакой сложности.

Полученные зависимости рис. 1—3 позволяют сравнить и выбрать в зависимости от предъявляемых требований наиболее рациональный тип исполнительного электродвигателя переменного тока и одновременно определить оптимальный вариант основных геометрических размеров. При этом необходимо первоначально выделить ряд особенностей и свойств различных машин, которые являются в ряде случаев определяющими при выборе типа исполнительного электродвигателя и при этом практически не зависят от геометрических размеров и электромагнитных нагрузок.

1. Двигатели типа ДБК имеют меньший воздушный зазор, и как следствие этого, лучшие энергетические показатели, в частности,  $m_c$  (см. рис. 1). Следовательно, в устройствах, где мощность источника питания ограничена, предпочтительней использование ДБК.

2. Двигатели ДПР и ДПФР обладают большой чувствительностью за счет отсутствия реактивных зубцовых моментов и действия сил одностороннего магнитного притяжения. Следовательно, в прецизионных системах их применение более целесообразно.

3. В устройствах, к которым предъявляются жесткие требования по механической прочности, предпочтительнее применение ДБК. Это определяется в основном тем, что в ДПР и ДПФР тонкостенный немагнитный ротор установлен консольно и имеет невысокую механическую прочность. Этот недостаток, однако, можно в значительной мере преодолеть при использовании на внутреннем магнитопроводе элементов, стабилизирующих воздушный зазор [7], а в ДПФР, кроме того, применением полого ротора с двумя концевыми ступицами [8].

4. В случаях жестких требований по уровню шума необходимо выбрать ДПР, обладающий более бесшумным ходом.

5. В системах, требующих максимального момента в продолжительных стопорных режимах работы, наиболее целесообразно применение ДПФР (см. рис. 2).

6. Наиболее целесообразно выполнять ДПФР при  $D_k \geq 0,03 - 0,05$  м, поскольку по конструктивным соображениям при меньших диаметрах толщину внутреннего ротора  $\Delta_2$  затруднительно выполнять больше глубины проникновения электромагнитной волны, вследствие чего значение  $\text{cth } m_2 \Delta_2$  в выражении (6) может резко возрасти и тем самым характеристики машины сильно ухудшатся.

При строго лимитированных габаритах или  $T_m$ ,  $P_c$  и  $M_c$  необходимо воспользоваться рис. 1—3. При этом заметим, что приведенные в [3] рекомендации по диапазону диаметров корпуса  $D_k$ , при которых ДБК обеспечивает достаточное быстродействие, справедливы в основном для многополюсных машин (см. рис. 3). Кроме того, при выборе и проектировании исполнительных электродвигателей приходится кроме  $T_m$  учитывать еще целый ряд технических требований, причем некоторые величины могут оговариваться строго, а некоторые или указываются ориентировочно, или требуют обеспечения их максимальных значений,

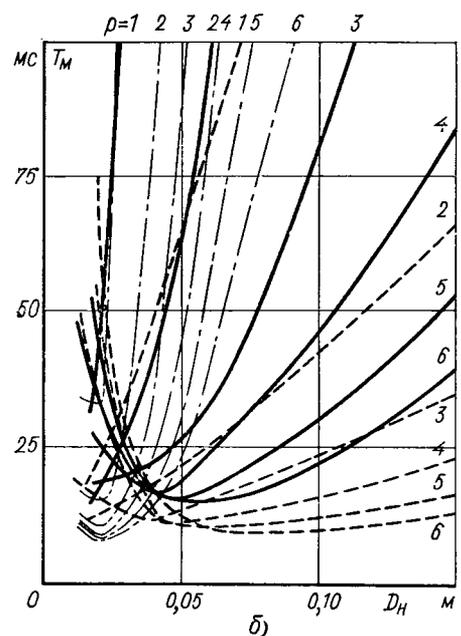
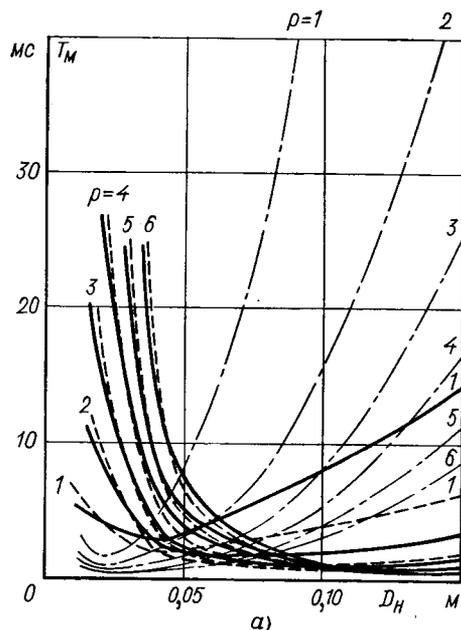


Рис. 3. Зависимость электроме­ханической постоянной времени от наружного диаметра пакета статора: а — при  $f=50$  Гц; б — при  $f=500$  Гц. — — ДПР; - - - ДПФР; — · — ДБК

поэтому необходим комплексный учет всех требований в каждом конкретном случае, не позволяющий дать однозначные обобщенные рекомендации по типу [3].

Например, если по ТЗ задано  $f=500$  Гц,  $p=6$  и  $T_m \leq 25$  мс, то, используя рис. 3,б, можно дать следующие рекомендации: применение ДБК возможно до  $D_k \geq 0,055$  м, ДПР — при  $D_k = 0,03 - 0,11$  м, ДПФР — при  $D_k \geq 0,035$  м. В том случае, если в ТЗ оговаривается  $D_k \leq 0,06$  м (т. е.  $D_k \leq 0,055$  м) возможно применение любого из этих типов электродвигателей. Окончательный выбор типа машины нужно сделать с учетом остальных требований ТЗ. Так, если задан  $M_c \geq 0,08$  Н·м, то по рис. 2,б выбираем ДПФР, так как ДПР и ДБК не смогут обеспечить требуемого значения  $M_c$ .

С помощью полученных кривых рис. 1—3 можно решать и различные задачи оптимального проектирования. Пусть при тех же исходных данных ( $f=500$  Гц,  $p=6$ ,  $T_m \leq 25$  мс) необходимо спроектировать электродвигатель, имеющий  $M_c \geq 0,1$  Н·м

и минимально возможные  $P_c$  и габариты. Используя рис. 3,б и 2,б, определяем, что для ДБК получить  $M_c \geq 0,1$  Н·м при  $D_n \leq 0,055$  м невозможно. В ДПР это требование выполняется при  $D_n \geq 0,073$  м, а в ДПФР — при  $D_n \geq 0,062$  м. Однако по рис. 1,б находим, что в ДПФР потребляемая мощность при  $D_n = 0,062$  м в 1,5 раза больше, чем у ДПР при  $D_n = 0,073$  м. Таким образом, при данных требованиях ТЗ наиболее целесообразно выбрать ДПР с  $D_n = 0,073$  м. Аналогично описанному можно выбрать тип исполнительного электродвигателя и при другом исходном задании. Поскольку такой выбор с использованием рис. 1—3 не представляет принципиальной сложности, то более подробно он не описывается.

**Выводы.** 1. Разработка универсальных обобщенных рекомендаций по выбору типа исполнительного электродвигателя переменного тока в зависимости от какого-либо одного критерия нецелесообразна. Необходим комплексный учет требований технического задания в каждом конкретном случае. Полученные аналитические зависимости и рассчитанные по ним кривые  $m_c$ ,  $M_c$ ,  $T_m = f(D_n, p)$  позволяют уже на первом этапе проектирования по исходным данным выбрать наиболее рациональный тип электродвигателя и определить предварительно оптимальный вариант основных геометрических размеров, которые затем уточняются при конструировании и полном расчете машины.

2. Зависимости  $m_c$ ,  $M_c$  и  $T_m = f(D_n, p)$  позволяют решать различные задачи оптимального проектирования, например, для заданных  $f$  и  $D_k$  путем выбора оптимального числа пар полюсов  $p$  получить максимально возможные значения  $m_c$  или  $M_c$ , или минимальную  $T_m$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каасик П. Ю., Несговорова Е. Д., Борисов А. П. Расчет управляемых короткозамкнутых микродвигателей. — Л.: Энергия, 1972.
2. Филатов М. Н., Цой В. Н. Двухроторные асинхронные электродвигатели для автоматических устройств. — ЭП. Электрические машины, 1978, вып. 9(91).
3. Балашова Н. А. Сравнительные характеристики управляемых асинхронных двигателей с полым ротором и ротором типа «беличья клетка». — В кн.: Электрические машины малой мощности. — Л.: Наука, 1970.
4. Хрушев В. А. Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики. — Л.: Энергия, 1969.
5. Бочкарев И. В. Расчет электромагнитного поля двухроторного асинхронного двигателя. — Электричество, 1982, № 5.
6. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором. — М.: Энергия, 1968.
7. А. с. 851668 (СССР). Асинхронный электродвигатель / И. В. Бочкарев. Оpubл. в БИ, 1981, № 28.
8. А. с. 817875 (СССР). Асинхронный электродвигатель / И. В. Бочкарев. Оpubл. в БИ, 1981, № 12.

[19.04.82]

УДК 62-83:621.3.078

## Прямое цифровое подчиненное регулирование вентильного электропривода постоянного тока

ФАЙНШТЕЙН Э. Г., доктор техн. наук, ФАЙНШТЕЙН В. Г., канд. техн. наук,  
ЖУКОВ Н. С., инж.  
Украинская ССР, Кривой Рог

Одно из важных направлений автоматизации производства — это обеспечение связанного управления многомашинными комплексами, применение автоматизированных систем управления технологическим процессом в целом с помощью ЭВМ. Как правило, конечным звеном в такой сложной управляемой системе является электропривод с локальной системой управления, поэтому в современных условиях возросли требования к локальным системам автоматического управления (САУ), важнейшими из которых являются:

обеспечение приема и обработки информации систем управления высшего уровня иерархии и передачи информации о состоянии привода и технологического агрегата в эту систему;

высокое качество регулирования и выполнение сложных законов регулирования.

Удовлетворение этих требований на базе существующей аналоговой техники связано со значительными трудностями и затратами.

За последнее время достигнут значительный прогресс в области дискретной микроэлектроники, в результате которого резко улучшились качественные показатели цифровых вычислительных устройств (ЦВУ). Одним из перспективных направлений удовлетворения повышающихся требований к САУ является использование ЦВУ в качестве регуляторов [1].

Применение ЦВУ дает возможность реализовать различные принципы автоматического регулирования и создать цифровые системы автоматического регули-

рования (ЦСАР) электропривода различного назначения.

Гибкость и универсальность алгоритмов и простота ввода сигналов в ЦВУ позволяет разработать локальные ЦСАР с учетом требований к регулированию многодвигательного привода агрегатов и АСУТП. Кроме указанных достоинств цифровые системы имеют важное преимущество перед аналоговыми, заключающееся в значительном снижении трудозатрат и стоимости их производства благодаря высокому уровню интеграции и технологии изготовления элементов.

В статье изложены принципы создания цифровой системы авторегулирования, сочетающей достоинства метода подчиненного регулирования с преимуществами цифровых регуляторов. Приведенный метод синтеза такой ЦСАР основан на использовании импульсной передаточной функции силового звена привода — вентильного преобразователя (ВП) с двигателем постоянного тока [2], дающей связь в области изображений дискретного преобразования Лапласа между приращениями площади выпрямленного тока за интервал повторения вычислений (ИПВ) и угла управления ВП.

В простейшем случае рассматриваемая система регулирования состоит из ЦВУ, датчика площади тока и датчика скорости, работающих синхронно с сетью, питающей ВП, преобразователя цифрового кода в угол управления и устройства синхронизации работы регулятора с тактами преобразования напряжения питающей сети.

Существенной частью задачи синтеза ЦСАР является определение передаточной функции ЦВУ  $K_{ц}^*(q)$ , описывающей связь между задаваемыми на вход ВП изменениями угла управления  $\Delta\alpha^*(q)$  с изменениями входных величин привода в дискретные моменты времени. Передаточная функция определяет программу работы ЦВУ, а также его необходимую мощность, быстродействие и объем памяти.

Цифровая САР может быть осуществлена в однопроцессорном варианте с передаточной функцией

$$K_{ц}^*(q) = \prod_{i=1}^m K_{цi}^*(q) \quad (1)$$

или многопроцессорном варианте

$$K_{ц}^*(q) = \sum_{m=1}^r \prod_{i=1}^m K_{цi}^*(q). \quad (2)$$

В дальнейшем выбран однопроцессорный вариант как более просто реализуемый и позволяющий осуществить многоконтурную систему регулирования скорости с последовательной коррекцией фазовых координат электропривода (тока и скорости). В этом случае ЦВУ осуществляет функции двух регуляторов, причем контур регулирования тока является внутренним для контура регулирования скорости (рис. 1). Так как скорость двигателя изменяется значительно медленнее тока и, в общем случае, частота регулирования скорости может в  $N$  раз ( $N=1, 2, \dots$ ) отличаться от частоты регулирования тока, в структурную схему рис. 1 введены два импульсных элемента.

Для синтеза импульсных регуляторов тока и скорости воспользуемся критериями и порядком разработки, аналогичными принятым при проектировании аналоговых систем подчиненного регулирования, т. е. определим передаточную функцию:

регулятора тока  $K_{р.т}^*(q)$  по желаемому характеру процесса изменения якорного тока при скачке задания на его входе;

регулятора скорости  $K_{р.с}^*(q)$  по желаемому характеру изменения скорости при скачке задания на его входе.

Подобный метод может быть использован при разработке ЦСАР других фазовых координат. В дальнейшем квантованием по уровню пренебрегаем.

**Синтез регулятора тока.** При определении передаточной функции регулятора тока пренебрегаем действием обратной связи по э. д. с. двигателя [2]. Обратим внимание на выбор в качестве регулируемой величины внутреннего контура площади выпрямленного тока. Он продиктован тем обстоятельством, что приращение скорости привода на интервале повторения вычислений пропорционально интегралу выпрямленного тока. Эта величина в дальнейшем обозначается с чертой сверху  $\bar{i}$ .

Выбор же в качестве длительности интервала повторения вычислений интервала преобразования позволяет синхронизировать работу регуляторов с естественной дискретизацией работы преобразователя.

В качестве желаемого процесса при скачкообразном управляющем воздействии принят экспоненциальный закон изменения тока с показателем экспоненты  $\gamma$ . Это позволяет ограничить скорость нарастания тока до значения, допустимого по условиям работы механооборудования и локализации аварий, связанных с прорывами инвертора.

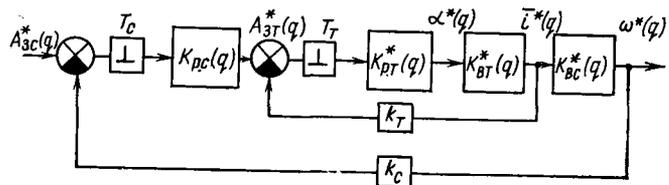


Рис. 1.

В рассматриваемом случае желаемая передаточная функция

$$K_{ж}^*(q, 0) = \frac{1 - e^{-\gamma}}{e^q - e^{-\gamma}} \frac{1}{k_T}, \quad (3)$$

где  $k_T$  — передаточное отношение датчика среднего тока.

Воспользовавшись передаточной функцией ВП [2] и методикой выбора последовательных корректирующих звеньев [3], получим передаточную функцию регулятора тока:

$$K_{р.т}^*(q) = \frac{(1 - e^{-\gamma})(e^q - e^{-\gamma_1})}{k_T(1 - e^{-\gamma_1})(e^q - 1) 2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \frac{2\pi}{m} \alpha_0}, \quad (4)$$

где  $\alpha_0$  — начальное значение угла управления;  $\theta_1 = 1/\tau_1$  — электрическая постоянная якорной цепи в долях единиц;  $r, L$  — эквивалентные параметры силовой цепи ВП;  $m$  — фазность вентильного преобразователя;  $\omega$  — круговая частота питающего напряжения.

Передаточной функции (4) соответствует вычислительный алгоритм ЦВУ

$$\Delta\alpha[n] = -k_1(\bar{i}_3[n] - \bar{i}[n]) - k_2 \sum_{j=0}^{n-1} (\bar{i}_3[j] - \bar{i}[j]), \quad (5)$$

где  $\Delta\alpha[n]$  — приращение угла управления на  $n$ -м интервале;  $\bar{i}_3[n]$  — заданное значение площади выпрямленного тока на  $n$ -м интервале;  $\bar{i}[n]$  — фактическое значение площади тока.

Коэффициенты настройки регулятора

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{(1 - e^{-\gamma})}{k_T(1 - e^{-\gamma_1}) 2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \frac{2\pi}{m} \alpha_0}; \\ k_2 &= k_1(1 - e^{-\gamma_1}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Объект управления — тиристорный преобразователь — звено, имеющее запаздывание на один интервал преобразования. С учетом последнего алгоритм вычисления угла управления имеет вид

$$\Delta\alpha[n] = -k_1(\bar{i}_3[n+1] - \bar{i}[n-1]) - k_2 \sum_{j=0}^{n-2} (\bar{i}_3[j] - \bar{i}[j]). \quad (7)$$

Запаздывание реализации угла управления на один интервал приводит к ухудшению качества регулирования. Вместо желаемой экспоненты закон изменения среднего тока при единичном скачке задания имеет вид

$$\bar{i}^*(q) = \frac{(1 - e^{-\gamma}) e^q}{(e^q - 1)(e^{2q} - e^q + 1 - e^{-\gamma})}$$

или

$$\bar{i}[n] = 1[n-1] - e^{-\gamma(n-1)} c) s \mu(n-1) - \frac{0,5 - e^{-\gamma}}{\sin \mu} \sin \mu(n-1), \quad (8)$$

где  $1 - e^{-T} = e^{2\alpha}$ ,  $2e^{\alpha} \cos \mu = 1$ .

Это означает, что при  $e^{-\alpha} < \frac{3}{4}$  ( $\gamma > 0,287$ ) процесс

установления среднего тока происходит с затухающими колебаниями. Неблагоприятное влияние запаздывания легко устранить с помощью импульсной коррекции [3], при которой структурная схема компенсированного контура тока имеет вид, показанный на рис. 2 с передаточной функцией компенсирующего звена

$$K^*(q) = (1 - e^{-T}) e^{\alpha}, \quad K^*_s(q) = 1.$$

Вычислительный алгоритм ЦВУ — регулятора тока, обеспечивающий желаемое качество переходного процесса (с учетом компенсации запаздывания), остается достаточно простым:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha [n] &= -k_1 \Delta \bar{i} [n-1] - k_2 \sum_{j=0}^{n-2} \Delta \bar{i} [j]; \\ \Delta \bar{i} [n] &= \bar{i}_s [n] - \bar{i} [n] - (1 - e^{-T}) \Delta \bar{i} [n-1]. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В принципе, при наличии достаточных форсировок по напряжению преобразователя цифровая система позволяет реализовать процесс за один шаг (ИПВ). При этом естественно возникают вопросы, связанные с влиянием на процесс регулирования погрешностей датчиков, колебаниями напряжения сети и т. п. Эти вопросы в статье не рассматриваются.

**Анализ погрешностей регулятора тока.** Алгоритм (9) был получен в предположении постоянства коэффициента усиления силового звена привода и при пренебрежении внутренней обратной связью по э. д. с. двигателя. Влияние этих факторов приводит к отклонению действительного процесса от желаемого. Оценим составляющие общей погрешности раздельно.

Структурная схема контура тока с учетом обратной связи по э. д. с. двигателя приведена на рис. 3. Для характеристики силового звена используется его передаточная функция [2], полученная при ступенчатой аппроксимации зависимости э. д. с. двигателя от времени.

При единичном скачке задания на входе регулятора средний ток на выходе системы (рис. 3) изменяется по закону:

$$\bar{i}^*(q) = \frac{(e^q - e^{-\tau_1})(1 - e^{-T}) e^q}{(e^{2q} + a_2 e^{2q} + a_1 e^q + a_0)(e^q - 1)}, \quad (10)$$

где коэффициенты полинома знаменателя:

$$\begin{aligned} a_0 &= \tau_2 (1 - e^{-T}) \left( e^{-\tau_1} - \frac{1 - e^{-\tau_1}}{\tau_1} \right); \\ a_1 &= e^{-\tau_1} - \tau_2 \left( e^{-\tau_1} - \frac{1 - e^{-\tau_1}}{\tau_1} \right) + \\ &+ (1 - e^{-T}) \left[ e^{-\tau_1} + \tau_2 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\tau_1}}{\tau_1} \right) \right]; \end{aligned}$$

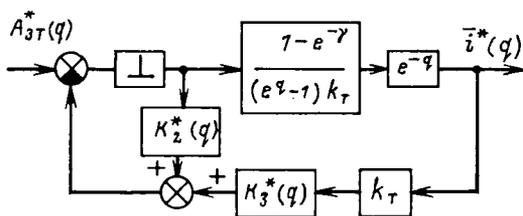


Рис. 2.

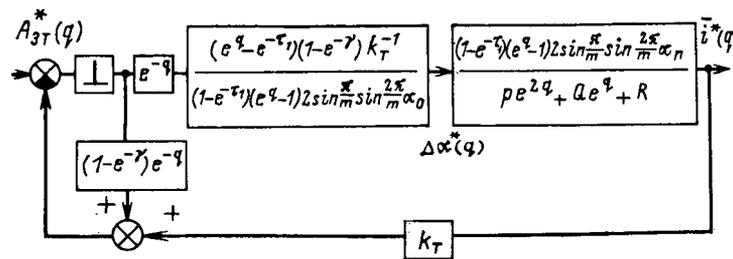


Рис. 3.

$$a_2 = -e^{-\tau_1} - e^{-T} + \tau_2 \left( 1 - \frac{1 - e^{-\tau_1}}{\tau_1} \right).$$

Здесь  $\frac{1}{\tau_2} = \theta_2$  — электромеханическая постоянная электропривода в относительных единицах [2];  $\tau_2 = \frac{1}{\theta_2} = \frac{2\pi c_e c_m \Phi^2}{m \omega r J}$ ;  $J$  — момент инерции привода;  $\Phi$  — поток возбуждения двигателя;  $c_e, c_m$  — конструктивные постоянные двигателя.

В области  $0 \leq \tau_1(\tau_2) \leq 5,12$ , в которой заключены абсолютное большинство постоянных промышленных приводов,  $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 < 0$  и выполняются условия устойчивости замкнутой импульсной системы [3].

Статический ток системы

$$\bar{i}[\infty] = \frac{1}{1 + \tau_2 \frac{2 - e^{-T}}{1 - e^{-T}}}. \quad (11)$$

Следовательно, статическая погрешность возрастает с уменьшением показателя желаемого экспоненциального изменения тока. Она незначительна у приводов с большими моментами инерции.

По знаку дискриминанта характеристического полинома (10) в области параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  могут быть определены границы аperiodических режимов изменения  $\bar{i}[n]$  и указаны предельные значения  $\gamma$ , соответствующие этим режимам.

Следует заметить, что в большинстве практических случаев  $\tau_1(\tau_2) < 0,1$  внутренняя обратная связь по э. д. с. при правильном выборе  $\gamma$  не вызывает колебаний тока.

Действительный коэффициент усиления силового звена ВП

$$k_b = 2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \frac{2\pi}{m} \alpha [n] \quad (12)$$

зависит от фактического значения угла управления, поэтому идеальные значения коэффициентов усиления регулятора  $k_1$  и  $k_2$ , принятые в (6) при вычислении  $\Delta \alpha [n]$ , отличаются от фактических в процессе регулирования.

С учетом изменения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  за счет отличия  $\alpha [n]$  от  $\alpha_0$  передаточная функция замкнутого контура регулирования тока равна:

$$K^*_s(q) = \frac{(1 - e^{-T}) \sigma}{e^{2q} - e^{-T} e^q + (1 - e^{-T})(\sigma - 1)}, \quad (13)$$

причем принято  $k_1 = \sigma$  ( $\sigma \geq 1$ ).

При  $\sigma > 1 + \frac{e^{-2T}}{4(1 - e^{-T})}$  полюса передаточной функции

$$e^{q_{1,2}} = \frac{e^{-T}}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{e^{-T}}{2} \right)^2 - (1 - e^{-T})(\sigma - 1)} \quad (14)$$

являются комплексными числами и процесс регулирования тока колебательный.

При  $\sigma > \frac{2 - e^{-T}}{1 - e^{-T}}$  процесс регулирования неустойчивый.

Апериодические процессы имеют место в области  $0 < \sigma \leq 1 + \frac{e^{-2T}}{4(1 - e^{-T})}$  и изменение тока подчинено закону

$$\bar{i}[n] = 1 - \frac{(1 - e^{-T})\sigma}{e^{q_1} - e^{q_2}} \left( \frac{e^{q_1 n}}{1 - e^{q_1}} - \frac{e^{q_2 n}}{1 - e^{q_2}} \right). \quad (15)$$

Колебательный процесс изменения тока соответствует решетчатой функции

$$\bar{i}[n] = 1 - e^{\eta(n-1)} \cos \rho(n-1) - C \cdot 1[n-1] \sin \rho(n-1), \quad (16)$$

где

$$\eta = \frac{1}{2} \ln(1 - e^{-T})(\sigma - 1); \quad e^{-T} = 2e^{\eta} \cos \rho;$$

$$C = \frac{(1 - e^{-T})(\sigma - 1) - e^{-T}}{\sqrt{4(1 - e^{-T})(\sigma - 1) - e^{-2T}}}.$$

Максимум решетчатой функции (16) наступает на интервале  $2k\pi < \rho n_m < (2k+1)\pi$  ( $k=1, 2, \dots$ ), на котором ее первая разность

$$\Delta \bar{i}[n] = \frac{(1 - e^{-T})\sigma}{\eta \sin \rho} e^{\eta(n-1)} \sin \rho(n-1) \quad (17)$$

изменяет знак на отрицательный.

Возможность работы регулятора с большим показателем экспоненты  $\gamma$  без заметного ухудшения качества регулирования за счет отклонения расчетного коэффициента усиления от фактического достигается введением в алгоритм ЦВУ коррекции значения коэффициента  $k_1$  при изменении целой части угла:

$$k_1 = \frac{(1 - e^{-T})}{(1 - e^{-T}) 2 \sin \frac{\pi}{m} \sin \frac{\pi}{2m} (1 + 2E_\alpha)}, \quad (18)$$

где  $E_\alpha$  — целая часть угла управления  $\alpha[n]$ .

**Синтез регулятора скорости.** Рассматривается система с  $N=1$ , в которой регулирование скорости и тока осуществляется в каждом ИПВ. При синтезе регулятора скорости используется важное достоинство импульсных систем — возможность организовать процесс управления таким образом, чтобы он заканчивался за минимальное (конечное) время и обеспечивалась заданная степень астатизма системы.

Связь  $D$ -изображений скорости и тока получена почленным интегрированием за ИПВ уравнения равновесия моментов электропривода и последующим применением дискретного преобразования Лапласа

$$\omega^*(q) = \frac{e^q}{(e^q - 1)\theta_M} [\bar{i}^*(q) - \bar{i}_c^*(q)], \quad (19)$$

где  $\theta_M = \frac{1}{\tau_2} \frac{1}{u_H - i_H}$ ;  $\bar{i}_c^*(q)$  — изображение среднего тока нагрузки за ИПВ;  $\omega^*(q)$  — изображение скорости двигателя;  $u_H, i_H$  — номинальные значения напряжения и тока в долях базовых значений.

4\*

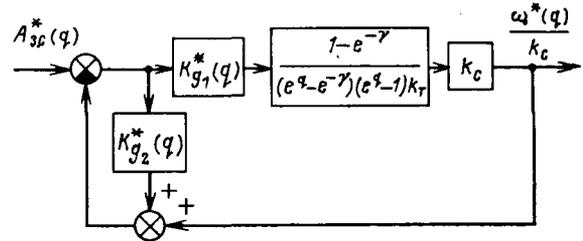


Рис. 4.

Для неизменной части системы регулирования скорости получаем передаточную функцию

$$K_{п.с}^*(q) = \frac{(1 - e^{-T}) e^{-q}}{(e^q - 1)(e^q - e^{-T})} \frac{k_c e^q}{k_T \theta_M} = \frac{AP^*(q)}{Q^*(q)(e^q - 1)}, \quad (20)$$

где

$$A = \frac{(1 - e^{-T}) k_c}{k_T \theta_M}, \quad P^*(q) = e^q, \quad Q^*(q) = (e^q - e^{-T}) e^q.$$

Минимальная длительность переходного процесса составляет [3]:

$$s_{\min} = l + r_a - 1, \quad (21)$$

где  $l$  — число полюсов передаточной функции системы регулирования;  $r_a$  — порядок астатизма синтезируемой системы регулирования скорости.

В рассматриваемом случае  $l=2, s_{\min}=r+1$ .

Передаточная функция последовательного корректирующего звена

$$K_{п.с.}^*(q) = \frac{(e^q - e^{-T}) M^*(q, 0)}{(e^q - 1) N^*(q, 0)}, \quad (22)$$

где

$$M^*(q, 0) = a_{l_M} e^{q l_M} + a_{l_M-1} e^{q(l_M-1)} + \dots + a_1 e^q + a_0;$$

$$N^*(q, 0) = b_{l_N} e^{q l_N} + b_{l_N-1} e^{q(l_N-1)} + \dots + b_1 e^q + b_0.$$

Коэффициенты полиномов  $M^*(q, 0)$  и  $N^*(q, 0)$  определяются из уравнения

$$AM^*(q, 0) + (e^q - 1) N^*(q, 0) = e^{q s_{\min}} \quad (23)$$

путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях  $e^q$ . Передаточная функция оптимизированного замкнутого контура:

$$K_{з.с.о}^*(q) = \frac{P^*(q) M^*(q, 0)}{e^{q s_{\min}} k_c}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости с введенным последовательно корректирующим элементом  $K_{п.с.}^*(q)$  (22) отличается от передаточной функции разомкнутого оптимизированного контура скорости  $K_{з.с.о}^*(q)$  запаздыванием на один шаг.

Для компенсации запаздывания вводится параллельное компенсирующее звено с передаточной функцией  $K_{g2}^*(q)$  (рис. 4), значение которой

$$K_{g2}^*(q) = (1 - e^{-q}) K_{п.с.о}^*(q),$$

где передаточная функция разомкнутого оптимизированного контура скорости

$$K_{п.с.о}^*(q) = \frac{M^*(q, 0)(1 - e^{-T}) e^{-q} k_c}{N^*(q, 0)(e^q - 1) k_T}.$$

Порядок астатизма	Полиномы			Передаточная функция корректирующего звена		Передаточная функция оптимизированного контура скорости		Реакция системы на задание	
	$M^*(q)$	$N^*(q)$	$P^*(q)$	$K^*_{g1}(q)$	$K^*_{g2}(q)$	Разомкнутого $K^*_{с.о.р}(q)$	замкнутого $K^*_{з.с.о}(q)$	единичный скачок	линейно изменяющаяся
1	$\frac{1}{A}$	$e^q + 1$	$A$	$\frac{e^q - e^{-1}}{A(e^q + 1)}$	—	$\frac{1}{2e^q - 1}$	$\frac{1}{e^{2q} k_c}$	$\frac{e^{-q}}{e^q - 1}$ $1 [n - 2]$	$\frac{e^{-q}}{(e^q - 1)^2}$ $[n - 2]$
1	$\frac{1}{A}$	$e^q$	$Ae^q$	$\frac{e^q - e^{-1}}{Ae^q}$	$e^{-q}$	$\frac{1}{(e^q - 1)e^q}$	$\frac{1}{e^{2q} k_c}$	$\frac{e^{-q}}{e^q - 1}$ $1 [n - 2]$	$\frac{e^{-q}}{(e^q - 1)^2}$ $[n - 2]$
1	$\frac{1 - e^{-x}}{A}$	$e^q + (1 - e^{-x})$	$A$	$\frac{(1 - e^{-x})(e^q - e^{-1})}{A(e^q + 1 - e^{-x})}$	—	$\frac{1 - e^{-x}}{(e^q + 1 - e^{-x}) \times (e^q - 1)}$	$\frac{1 - e^{-x}}{e^q (e^q - e^{-x}) k_c}$	$\frac{1 - e^{-x}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)}$ $1 [n - 1] - e^{-x} (n - 1)$	$\frac{1 - e^{-x}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)^2}$ $[n - 1] - \frac{1 - e^{-x} (n - 1)}{1 - e^{-x}}$ $(n > 1)$
1	$\frac{1 - e^{-x}}{A}$	$e^q$	$Ae^q$	$\frac{(e^q - e^{-1})(1 - e^{-x})}{Ae^q}$	$(1 - e^{-x})e^{-q}$	$\frac{1 - e^{-x}}{e^q - 1}$	$\frac{1 - e^{-x}}{e^q (e^q - e^{-x}) k_c}$	$\frac{1 - e^{-x}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)}$ $1 [n - 1] - e^{-x} (n - 1)$	$\frac{1 - e^{-x}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)^2}$ $[n - 1] - \frac{1 - e^{-x} (n - 1)}{1 - e^{-x}}$ $(n > 1)$
2	$\frac{3e^q - 2}{A}$	$e^q + 2$	$A$	$\frac{(e^q - e^{-1})(3e^q - 2)}{A(e^q + 2)(e^q - 1)}$	—	$\frac{3e^q - 2}{(e^q + 2)(e^q - 1)^2}$	$\frac{3e^q - 2}{e^{2q} k_c}$	$\frac{3e^{-q} - 2e^{-2q}}{e^q - 1}$ $3 [n - 2] - 2 [n - 3]$	$\frac{3e^{-q} - 2e^{-2q}}{(e^q - 1)^2}$ $3 \cdot 1 [n - 2] e^{-x} (n - 2)$ $- 2 \cdot 1 [n - 3] e^{-x} (n - 3)$
2	$\frac{2e^q - 1}{A}$	$e^q$	$Ae^q$	$\frac{(e^q - e^{-1})(2e^q - 1)}{Ae^q (e^q - 1)}$	$\frac{2e^q - 1}{e^q (e^q - 1)}$	$\frac{2e^q - 1}{e^q (e^q - 1)^2}$	$\frac{2e^q - 1}{e^{2q} k_c}$	$\frac{2e^{-q} - e^{-2q}}{(e^q - 1)}$ $2 [n - 2] - 1 [n - 3]$	$\frac{2e^{-q} - e^{-2q}}{(e^q - 1)^2}$ $2 \cdot 1 [n - 2] e^{-x} (n - 2)$ $- 1 [n - 3] e^{-x} (n - 3)$
2	$\frac{e^q - 1}{A} \times (2 - e^{-x})$	$e^q$	$Ae^q$	$\frac{(e^q - e^{-1}) [(R - e^{-x})(e^q - 1)]}{Ae^q (e^q - 1)}$	$\frac{(2 - e^{-x})e^q - 1}{e^q (e^q - 1)}$	$\frac{(2 - e^{-x})e^q - 1}{e^q (e^q - 1)^2}$	$\frac{(2 - e^{-x})e^q - 1}{e^{2q} (e^q - e^{-x}) k_c}$	$\frac{(2 - e^{-x}) - e^{-q}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)}$ $\frac{2 - e^{-x}}{1 - e^{-x}} [1 [n - 1] - 1] e^{-x} (n - 1)$ $-\frac{1}{1 - e^{-x}} [1 [n - 2] - e^{-x} (n - 2)]$	$\frac{(2e^{-x}) - e^{-q}}{(e^q - e^{-x})(e^q - 1)^2}$ $[n - 1] - e^{-x} (n - 2)$ $(n \geq 2)$

В таблице приведены значения полиномов  $M^*(q, 0)$ ,  $N^*(q, 0)$  передаточных функций  $K^*_{g1}(q)$ ,  $K^*_{g2}(q)$ , передаточной функции оптимизированной системы регулирования скорости для различных вариантов коррекции при  $r_a=1, 2$ , а также реакции системы на единичный скачок и линейно изменяющееся задание.

Обращает на себя внимание значительное перерегулирование, наблюдаемое в ряде случаев (например, при  $r_a=2$ , оно составляет 100%). Это означает, что обеспечение конечной длительности переходного процесса не всегда позволяет обеспечить требования к его качеству.

Для устранения значительного перерегулирования в уравнение (23) для определения коэффициентов полиномов  $M^*(q, 0)$  и  $N^*(q, 0)$  вводится коэффициент жесткости [3] и измененное уравнение для определения этих коэффициентов:

$$AM^*(q, 0) - (e^q - 1)N^*(q, 0) = e^{q_{s\min}}(e^q - e^\chi),$$

где  $\chi$  — коэффициент, определяющий «жесткость» системы регулирования.

Анализ переходных процессов описанных в таблице систем показывает, что системы с астатизмом первого порядка обеспечивают статическую ошибку в значении скорости не выше  $2\bar{i}[\infty]/\theta_M$  — для систем с неограниченным запасом устойчивости,  $i[\infty] \frac{2k_c}{(1-e^{-\chi})}$  — для систем с ограниченным запасом устойчивости. Динамическая ошибка для систем с астатизмом второго порядка не превышает  $\bar{i}[\infty] \frac{2k_c}{\theta_M}$ .

Предлагаемые алгоритмы ЦСАР тиристорного привода постоянного тока могут быть реализованы в системах с серийными микро-ЭВМ, освоенными отечественной промышленностью. Однако и объем памяти значительно превышает требуемый. Это обстоятельство, а также относительно невысокое быстродействие и необходимость регенерации памяти делают их применение нерациональным.

Для ЦСАР рассматриваемого привода было разработано специализированное ЦВУ со следующими основными показателями: число разрядов 16, емкость ОЗУ 512 слов, емкость ПЗУ 2КБ, время выполнения операций сложения 2,4 мкс.

Быстродействие устройства позволяет реализовать операции управления приводом за время до 1 мс и

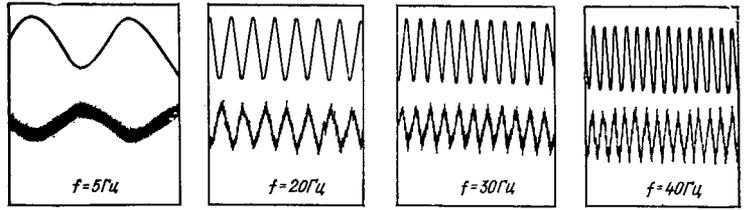


Рис. 5.

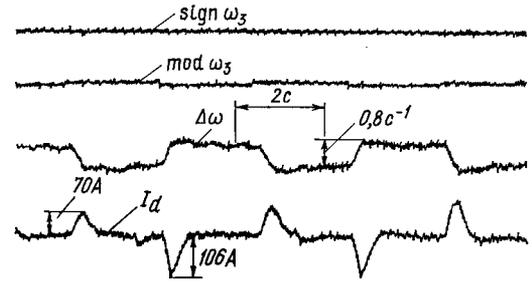


Рис. 6.

использовать оставшееся время ИПВ для самоконтроля и обмена информацией с другими устройствами управления.

Осциллограммы переходного процесса (рис. 5 и 6) регулирования тока и скорости в реверсивном приводе мощностью  $P=55$  кВт,  $\theta_1=10,2$ ,  $\theta_2=18,6$  по разработанной ЦСАР и описанным в статье алгоритмам показали, что изменение скорости при набросе нагрузки  $M_n$  не превосходит 2%, частоты среза частотных характеристик тока и скорости оказались не ниже соответствующих в лучших системах аналогового регулирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы применения ЭВМ в автоматизированном электроприводе / О. В. Слежановский и др. — Электротехника, 1976, № 9.
2. Файнштейн Э. Г., Файнштейн В. Г. Упрощенная импульсная модель вентиляльного преобразователя. — Электричество, 1980, № 10.
3. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. — М.: Физматгиз, 1962.

[30.07.81]



## Повышение помехоустойчивости микро-ЭВМ, используемых в устройствах релейной защиты

ЛЕСИН Н. М., инж., ФАЙБИСОВИЧ В. А., канд. техн. наук  
Белорусская ССР, Минск

Серийный выпуск микро-ЭВМ создал возможности для построения на их базе устройств релейной защиты и автоматики с целью улучшения технических характеристик, повышения аппаратной надежности и сокращения трудозатрат на наладку и эксплуатацию [1].

Энергетические объекты (электрические станции и подстанции) характеризуются весьма высоким уровнем электромагнитных помех, что требует принятия специальных мер по защите микро-ЭВМ. Источниками таких помех могут быть грозовые разряды, короткие замыкания в высоковольтных сетях, повторные зажигания дуги при коммутациях, коронирование [2]. Например, грозовые перенапряжения могут вызвать на контуре заземления напряжения до 20 кВ с частотами в диапазоне от 50 кГц до 5 МГц [3]. При повторных зажиганиях дуги во время отключения линейного разъединителя во вторичных цепях были зафиксированы перенапряжения, достигающие 16 кВ [4]. Для сравнения отметим, что в цеховой сети приборостроительного завода при длительной регистрации не зафиксировано перенапряжения с амплитудой более 300 В [2].

Для надежного функционирования устройств релейной защиты и автоматики на основе микро-ЭВМ необходимо обеспечить отсутствие повреждений в устройстве при воздействии помех заданной амплитуды, энергии, формы и правильное его функционирование в тех же условиях.

Обработка методов и средств защиты от помех в реальных условиях затруднена случайным характером возникновения этих помех, большой длительностью и трудоемкостью испытаний. Поэтому большое внимание уделяется разработке имитаторов помех (ИП), моделирующих основные виды помех, характерные для энергетических объектов [3, 5 и 6].

В [3 и 6] для исследования помехоустойчивости электронных устройств рекомендуются ИП, реализующие стандартный экспоненциальный импульс 1,2/50 мкс, используемый при высоковольтных испытаниях [7] и высокочастотный тестовый сигнал. Последний представляет собой затухающие синусоидальные колебания напряжения с частотой около 1 МГц.

Для различных условий эксплуатации электронных устройств в [6] предлагается три уровня испытательного напряжения, соответствующих I, II и III классам эксплуатации. Устройства, эксплуатируемые в соответствии с I классом, не подвергаются испытаниям неустановившимся повышенным напряжением. К I классу относятся хорошо помехозащищенные помещения. У них должен быть собственный контур заземления, использующий в качестве «земли» только электронные устройства. Для электронных устройств используется отдельный источник питания, а все реле, подключенные к нему или его сигнальным цепям, имеют диоды или RC-фильтры во избежание искрения.

Устройства, эксплуатируемые в соответствии с II классом, испытываются продольным импульсным и высокочастотным напряжением с амплитудой 1 кВ, приложенным между проводом и землей, и поперечным высокочастотным напряжением с амплитудой 0,5 кВ, приложенным между проводами.

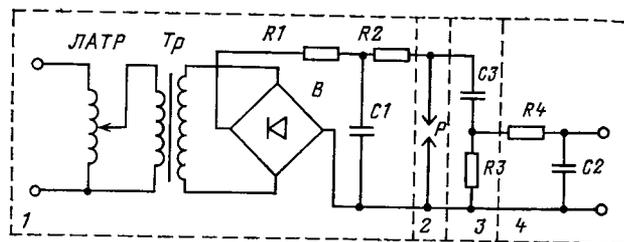


Рис. 1. Имитатор импульсных помех

К второму классу относятся помещения, где электронные устройства устанавливаются на одной панели с реле, а кабели электронных устройств проложены в непосредственной близости к силовым кабелям. Не исключено использование многожильных кабелей, объединяющих цепи электронных и релейных систем. Устройства, эксплуатируемые в соответствии с III классом, подвергаются продольному импульсному испытательному напряжению 5 кВ, а также высокочастотному продольному напряжению 2,5 кВ и поперечному 1 кВ. Электронные устройства, эксплуатируемые в соответствии с этим классом, подключены к общестанционной аккумуляторной батарее или общему источнику переменного оперативного тока.

Сигнальные цепи могут быть подключены либо к трансформатору тока или напряжения, либо расположены в кабеле большой длины, не имеющем экранирующей отметки, подсоединенной к «земле».

Имитатор импульсных помех (ИИП) представляет собой генератор стандартных экспоненциальных импульсов 1,2/50 мкс с регулируемой амплитудой до 5000 В (рис. 1). Схема ИИП получена в результате доработки схемы [6], она включает источник постоянного тока с большим выходным сопротивлением 1, воздушный разрядник 2, блок генерации импульсов 3, выходной блок 4. Принцип действия имитатора основан на периодическом разряде емкости C3 на калиброванный резистор R3 в момент пробоя воздушного разрядника. С калиброванного резистора экспоненциальный импульс подается на выход имитатора. Регулировка амплитуды импульса осуществляется входным автотрансформатором и регулировкой зазора разрядника. Регулировка частоты следования импульсов осуществляется изменением сопротивления R1.

Имитатор высокочастотных помех (ИВП) представляет собой генератор высокочастотных затухающих колебаний,гибающая которых снижается до 50% первоначального пикового значения после трех-шести периодов колебаний (рис. 2). Схема имитатора получена также в результате доработки схемы, приведенной в [6]. Технические характеристики ИВП: частота колебаний 1 МГц ± 10%; амплитуда 500–2500 В ± 10%; частота повторений пачек импульсов 390 Гц ± 10%. Имитатор состоит из задающего генератора 1, трехкаскадного усилителя мощности 2, первичного резонансного контура 3, контура затухания 4 и выходного блока 5.

Задающий генератор [8] вырабатывает синусоидальный сигнал с частотой 390 Гц, который усиливается услителем мощности и поступает на первичный резонансный контур. Переход на частоту 390 Гц обусловлен трудностями создания резонансного контура с высокой добротностью на рекомендуемой [6] рабочей частоте 200 Гц. Рабочая частота определяет лишь период повторения пачек высокочастотных импульсов и ее величина, как показывает эксперимент, не оказывает заметного влияния на помехоустойчивость микро-ЭВМ. Первичный LC-контур работает по принципу резонанса напряжения на частоте 390 Гц. При увеличении напряжения срабатывает воздушный разрядник P и замыкает контур затухания представляет собой LC-контур с собственной частотой 1 МГц. Затухающие в этом контуре колебания через выходной блок поступают на выход имитатора. Регулировка первоначального амплитудного значения осуществляется изменением выходного напряжения задающего генератора и изменением зазора разрядника.

С помощью имитаторов помех проведены исследования помехоустойчивости микро-ЭВМ семейств «Электроника С5». В первом этапе были проведены исследования помехоустойчивости микро-ЭВМ «Электроника С5-01» по сети питания и «Электроника С5-12» по цифровым входам, которые выполнены на TTL логике. При этом рассматривались задачи релейной защиты и автоматики, допускающие задержку входных сигналов по цифровым входам порядка 10 мс. Напряжение помех подавалось на зажимы блока питания непосредственно, а на цифровые

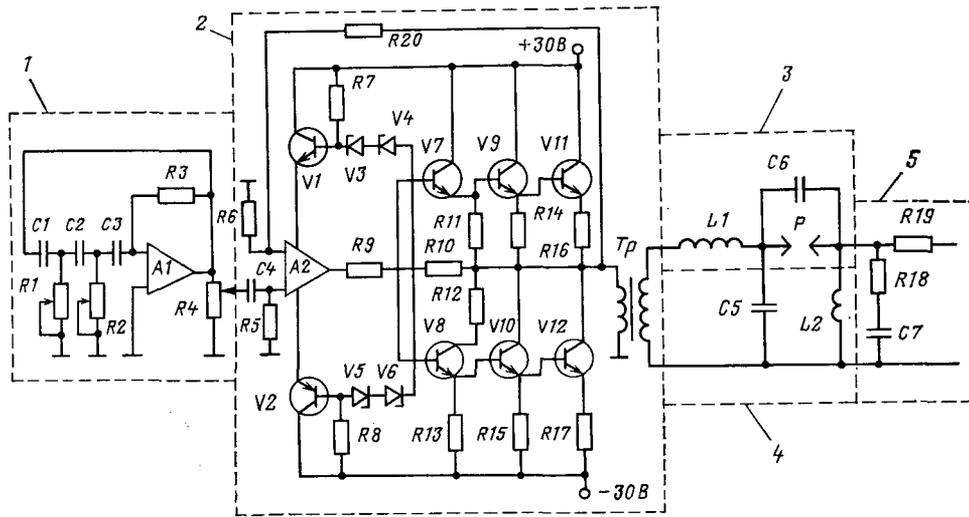


Рис. 2. Имитатор высокочастотных помех

входы — через цепи гальванической развязки, выполненные на реле РПГ-5.

Методика испытаний импульсным напряжением заключалась в наложении на сеть питания или информационные цепи микро-ЭВМ трех положительных и трех отрицательных импульсов с интервалом между импульсами не менее 5 с. При испытании микро-ЭВМ высокочастотным тестом на сеть питания или информационные цепи накладывались высокочастотные затухающие колебания с частотой 1 МГц в течение 2 мин. Микро-ЭВМ в процессе испытаний работала в режиме тестового контроля.

Схема испытаний приведена на рис. 3. В процессе испытаний микро-ЭВМ подвергалась воздействию только продольных помех, так как помехи указанного вида встречаются наиболее часто [3] и представляют наибольшую опасность для функционирования микро-ЭВМ.

На помехоустойчивость микро-ЭВМ по сети питания существенное влияние оказывает конструкция входного трансформатора. При использовании заводского тороидального трансформатора сбой микро-ЭВМ «Электроника С5-01» имели место при напряжении помехи 500 В. В процессе испытаний этот трансформатор вышел из строя вследствие электрического пробоя и был заменен на трансформатор с Ш-образным сердечником.

Замена реле РПГ-5 в цепях гальванической развязки на РЭС-22 заметно не изменила уровень помехоустойчивости микро-ЭВМ по отношению к импульсным и высокочастотным помехам в информационных цепях.

На основании исследований был сделан вывод о том, что помехоустойчивость микро-ЭВМ «Электроника С5-01» по отношению к импульсным и высокочастотным помехам по сети питания, а также помехоустойчивость микро-ЭВМ «Электроника С5-12» по отношению к помехам по информационным цепям без принятия дополнительных мер недостаточна даже для II класса эксплуатации.

Для повышения помехозащищенности микро-ЭВМ «Электроника С5-01» по сети питания в соответствии с рекомендациями [5], был опробован сетевой фильтр (рис. 4) с параметрами:  $L = 390$  мкГн,  $C = 0,03$  мкФ и  $C_1 = 0,015$  мкФ. Индуктивность  $L$  выполнена в виде катушки без ферромагнитного сердечника, а емкости  $C$  и  $C_1$  реализованы с использованием керамических конденсаторов типа КСО.

Для защиты и повышения помехоустойчивости микро-ЭВМ «Электроника С5-12» по информационным цифровым входам разработан фильтр, схема которого изображена на рис. 5; кроме того, для защиты от кратковременных помех использованы программные средства. Фильтр осуществляет ограничение входных сигналов до безопасного для элементов микро-ЭВМ уровня с помощью нелинейных резисторов и снижение их до уровня, обеспечивающего нормальное функционирование микро-ЭВМ с помощью линейных резисторов и емкостей.

Как продольные, так и поперечные помехи, попадающие во входные информационные цепи, эффективно ограничиваются делителями  $R1=R3$ ,  $R2=R4$  с использованием нелинейных сопротивлений ( $R3$  и  $R4$ ). Делитель  $R5=R6$  служит для снижения амплитуды поперечной помехи. Емкости  $C1$  и  $C2$  предназначены для фильтрации высокочастотных составляющих помехи. Сопротивление  $R7$ , включенное между цифровым входом и шиной

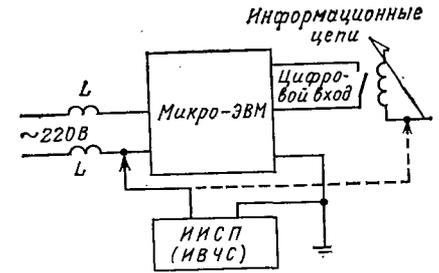


Рис. 3. Схема испытаний микро-ЭВМ на помехоустойчивость

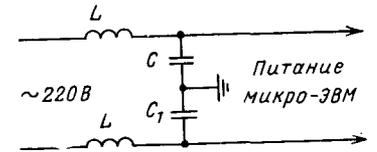


Рис. 4. Сетевой фильтр для микро-ЭВМ

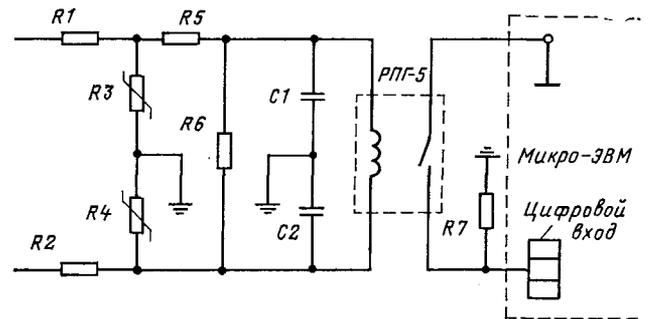


Рис. 5. Фильтр для защиты микро-ЭВМ по информационным цифровым входам

питания микро-ЭВМ, повышает ее помехозащищенность за счет увеличения мощности, необходимой для переключения транзисторов цифровых входов.

Улучшение отстройки от кратковременных помех достигается введением программной выдержки времени порядка 10 мкс. Необходимо отметить, что TTL-логика на цифровых входах применяется не только на микро-ЭВМ семейства «Электроника С5-12». Разработанный комплекс мероприятий по защите и повышению помехоустойчивости цифровых входов может найти более широкое применение, а имитаторы помех могут быть использованы для определения помехоустойчивости ЭВМ других типов, а также устройств релейной защиты и автоматики на полупроводниковых и интегральных элементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуров Н. С., Фабрикант В. Л., Чувчин В. Н. Применение микропроцессоров в устройствах релейной защиты и противоаварийной автоматики. — Изв. вузов. Энергетика, 1980, № 5.
2. Помехи в цифровой технике. — 71. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-исследовательской конференции «Исследование помех в цифровой технике и аппаратные способы борьбы с ними». — Вильнюс, 1971.
3. Anders R., Campling A. C., Champiot G. CIGRE Intern. Conf. on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1980 Session.
4. Фогель О., Хубенштайнер Н. Ограничение перенапряжений в измерительных, контрольных и сигнальных цепях на подстанциях высокого напряжения открытого типа. — М.: Релейная защита и противоаварийная автоматика. — М.: Энергия, 1976.
5. Гурвич И. С. Защита ЭВМ от внешних помех. — М.: Энергия, 1975.
6. Document IEC 255, Pt. 4, App. E, 1976.
7. Костенко М. В. Техника высоких напряжений. — М.: Высшая школа, 1973.
8. Алексеенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых интегральных схем. — М.: Советское радио, 1980.

# Импульсные реле сопротивления

КАРИНСКИЙ Ю. И., канд. техн. наук  
РСФСР, Новочеркасск

В дистанционной защите линий электропередачи применяются реле сопротивления, основанные на сравнении действующих или средних выпрямленных значений сигналов, сформированных из токов и напряжений защищаемой линии [1—3]. Недостатками этих реле являются узкий класс реализуемых характеристик срабатывания, включающий в себя прямую, окружность и их комбинации, а также низкая точность при искажении формы вторичного тока вследствие насыщения магнитопроводов измерительных трансформаторов. В связи с этим актуален поиск новых способов построения реле сопротивления, инвариантных к искажению формы выходных сигналов первичных измерительных преобразователей тока.

В статье описан способ осуществления реле сопротивления, обеспечивающий относительную простоту реализации сложных характеристик срабатывания, высокую точность и помехоустойчивость, свойственные дискретным автоматическим системам.

Способ состоит в формировании из тока — импульсного сигнала в виде последовательности амплитудно модулированных импульсов, а из напряжения — непрерывного сигнала с последующим сравнением этих сигналов. Высокая точность реле сопротивления обеспечивается формированием импульсного сигнала в моменты времени, когда отсутствует насыщение магнитопроводов первичных измерительных преобразователей тока. Таким моментом для трансректоров тока соответствуют переходы первичного тока через нулевые значения, а для трансформаторов тока с замкнутым магнитопроводом — амплитудные значения периодической составляющей первичного тока при углах отсечки вторичного тока, не превышающих  $\pi/2$ . Высокая помехоустойчивость обусловлена постоянным присутствием в элементе сравнения опорного сигнала, сформированного из напряжения и претворяющего срабатывание от помех, а также малой вероятностью совпадения во времени импульсного рабочего сигнала с импульсными помехами.

Синтез структуры импульсного реле сопротивления с заданной характеристикой срабатывания существенно упрощается при использовании полярной формы математического описания характеристики срабатывания, любая точка которой определяется двумя координатами — длиной радиуса-вектора  $z_c$  и полярным углом  $\varphi_p$ . В общем случае характеристика срабатывания

реле сопротивления описывается дробной функцией

$$z_c = \frac{f(\varphi_p)}{F(\varphi_p)} \quad (1)$$

В частности, линиям второго порядка с центром в начале координат соответствует обобщенное уравнение

$$z_c = \frac{z_c \min(\max)}{F(\varphi_p)} \quad (2)$$

где  $z_c \min(\max)$  — минимальное или максимальное сопротивление срабатывания.

Вследствие того, что  $z_c \min(\max) = \text{const}$  функция  $F(\varphi_p)$  пропорциональна конформному отображению типа инверсии функции  $z_c$  [4]. Характеристика срабатывания реле сопротивления реализуется посредством функционального преобразования переменных входных тока и напряжения. Из тока

$$i_p = I_{pm} \sin(\omega t + \psi_i) \quad (3)$$

формируется последовательность амплитудно-модулированных импульсных сигналов, описываемых импульсной функцией

$$e_I = \begin{cases} K_I I_{pm} = K_U z_c \min(\max) & \text{при } \omega t + \psi_i = 2n\pi + \gamma_i; \\ 0 & \text{при } \omega t + \psi_i \neq 2n\pi + \gamma_i, \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

где  $K_I$  и  $K_U$  — модули комплексных коэффициентов передачи формирователей сигналов соответственно из тока и напряжения;  $\gamma_i = 0$  для трансректоров и  $\gamma_i = 0,5$  для трансформаторов тока с замкнутым магнитопроводом.

Из напряжения

$$u_p = U_{pm} \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_p) \quad (5)$$

формируется непрерывный сигнал посредством операций трансформации, сдвига по фазе, выпрямления со сглаживанием и т. д., определяемых видом  $F(\varphi_p)$ . Ниже описаны несколько вариантов исполнений импульсных реле сопротивления с конкретными характеристиками срабатывания.

**Прямолинейная характеристика срабатывания, не проходящая через начало координат.** Уравнение этой характеристики (рис. 1, а) в полярной форме

$$z_c = \frac{z_c \min}{1 - \cos(\varphi_p - \varphi_{p \min \varphi})} = \frac{K_U z_c \min}{K_U \sin(0,5\pi + \varphi_p - \varphi_{p \min \varphi})} \quad (6)$$

где  $\varphi_{p \min \varphi}$  — угол минимальной чувствительности.

Конформным отображением  $z_c$  (6) является гармоническая функция [4], которой в полярной системе координат соответствует окружность радиусом  $1/(2z_c \min)$  с центром на линии  $\varphi_{p \min \varphi}$ . Для реализации прямолинейной характеристики срабатывания в реле сопротивления из тока  $i_p$  формируется импульсный сигнал  $e_I$ , соответствующий (4), а из напряжения  $u_p$  по (5) — непрерывный сигнал  $e_U$ , мгновенное значение которого во время генерации  $e_I$  соответствует знаменателю (6), т. е.

$$e_U = K_U U_{pm} \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_p + 0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \min \varphi}) \quad (7)$$

Последнее достигается умножением  $u_p$  на коэффициент передачи  $K_U$  и фазовым сдвигом на угол  $(0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \min \varphi})$ .

Характеристики срабатывания в виде кривых второго порядка с фокусом в начале координат в полярной форме описываются обобщенным уравнением:

$$z_c = \frac{(1 + \varepsilon) z_c \min}{1 + \varepsilon \cos(\varphi_p - \varphi_{p \max \varphi})} = \frac{K_U (1 + \varepsilon) z_c \min}{K_U [1 + \varepsilon \sin(0,5\pi + \varphi_p - \varphi_{p \max \varphi})]} \quad (8)$$

где эксцентриситет  $\varepsilon = 0$  соответствует окружности;  $0 < \varepsilon < 1$  — эллипсу;  $\varepsilon = 1$  — параболе;  $\varepsilon > 1$  — гиперболу.

Для эллиптической характеристики (рис. 1, б) с максимальным сопротивлением срабатывания  $z_c \max$  числитель (8) имеет вид

$$K_U (1 - \varepsilon) z_c \max.$$

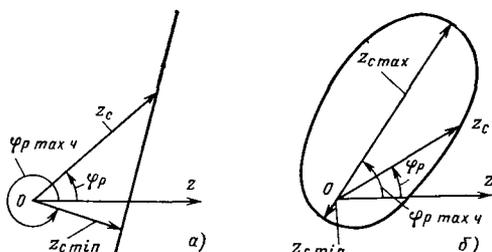


Рис. 1. Прямолинейная (а) и эллиптическая (б) характеристики срабатывания реле сопротивления.

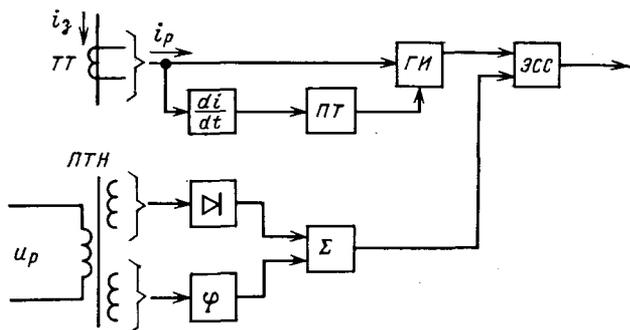


Рис. 2. Структурная схема импульсного реле сопротивления.

Конформным отображением кривых второго порядка является сумма двух окружностей: первой — радиуса  $1/[2(1+\epsilon)]z_{c \min}$  с центром в начале координат и второй — проходящей через начало координат, радиуса  $\epsilon/[2(1+\epsilon)]z_{c \min}$  и с центром на линии  $\varphi_{p \max}$ .

Для реализации указанных характеристик срабатывания из тока  $i_p$  формируется импульсный сигнал с амплитудой

$$e_I = K_U (1 + \epsilon) z_{c \min} \quad (9)$$

в моменты времени, аналогичные реле с прямолинейной характеристикой срабатывания, а из напряжения  $u_p$  — непрерывный сигнал

$$e_U = K_U U_{pm} + K_U \epsilon U_{pm} \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_p + 0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \max} \varphi) \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) является постоянной составляющей, а второе — гармонической с начальной фазой  $(\psi_i + \varphi_p + 0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \max} \varphi)$ .

Характеристики срабатывания в виде прямой, окружности, эллипса, параболы и гиперболы реализуются в одном импульсном реле сопротивления (рис. 2). Формирователь импульсного сигнала из тока предназначен для трансформаторов тока с замкнутым магнитопроводом и состоит из дифференцирующего элемента, пик-трансформатора ПТ и импульсного генератора ГИ. Пик-трансформатор генерирует импульсные сигналы при изменении полярности выходного сигнала дифференцирующего элемента, совпадающие во времени с амплитудными значениями тока реле. Эти импульсные сигналы управляют импульсным генератором, выдающим короткие амплитудно-модулированные сигналы.

Формирователь непрерывного сигнала из напряжения содержит промежуточный трансформатор напряжения ТН, во вторичных обмотках которого установлены выпрямитель и фазосдвигающий элемент. Выходы последних через сумматор подключены к опорному входу элемента сравнения сигналов ЭСС, к рабочему входу которого подключен выход импульсного генератора. В реле сопротивления с конкретными характеристиками срабатывания некоторые элементы формирователя сигнала из напряжения не используются, например, в реле с прямолинейной характеристикой не используются выпрямитель и сумматор.

**Составная характеристика срабатывания.** Описываемый способ позволяет довольно просто реализовать сложную характеристику срабатывания, составленную из отрезков прямых и кривых второго порядка. В частности, четырехугольная характеристика срабатывания, изображенная на рис. 3, составлена из фазограничивающей характеристики 4 и отрезков прямых 1, 2 и 3, описываемых обобщенной функцией

$$z_{cn} = \frac{z_{c \min n}}{\cos(\varphi_{pn} - \varphi_{p \min n})} \quad (11)$$

где  $\varphi_{pn}$  — значение угла  $\varphi_p$  в пределах  $n$ -й стороны.

С целью использования для реализации всех не проходящих через начало координат сторон характеристики срабатывания одного импульсного сигнала, соответствующего (4), с амплитудой

$$e_{I1} = K_{U1} z_{c \min 1} I_{pm} \quad (12)$$

функции передачи формирователей опорных сигналов для остальных сторон многоугольника приводятся к числителю (11) для первой стороны посредством умножения числителя и знаменателя (11) на  $z_{c \min 1}$ ,  $z_{c \min n}$  и  $K_{U1}$ , тогда

$$z_{cn} = \frac{z_{c \min n}}{K_{U1} z_{c \min 1}} \frac{K_{U1} z_{c \min 1}}{\cos(\varphi_{pn} - \varphi_{p \min n})} = \frac{K_{I1}}{K'_{U1} \cos(\varphi_{pn} - \varphi_{p \min n})} \quad (13)$$

Из напряжения  $u_p$  формируются три опорных непрерывных сигнала

$$e_{Un} = K'_{U1} U_{pm} \sin(\omega t + \psi_i + \varphi_p + 0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \min n}) \quad (14)$$

каждый посредством умножения на коэффициент передачи  $K'_{U1}$  и фазового сдвига на угол  $(0,5\pi - \gamma_i - \varphi_{p \min n})$ . В реле, структурная схема которого изображена на рис. 4, неоднозначность характеристики срабатывания, обусловленная различием

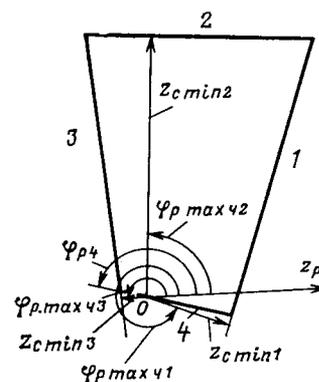


Рис. 3. Четырехугольная характеристика срабатывания реле сопротивления.

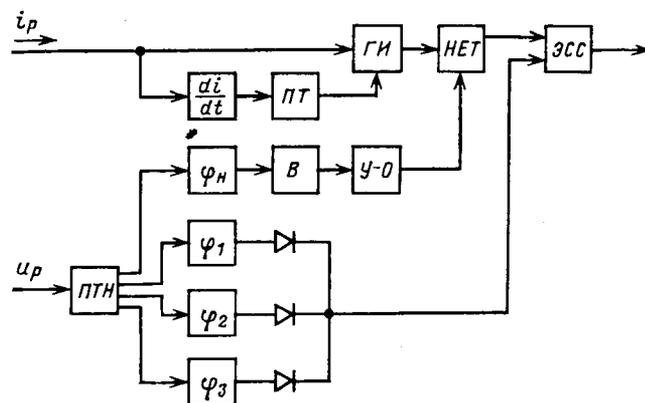


Рис. 4. Структурная схема импульсного реле сопротивления с четырехугольной характеристикой срабатывания.

$z_{c1}(\varphi_p)$ ,  $z_{c2}(\varphi_p)$  и  $z_{c3}(\varphi_p)$ , устраняется выбором минимального  $z_c$  посредством фильтрации диодами наибольшего из опорных напряжений.

Фазограничивающая сторона 4 характеристики срабатывания реле, блокирующая его срабатывание при  $\varphi_{p4} < \varphi_p < \varphi_{p4} + \pi$ , реализуется с помощью элемента запрета в цепи рабочего входа элемента сравнения сигналов. Запрещающий сигнал длительностью полупериода формируется из вторичного напряжения промежуточного трансформатора напряжения путем фазового сдвига на угол  $\pi + \gamma_i - \gamma_{p4}$ , усиления и ограничения однополярных полувольт.

Использование функциональной зависимости амплитуды импульсного сигнала от угла  $\varphi_p$ , а также более сложных функций формирования непрерывного сигнала из напряжения позволяет реализовать большое множество видов характеристик срабатывания реле сопротивления.

Лабораторные исследования макетного образца реле подтвердили работоспособность импульсного способа осуществления реле сопротивления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.
2. Фабрикант В. Л. Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. — М.: Высшая школа, 1968.
3. Фабрикант В. Л. Дистанционная защита. — М.: Высшая школа, 1978.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973.

# Закономерности электрического старения полиэтиленовой кабельной изоляции при отсутствии частичных разрядов

БОРИСОВА М. Э., канд. физ.-мат. наук, КОЙКОВ С. Н., доктор физ.-мат. наук, ОРОС Я., инж.  
РСФСР, Ленинград

Улучшение технологии наложения полиэтиленовой изоляции при изготовлении высоковольтных кабелей, применение полупроводящих покрытий позволяют свести до минимума вероятность возникновения частичных разрядов (ЧР) в кабельной изоляции. Тем не менее, развитие процессов электрического старения, приводящих к пробое изоляции, не удается полностью исключить. В связи с этим актуальной является задача изучения закономерностей электрического старения и пробоя полиэтиленовой изоляции при различных формах напряжения в условиях, когда в максимально возможной степени устранены ЧР.

Для испытаний на пробой и старение использовались как плоские образцы толщиной 260 мкм, так и отрезки кабельной

изоляция с толщиной изоляции 0,5 мм. Устранение ЧР достигалось путем помещения плоских образцов с электродами или отрезков кабелей в дистиллированную воду, а для выравнивания распределения потенциала по мере удаления от электрода применялась полупроводящая краска. Отсутствие ЧР контролировалось индикатором МУТ-8 (с чувствительностью  $10^{-14}$  Кл). Испытания проводились при приложении переменного напряжения частотой 50 Гц, выпрямленного напряжения, импульсов аperiodической и колебательной затухающей форм. При этом сравнивались результаты, получаемые для полиэтилена трех марок: DFD-6005 (без добавок), DFD-6603 (с добавкой) фирмы British Petrol (Великобритания) и Tirolen-2321S<sub>14</sub> (с добавкой) венгерского производства.

Во всех случаях распределение по срокам службы подчинялось закону Вейбулла, а зависимости  $\lg \tau = f(\lg U)$  изображались прямыми линиями, т. е. выполнялось эмпирическое соотношение  $\tau = \tau_0 (U_0/U)^m$ , где  $U_0$  — кратковременное пробивное напряжение, определяемое путем плавного повышения  $U$  в течение времени  $\tau_0$  (приблизительно). Из рис. 1 видно, что устранение ЧР, действительно, приводит к резкому возрастанию срока службы [увеличению коэффициента  $m$ , характеризующему наклон линии  $\lg \tau = f(\lg U)$ ]. При отсутствии ЧР различие коэффициентов  $m$  в случае испытаний на постоянном и переменном напряжениях весьма невелико (см. таблицу), тогда как при наличии разрядов, как известно<sup>1</sup>, эти значения существенно различаются ( $m_-$  значительно больше, чем  $m_+$ ).

Кратковременные пробивные напряжения  $U_0$  в постоянном поле при импульсах аperiodической и колебательно затухающей форм имеют примерно одно и то же значение, приблизительно соответствующее удвоенной амплитуде пробивного напряжения в переменном поле (рис. 2). Было изучено снижение кратковременного пробивного напряжения в процессе электрического старения полиэтиленовой изоляции. Оказалось, что зависимость  $U_i = f(t)$  отличается от наблюдавшейся ранее в условиях, когда на полимерную пленку воздействовали ЧР, величина  $U_i$  снижается почти по линейному закону, несколько более резко в начале испытаний. Сопоставление результатов испытаний для полиэтиленовой изоляции трех марок показало, что полиэтилен марки Tirolen обладает более высокими значениями кратковременного пробивного напряжения  $U_0$ , сроков службы  $\tau$  (рис. 3 и 4), чем полиэтилен марки DFD-6005 или DFD-6603. Значения коэффициентов  $m$  для полиэтилена марки Tirolen при отсутствии ЧР оказались следующими: при переменном напряжении — 11,9; при постоянном напряжении — 16,7; при аperiodических импульсах — 13,6; при колебательных затухающих импульсах — 10,8. Кроме того, полиэтилен марки Tirolen обладает более высокой дендритостойкостью — значительно большим временем начала зарождения дендритов  $t_z$  и меньшей скоростью их роста (рис. 5 и 6).

Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что механизм электрического старения полиэтилена при отсутствии ЧР существенно иной, чем при наличии ЧР.

С целью анализа полученных экспериментальных данных были проведены дополнительные исследования: изучение эффек-

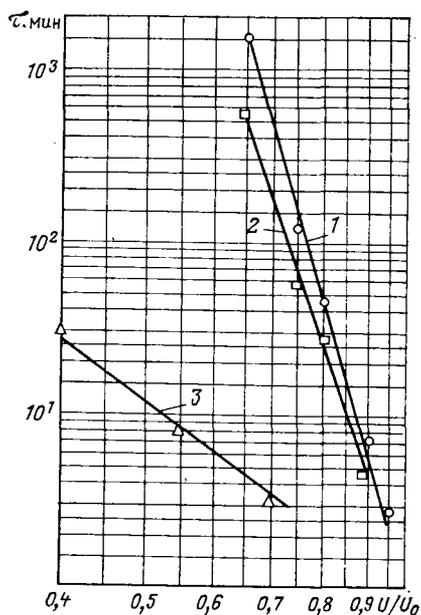


Рис. 1. Зависимости  $\lg \tau = f(\lg \frac{U}{U_0})$  при постоянном (1) и переменном напряжениях в отсутствие частичных разрядов (2) и при переменном напряжении в присутствии интенсивных частичных разрядов (3) для образцов полиэтиленовой изоляции

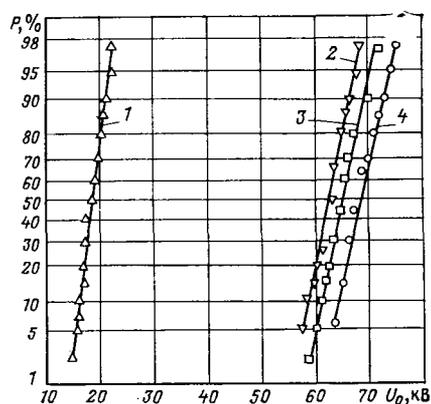


Рис. 2. Функция распределения кратковременных пробивных напряжений при переменном (1), аperiodическом импульсном (2) колебательно-затухающем импульсном (3) и постоянном (4) напряжениях для образцов полиэтиленовой изоляции

<sup>1</sup> Койков С. Н., Цикин А. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. — Л.: Энергия, 1968.

Марка полиэтилена	Значения коэффициентов $m$ , полученные для отрезков кабелей с изоляцией из полиэтилена при воздействии			
	переменного напряжения	постоянного напряжения	аperiodических имп. лсов	колебательных затухающих имп. лсов
Tirolen	14,40	15,80	12,60	9,40
DFD-6603	13,90	15,20	11,90	9,30
DFD-6005	12,30	14,10	9,40	8,00

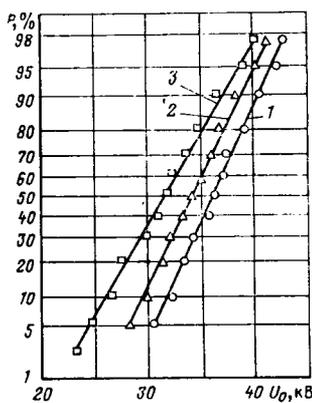


Рис. 3. Функция распределения  $U_0$  отрезков кабелей с изоляцией из полиэтилена марки Tipolen (1), DFD-6602 (2) и DFD-6005 (3), полученные в переменном поле

та зарядки полиэтилена под действием электрического поля и определение изменений ИК-спектров поглощения. Было установлено, что под действием электрического поля действительно происходит зарядка приповерхностных слоев полиэтилена — образуется гомозаряд (заряд того же знака, как и на электродах), спадающий со временем хранения образца. В спектрах термостимулированной деполаризации обнаруживаются максимумы, направление тока в которых свидетельствует о преобладании разрядного тока в приповерхностных слоях при плотном контакте с электродами и о разрядке через внутренний слой при наличии прокладок из политетрафторэтилена между образцом и электродами.

Согласно данным опытов, проведенных в ЛПИ, зарядка образца связана с внедрением электронов из электродов, имеющих отрицательный потенциал, и закреплением их на ловушках и диэлектрике. Принимая это во внимание, удастся объяснить, почему в переменном электрическом поле пробой происходит при напряжении, удвоенное амплитудное значение которого близко к значению пробивного напряжения в постоянном поле или при импульсах. Действительно, если на протяжении одного полупериода образуется заряд отрицательного знака в диэлектрике вблизи электрода с отрицательным потенциалом, то во время другого полупериода этот электрод имеет положительный потенциал, и в тонком слое диэлектрика между объемным зарядом и электродом напряженность поля приблизительно вдвое превышает значение  $E_{ср} = U_m/h$ .

Снижение пробивной напряженности при приложении импульсов после выдержки образца под действием постоянного напряжения за счет действия объемного заряда подтверждено непосредственным опытом и соответствует литературным данным. Возможно, что зарядка тонких слоев полиэтилена вблизи электрода с отрицательным потенциалом оказывает влияние на развитие процесса электрического старения или роста дендритов.

Исследование изменений ИК-спектров после старения при отсутствии разрядов показало, что после воздействия электри-

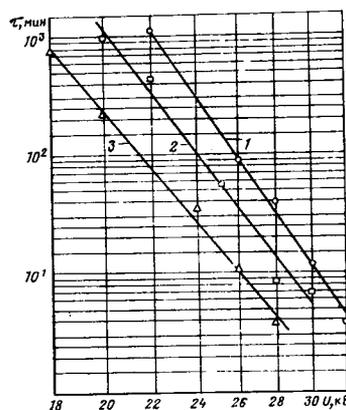


Рис. 4. Зависимость  $\lg \tau = f(\lg U)$  в переменном поле для отрезков кабелей из полиэтилена марки Tipolen (1), DFD-6603 (2) и DFD-6005 (3)

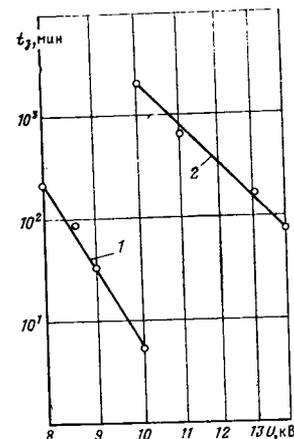
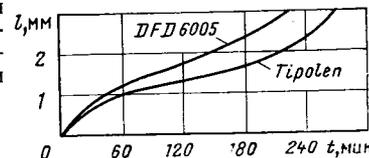


Рис. 5. Зависимость  $\lg t_a = f(\lg U)$  для образцов полиэтилена марки DFD-6005 (1) и для Tipolen (2)

Рис. 6. Зависимость длины дендритов от времени воздействия напряжения для образцов полиэтилена марки DFD-6005 (1) и Tipolen (2)



ческого поля увеличивается поглощение при частотах  $1640 \text{ см}^{-1}$  и  $888 \text{ см}^{-1}$ . Это может быть обусловлено, соответственно, разрывом цепей полиэтилена с образованием сопряженных двойных связей и увеличением концентрации ненасыщенных связей вениледенового типа. Следовательно, некоторые изменения в структуре полиэтилена происходят под действием электрического поля и в условиях, когда практически исключены ЧР.

Итак, изучение закономерностей пробоя и электрического старения полиэтиленовой кабельной изоляции в условиях отсутствия ЧР показывает, что процессы старения могут развиваться и в этих условиях. Существенную роль в процессе пробоя, и, вероятно, электрического старения играет объемный заряд, возникающий в полимере за счет инжекции электронов из электродов и закрепления их на ловушках. Для уточнения механизма электрического старения полимеров при отсутствии ЧР необходимы дальнейшие исследования.

[01.04.82]

## Об оценке надежности систем электроснабжения

МУСТАФАЕВ Р. И., канд. техн. наук, НОСОВ Ю. Л., инж.

Азербайджанская ССР, Баку

Из множества методов оценки надежности систем электроснабжения потребителей наибольшее распространение получили методы уравнений Маркова, статистических испытаний и минимальных сечений [1—4]. Однако использование этих методов при оценке надежности сложных систем электроснабжения даже с применением вычислительных машин наталкивается на серьезные трудности.

В последние годы для упрощения оценки надежности сложных систем разработаны методы аналогового и цифро-аналогового моделирования [5 и 6].

В настоящей статье предлагается метод приближенной оценки надежности сложных систем электроснабжения относительно узла потребителя, использующий либо специализированные моделирующие устройства, либо аналоговые вычислительные машины (АВМ) общего назначения. Метод основан на понятии доминирующего по вероятности отказов минимального сечения, введенного в [3 и 4], где под отказом систем электроснабжения относительно узла потребителя понимается полное прекращение его питания, т. е. не учитываются частичные отказы, вызванные снижением пропускной способности элементов системы. В [3 и 4] показано, что вероятность отказа  $Q(P)$  системы электроснабжения относительно узла потребителя  $P$  можно приближенно оценить следующим выражением:

$$Q(P) \approx Q(C^L_{И/П}) + \sum_{i=1}^r Q(C^i_{И/П}), \quad (1)$$

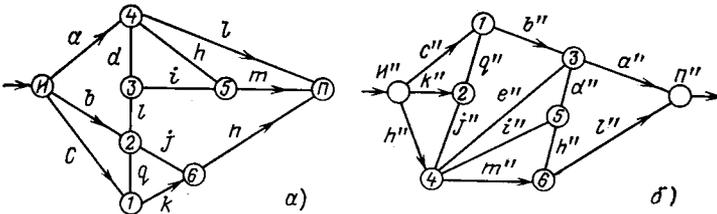


Рис. 1. Исходный (И-П)-планарный (а) и двойственный ему (б) графы

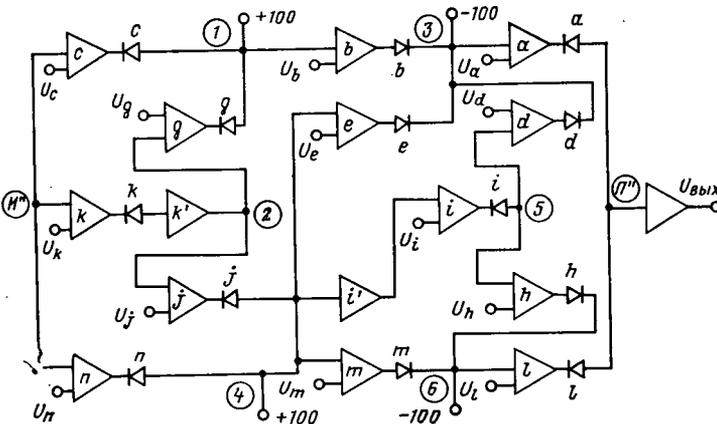


Рис. 2. Структурная схема моделирования двойственного графа на АВМ

где

$$Q(C^L_{И/П}) = \max \{Q(C^i_{И/П})\}, \quad i = 1, 2, \dots, l;$$

$Q(C^L_{И/П})$  — вероятность отказов доминирующего сечения  $C^L_{И/П}$ ;

$Q(C^i_{И/П})$  — вероятность отказов  $i$ -го минимального сечения  $C^i_{И/П}$ ;  $l$  — число всех минимальных сечений относительно рас-

сматриваемого узла  $P$ ;  $r$  — число учитываемых минимальных сечений, ближайших к доминирующему по вероятности отказов. В общем случае величина  $r$  зависит от требуемой точности расчета и вероятности отказов доминирующего сечения.

Способы приведения реальных систем электроснабжения к расчетным схемам подробно освещены в [2 и 3]. При этом расчетная по надежности схема системы электроснабжения задается в виде (И-П)-планарного графа, по которому строится соответствующий ему двойственный граф  $G'_{И'-П'}$ . Тогда каждому сечению, разделяющему вершины И и П в исходном графе  $G_{И-П}$ , соответствует некоторый путь из И' в П' в двойственном графе, а доминирующему сечению исходного графа соответствует путь максимальной вероятности совпадения отказов элементов из И' в П' в двойственном графе, причем

$$Q(C^i_{И/П}) = Q(L'_i) = \prod_{a'_{ij} \in L'_i} q_{ij}, \quad (2)$$

где  $Q(L'_i)$  — вероятность совпадения отказов элементов  $i$ -го пути  $L'_i$  из И' в П' графа  $G'_{И'-П'}$ ;  $q_{ij}$  — вероятность отказа ребра  $a'_{ij}$ , принадлежащего пути  $L'_i$ .

Очевидно также, что каждому минимальному сечению, близкому к доминирующему по вероятности отказов (1), соответствует путь максимальной вероятности совпадения отказов в подграфе, полученном из двойственного графа удалением одного или нескольких ребер, из которых по меньшей мере одно ребро принадлежит пути максимальной вероятности совпадения отказов графа  $G'_{И'-П'}$ .

Таким образом, задача определения вероятности отказа системы электроснабжения относительно узла потребителя сводится к определению путей максимальной вероятности совпадения отказов элементов из И' в П' в двойственном графе и его подграфах.

Эта задача может быть решена на АВМ общего назначения или на специализированных моделирующих устройствах, предназначенных для определения конфигурации и длины  $D(L_{\min})$  кратчайшего пути  $L_{\min}$  между двумя выделенными вершинами в графе [7 и 8]. При этом для упрощения построения схемы модели необходимо перейти от исходного плоского графа  $G_{И=П}$  к новому двойственному графу  $G''_{И''=П''}$ , причем каждому его ребру  $a_{ij}$  поставить в соответствие абсолютную величину логарифма вероятности отказа  $|\log a(q_{ij})|$  ребра  $a_{ij}$  исходного графа. Тогда, поскольку граф  $G''_{И''=П''}$  — двойственный исходному, каждому минимальному сечению в исходном графе будет соответствовать путь  $L''_i$  из И'' в П'' в двойственном графе  $G''_{И''=П''}$ , длина которого

$$D(L''_i) = \sum_{a''_{ij} \in L''_i} |\log a(q_{ij})| = |\log a [Q(C^i_{И/П})]| = -\log a [Q(C^i_{И/П})]. \quad (3)$$

Нетрудно доказать, что доминирующему сечению исходного графа  $G_{И=П}$  соответствует кратчайший путь  $L''_{\min}$  из И'' в П'' в двойственном графе  $G''_{И''=П''}$ .

Действительно, в силу монотонности логарифмической функции выражение для вероятности отказов доминирующего сечения может быть переписано в виде:

$$\log_a [Q(C^d_{И|П})] = \max \{ \log_a [Q(C^i_{И|П})] \}, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (4)$$

Так как для любого  $i = 1, 2, \dots, l$   $0 < Q(C^i_{И|П}) < 1$ , то  $\log_a [Q(C^i_{И|П})] < 0$ ; поэтому

$$|\log_a [Q(C^d_{И|П})]| = \min \{ |\log_a [Q(C^i_{И|П})]| \}, \quad i = 1, 2, \dots, l. \quad (5)$$

отсюда, используя (3), получим

$$\begin{aligned} -\log_a [Q(C^d_{И|П})] &= \min \{ D(L''_1), D(L''_2), \dots, D(L''_l) \} = \\ &= D(L''_{\min}), \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично можно доказать, что любому минимальному сечению  $C^d_{И|П}$ , близкому по вероятности отказов к доминирующему сечению, соответствует кратчайший путь  $l''_i$  в подграфе, полученном из графа  $G''_{И''=П''}$  удалением одного или нескольких ребер, из которых по меньшей мере одно ребро принадлежит кратчайшему пути  $L''_{\min}$  графа  $G''_{И''=П''}$ .

В таком случае вероятность отказа системы электроснабжения относительно узла потребителя  $\Pi$

$$Q(\Pi) = \text{Anti log}_a [-D(L''_{\min})] + \sum_{i=1}^r \text{Anti log}_a [-D(l''_i)]. \quad (7)$$

В качестве примера на рис. 1 представлены исходный граф  $G_{И-П}$  и двойственный ему граф  $G''_{И''=П''}$ . (В графе  $G''_{И''=П''}$  все логарифмы вероятностей отказа — десятичные в неполной отрицательной форме). Доминирующему сечению  $n=e=a$  в графе  $G_{И-П}$  соответствует кратчайший путь  $И''=4=3=П''$  в графе  $G''_{И''=П''}$ , а сечениям  $c=b=a$ ,  $k=j=e=a$ ,  $n=i=d=a$ ,  $n=m=l$ , близким по вероятности отказов к доминирующему сечению, соответствуют пути  $И''=1=3=П''$ ,  $И''=2=4=3=П''$ ,  $И''=4=5=3=П''$ ,  $И''=4=6=П''$ . Причем эти пути являются кратчайшими в подграфах, полученных удалением из графа  $G''_{И''=П''}$  ребер  $n''$ ;  $n''$ ,  $c''$ ;  $e''$ ,  $b''$ ;  $l''$ ;  $l''$  соответственно.

Определение  $Q(\Pi)$  методом аналогового моделирования (на АВМ) рассмотрим на примере исходного графа  $G_{И=П}$  (рис. 1,а). При этом на АВМ набирается модель двойственного графа  $G''_{И''=П''}$ , которая состоит из моделей ребер и моделей вершин, соединенных друг с другом в соответствии с топологией исследуемого графа (рис. 2). Модель любого ребра представляет собой один или два операционных усилителя с последовательно соединенным диодом. Причем модель вершины с присоединенными к ней моделями ребер работает по схеме выделения переменной, имеющей наименьшее значение [8].

Напряжения  $U_a, U_b, U_c, U_d, \dots, U_h$  (рис. 2), подаваемые на выходы операционных усилителей, в определенном масштабе равны абсолютным значениям логарифмов вероятностей отказов соответствующих ребер графа  $G''_{И''=П''}$ . При работе всех элементов модели выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  соответствует длине кратчайшего пути из  $И''$  в  $П''$  в графе  $G''_{И''=П''}$ , т. е. про-

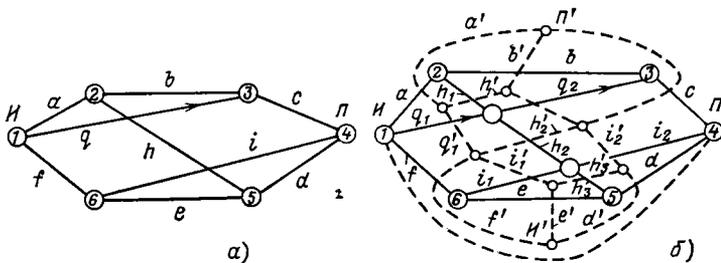


Рис. 3. Построение фиктивного плоского графа  $G^{\Phi}_{И-П}$  по заданному неплоскому графу  $G_{И-П}$ :

а — исходный неплоский граф  $G_{И-П}$ ; б — соответствующий ему фиктивный плоский граф  $G^{\Phi}_{И-П}$  (изображен сплошными линиями)

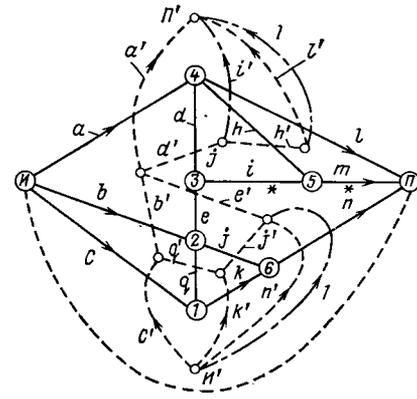


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма определения сечений между вершинами  $И$  и  $П$  в графе, не являющемся  $(И-П)$ -планарным

порционально вероятности отказов доминирующего сечения в исходном планарном графе.

Далее, измерением падения напряжения на диодах моделей ребер определяется конфигурация этого кратчайшего пути. Причем кратчайший путь выделяется по тем моделям ребер, на диодах которых падения напряжения равны нулю.

Затем последовательно определяются конфигурации и длины кратчайших путей в подграфах  $G''_{И''=П''}$ , полученных удалением одного или нескольких ребер, из которых по меньшей мере одно ребро принадлежит кратчайшему пути  $L''_{\min}$  из  $И''$  в  $П''$  в графе  $G''_{И''=П''}$ . Это достигается при последовательном удалении (отключении) из модели графа  $G''_{И''=П''}$  одного, двух, трех и более соответствующих моделей ребер. Причем отключаются модели лишь тех ребер, которые принадлежат ранее найденным кратчайшим путям графа  $G''_{И''=П''}$  и его подграфов.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока длины получаемых кратчайших путей будут оставаться меньше некоторого наперед заданного значения, определяемого требуемой точностью расчета. Кратчайшие пути, длины которых превосходят указанное значение, отбрасываются.

Таким образом определяются все минимальные сечения, близкие по вероятности отказов к доминирующему. Окончательно после перехода к исходным значениям по выражению (7) определяется вероятность отказа всей системы электроснабжения относительно узла потребления.

Расчеты на АВМ для схемы с параметрами, приведенными в [4] показали, что погрешность определения вероятности отказа всей системы не превышает 10%. Это вполне допустимо, если учесть, что точность задания исходных данных также не превышает указанного значения.

Следует отметить, что предлагаемый в настоящей статье метод применим как для неплоских, так и для плоских графов, не являющихся  $(И=П)$ -планарными.

Действительно, если исходный граф  $G_{И=П}$  неплоский, то его можно представить в виде некоторого плоского графа с дополнительными вершинами, образованными в точках пересечения ребер исходного графа. Этот граф будем называть фиктивным плоским графом и обозначать через  $G^{\Phi}_{И=П}$ . Очевидно, что каж-

дому ребру исходного неплоского графа соответствует одно или несколько ребер фиктивного плоского графа. В качестве примера на рис. 3 приведены неплоский граф и соответствующий ему фиктивный плоский граф. Ребра в неплоском графе и соответствующие им ребра в фиктивном плоском графе помечены одной и той же буквой. Если фиктивный плоский граф является  $(И-П)$ -планарным, то для него можно построить по известным правилам двойственный граф  $G^{\Phi}_{И=П}$ , в котором каждому пути из  $И'$  в  $П'$  соответствует сечение, разделяющее вершины  $И$  и  $П$  в фиктивном плоском графе.

Нетрудно заметить, что ребра исходного неплоского графа  $G_{И=П}$ , которым соответствуют ребра некоторого сечения фиктивного плоского графа  $G^{\Phi}_{И=П}$  образуют сечение исходного неплоского графа. Следовательно, любому пути из  $И'$  в  $П'$  в графе  $G^{\Phi}_{И=П}$ , двойственном фиктивному плоскому графу, будет соответствовать сечение, разделяющее вершины  $И$  и  $П$  в исходном неплоском графе. Так, например, путям  $e'$ ,  $i'$ ,  $k'$ ,  $c'$  и  $f'$ ,  $g'$ ,  $h'$ ,  $b'$  в двойственном графе на рис. 3,б соответствуют

сечения  $e-i-h-c$  и  $f-g-h-b$  в исходном неплоском графе на рис. 3,а. Отметим также, что всем ребрам фиктивного плоского графа  $G_{И=П}^Ф$  необходимо приписывать вероятность отказа, равную вероятности отказа соответствующего ребра исходного неплоского графа  $G_{И=П}$ .

Если же исходный граф  $G_{И=J}$  плоский, но не  $I-J$ -планарный, то для определения доминирующего и ближайших к нему по вероятности отказов сечений относительно вершины  $J$ , необходимо выполнить следующие операции.

1. Выбрать вершину  $П$ , для которой граф  $G_{И=П}$  является  $I=П$ -планарным.

2. Выбрать какой-либо путь  $L$  из вершины  $J$  в  $П$  и пометить все ребра этого пути.

3. Построить граф  $G'_{И'=П}$ , двойственный графу  $G_{И=П}$ .

4. Выделить в двойственном графе  $G'_{И'=П}$  два множества таких вершин, чтобы каждая пара вершин из этих множеств была бы инцидентна некоторому ребру  $a'_{nm}$ , которому в графе  $G_{И=П}$  соответствует помеченное ребро  $a_{nm}$ , принадлежащее пути  $L$ .

5. Добавить ребра, соединяющие все вершины одного множества с вершиной  $И'$ , а все вершины другого множества — с вершиной  $П'$ , причем каждое добавленное ребро должно быть инцидентно только одной выделенной вершине множества.

6. Если помеченное ребро  $a_{nm}$  пути  $L$  ориентировано, причем его направление совпадает с направлением пути от вершины  $J$  к вершине  $П$ , то добавленным ребром (п. 5), инцидентным двум выделенным вершинам ребра  $a'_{nm}$ , приписывается вероятность отказа, равная 1, а другому ребру — вероятность отказа помеченного ребра.

Если же помеченное ребро  $a_{nm}$  пути неориентировано или ориентировано так, что его направление совпадает с направлением пути от вершины  $П$  к вершине  $J$ , то одному из добавленных ребер (п. 5), инцидентным вершинам ребра  $a'_{nm}$ , приписывается вероятность отказа, равная 1, а другому ребру — вероятность отказа помеченного ребра.

7. Из графа, полученного в п. 6, удаляются все ребра, соответствующие помеченным ребрам пути  $L$  графа  $G_{И=П}$ . В полученном таким способом графе  $G^*_{И'=П}$  каждому пути из  $И'$  в  $П'$  соответствует минимальное сечение, разделяющее вершины  $И$  и  $J$  в графе  $G_{И=П}$ .

На рис. 4 приведено построение графа  $G^*_{И'=П}$  для определения сечений относительно вершины  $З$  графа  $G_{И=П}$  на рис. 1, а.

Ребра пути  $L$  помечены звездочкой, а добавленные в п. 5 ребра, изображены штрих-пунктирными линиями.

Предложенный алгоритм базируется на известной теореме о двойственных графах 9, из которой следует, что если  $G$  и  $G'$  — двойственные друг другу графы, то контурам одного графа взаимно однозначно соответствуют множества сечений другого.

Нетрудно доказать, что при выполнении операций пп. 1, 2, 3, 7 получается граф, в котором каждый путь из  $И'$  в  $П'$  соответствует сечению, отделяющему вершину  $И$  от множества вершин пути  $L$  исходного графа. Таким образом, можно сразу определять вероятность отказа системы электроснабжения относительно группы из нескольких узлов потребителей, что значительно сокращает время, необходимое для оценки надежности исследуемой системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко Ю. Н., Чельцов М. Б. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Методы исследования. — Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1974.
2. Некоторые вопросы надежности электроэнергетических систем / В. А. Веников, Е. В. Путятин, В. А. Туфанов, Ю. А. Фокин. — Электричество, 1975, № 5.
3. Фокин Ю. А., Туфанов В. А. Оценка надежности систем электроснабжения. — М.: Энергоиздат, 1981.
4. Фокин Ю. А., Чан-динь-Лонг. Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложных схем. — Электричество, 1976, № 8.
5. Мусатов В. В. К вопросу о моделировании задач теории надежности. — В кн.: Теория надежности и массовое обслуживание. — М.: Наука, 1969.
6. Бушуев В. В. Аналого-цифровое моделирование электроэнергетических объектов. — М.: Энергия, 1980.
7. Деннис Д. Б. Математическое программирование и электрические цепи. — М.: Иностранная литература, 1961.
8. Тетельбаум И. М., Шнейдер Ю. Р. 400 схем для АВМ. — М.: Энергия, 1978.
9. Сешу С., Рид М. Линейные графы и электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1971.

[19.02.82]

УДК 621.314.001.24

## Комплексные коммутационные функции и их применение для исследования цепей с периодической ступенчатой модуляцией

ШИПИЛЛО В. П., доктор техн. наук, ЗЕЗЮЛЬКИН Г. Г., канд. техн. наук  
Украинская ССР — РСФСР

Многие устройства преобразовательной техники, автоматического регулирования и радиотехники могут быть структурно представлены в виде динамических систем, в которых наряду с линейными стационарными преобразованиями осуществляются умножения сигналов на заданные кусочно-постоянные периодические функции. Для анализа и синтеза таких систем в настоящее время применяются преимущественно приближенные частотные методы [1 и 2], которые отличаются значительной трудоемкостью. Точные и достаточно простые методы анализа и синтеза в настоящее время найдены лишь для некоторых систем частотного вида. Например, для систем с прямоугольной несущей можно применять специально разработанную методику построения эквивалентных импульсных моделей [3] и  $K$ -преобразования [4].

В данной статье рассматриваются общие свойства цепей со ступенчатой модуляцией на основе замены ступенчатых несущих линейной комбинацией комплексных коммутационных функций. Предлагаемая методика может быть использована для решения задач преобразовательной техники.

Введем в рассмотрение элементарную цепочку (рис. 1,а), которая представляет последовательное соединение коммутатора с периодической ступенчатой несущей  $f(t)$  рис. 1,б и линейного

звена с передаточной функцией  $W(p)$ . Линейные системы с модуляцией могут быть структурно представлены в виде различного рода соединений таких элементарных цепочек. Несущие множительных звеньев для различных технических устройств имеют весьма разнообразный вид, поэтому разработка специальных преобразований, аналогичных  $K$ -преобразованию [5], для каждого вида сигнала несущей представляется нерациональной. Однако замена произвольного ступенчатого сигнала несущей линейной комбинацией базовых ортогональных функций позволяет резко сократить число таких преобразований и разработать единую методику расчета широкого класса технических устройств. Для разложения ступенчатых сигналов можно применять кусочно-постоянные функции Хаара, Радемахера, Уолша [6]. Однако эти системы функций не лишены недостатков. Так, точная замена ступенчатого сигнала функциями Уолша возможна только при  $N=2^n$ , где  $n=0, 1, 2, \dots$ , а система функций Радемахера не является полной. Наиболее рациональной оказывается замена ступенчатых функций линейной комбинацией комплексных коммутационных функций.

**Комплексные коммутационные функции и их свойства.** Введем в рассмотрение систему комплексных коммутационных функций ( $KKФ$ ), которые являются ступенчатыми огибающими ди-

скретных экспоненциальных функций [6]:

$$\{KK\Phi(N, m, i)\} = \left\{ \exp j \frac{2\pi}{N} m [i] \right\}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество интервалов несущего сигнала на периоде;  $m = 0, 1, \dots, N-1$ ;  $[i] = \left[ \frac{t}{T} \right] = 0, 1, 2, \dots$  — целая часть числа  $i = \frac{t}{T}$  (см. рис. 1, б).

Система функций  $KK\Phi$ , так же как и система дискретных экспоненциальных функций, является полной, ортогональной и мультипликативной [6]. Преобразование Фурье в базисе  $KK\Phi$  выражается формулами

$$f(i) = \sum_{m=0}^{N-1} F(N, m) KK\Phi(N, m, i); \quad (2)$$

$$F(N, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(i) \overline{KK\Phi(N, m, i)}, \quad (3)$$

где  $F(N, m)$  — спектр сигнала  $f(i)$  в базисе  $KK\Phi$ ;  $\overline{KK\Phi(N, m, i)}$  — комплексно-сопряженная  $KK\Phi$ .

Выражения (2) и (3) позволяют представить любую ступенчатую функцию в виде линейной комбинации  $KK\Phi$ .

**Пример.** Представить функцию  $f(i)$  при  $C_1=0, C_2=1, C_3=0, N=3$  в виде линейной комбинации  $KK\Phi$ . Пользуясь выражениями (2) и (3), получаем

$$f(i) = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} e^{-j \frac{2\pi}{3}} KK\Phi(3, 1, i) + \frac{1}{3} e^{j \frac{2\pi}{3}} \overline{KK\Phi(3, 1, i)}.$$

Представим  $KK\Phi(N, m, i)$  на комплексной плоскости в виде вращающегося вектора единичной длины. Вращение происходит скачками, и при изменении  $i$  на единицу угол изменяется на  $2\pi m/N$  радиан. На рис. 1, в представлены положения вектора  $KK\Phi(3, 1, i)$  для различных значений  $i$ . Перечислим основные свойства  $KK\Phi$ , аналогичные свойствам дискретных экспоненциальных функций:

1)  $KK\Phi(N, m, i)$  — периодическая функция с периодом  $N$ , т. е.

$$KK\Phi(N, m, i \pm N) = KK\Phi(N, m, i); \quad (4)$$

2) система  $\{KK\Phi(N, m, i)\}$  мультипликативна, т. е. перемножение двух функций  $KK\Phi$  дает другую функцию  $KK\Phi$ , причем

$$KK\Phi(N, m_1, i) KK\Phi(N, m_2, i) = KK\Phi(N, m_1 + m_2, i); \quad (5)$$

3) система  $\{KK\Phi(N, m, i)\}$  ортогональна, т. е.

$$\sum_{i=0}^{N-1} KK\Phi(N, m_1, i) KK\Phi(N, m_2, i) = \begin{cases} 0 & \text{при } m_1 \neq m_2; \\ N & \text{при } m_1 = m_2; \end{cases} \quad (6)$$

4) в силу периодичности  $KK\Phi$  справедливо соотношение

$$KK\Phi(N, N-m, i) = KK\Phi(N, -m, i) = \overline{KK\Phi(N, m, i)}. \quad (7)$$

Связь изображений входных и выходных сигналов коммутатора с несущей  $KK\Phi(N, m, i)$ . Заменяя ступенчатые несущие сигналы коммутаторов на рис. 1 линейной комбинацией  $KK\Phi(N, m, i)$ , переходим к цепям, в которых осуществляются умножения входных сигналов  $x_{вх}$  на несущие  $KK\Phi(N, m, i)$ . Вид элементарной цепочки таких цепей дан на рис. 1, з. Во временной области сигналы на входе и выходе коммутатора (рис. 1, з) связаны соотношением

$$x_{вых}(i) = x_{вх}(i) KK\Phi(N, m, i). \quad (8)$$

Изображение Лапласа, соответствующее этому выражению, определяется по теореме свертки в комплексной области:

$$x_{вых}(S) = \frac{1}{2\pi j} \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} x_{вх}(p) KK\Phi_{N, m}(S-p) dp. \quad (9)$$

Изображение по Лапласу  $KK\Phi(N, m, i)$  имеет вид

$$KK\Phi_{N, m}(S) = L\{KK\Phi(N, m, i)\} = \frac{1}{S} \frac{z-1}{z - \exp j \frac{2\pi}{N} m}, \quad (10)$$

где  $z = \exp TS$ .

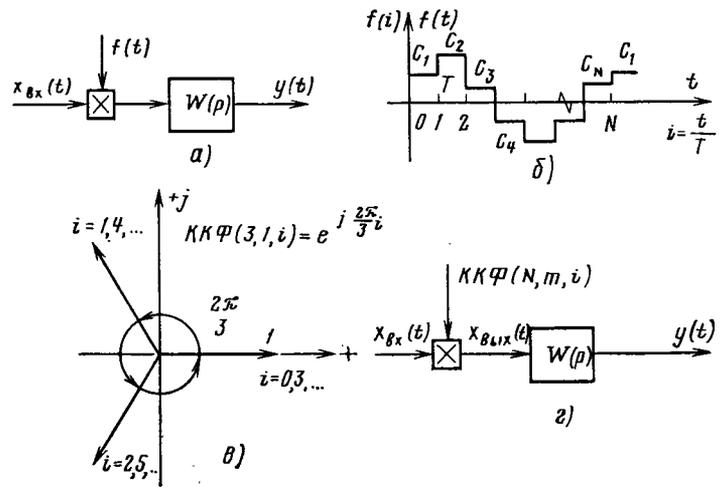


Рис. 1

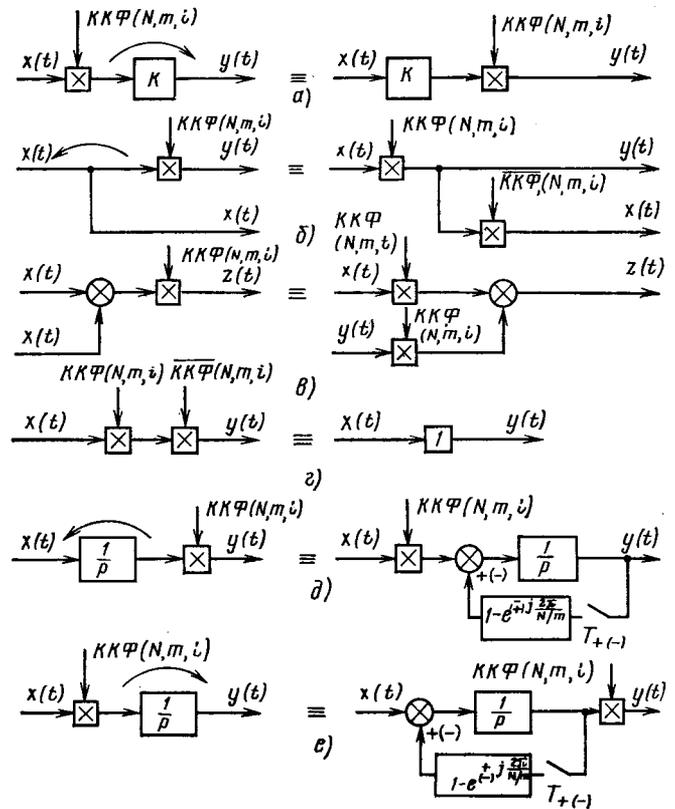


Рис. 2

Подставляя (10) в (9), получаем

$$x_{вых}(S) = \frac{1}{2\pi j} \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} x_{вх}(p) \frac{z - \exp Tp}{(S-p) [z - \exp(pT + j \frac{2\pi}{N} m)]} dp = K_{N, m} [x_{вх}(S)]. \quad (11)$$

Выражение  $K_{N, m} [x_{вх}(S)]$  назовем комплексным  $K_{N, m}$ -преобразованием входного сигнала  $x_{вх}(t)$ . Оно связывает изображение входного и выходного сигналов коммутатора с несущей  $KK\Phi(N, m, i)$ . Выражение (11) может быть найдено в виде суммы вычетов в полюсах  $x_{вх}(S)$ , если  $x_{вх}(S)$  имеет вид отношения двух полиномов.

С другой стороны, преобразование Лапласа выходного сигнала коммутатора имеет вид

$$K_{N, m} [x_{вх}(S)] = x_{вых}(S) = \int_0^{\infty} x_{вх}(t) KK\Phi(N, m, i) e^{-pt} dt. \quad (12)$$

Пользуясь подстановкой  $t = nT + \varepsilon$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq T$ , получаем

$$K_{N,m}[x_{\text{вх}}(S)] = x_{\text{вых}}(S) = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^T x_{\text{вх}}(nT + \varepsilon) e^{j \frac{2\pi}{NT} mnT} \times \\ \times e^{-p(nT + \varepsilon)} d\varepsilon = \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^T x_{\text{вх}}(nT + \varepsilon) e^{-pnT} e^{j \frac{2\pi}{N} mn} e^{-p\varepsilon} d\varepsilon = \\ = \int_0^T x_{\text{вх}}(ze^{-j \frac{2\pi}{N} m}, \varepsilon) e^{-p\varepsilon} d\varepsilon. \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет находить преобразование Лапласа выходного сигнала коммутатора по модифицированному  $z$ -преобразованию входного сигнала. Выражение для  $x_{\text{вых}}(S)$  может быть представлено также в виде

$$x_{\text{вых}}(S) = \int_0^T x_{\text{вых}}(z, \varepsilon) e^{-p\varepsilon} d\varepsilon. \quad (14)$$

Сравнивая (13) и (14), приходим к выражению

$$K_{N,m}[x_{\text{вх}}(z, \varepsilon)] = x_{\text{вых}}(z, \varepsilon) = x_{\text{вх}}\left(ze^{-j \frac{2\pi}{N} m}, \varepsilon\right), \quad (15)$$

которое связывает модифицированные  $z$ -преобразования входного и выходного сигналов коммутатора. Аналогично может быть представлена связь обычных  $z$ -преобразований сигналов коммутатора

$$K_{N,m}[x_{\text{вх}}(z)] = x_{\text{вых}}(z) = x_{\text{вх}}\left(ze^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right). \quad (16)$$

В общем случае изображение входного сигнала коммутатора для цепи, состоящей из элементарных цепочек рис. 1,2, может являться одновременно функцией  $S$  и  $z$ , т. е.

$$x_{\text{вх}}(z, S) = \frac{A(z) F_1(S)}{B(z) F_2(S)}, \quad (17)$$

где  $A(z)$  и  $B(z)$  — полиномы от  $z$ ;  $F_1(S)$  и  $F_2(S)$  — полиномы от  $S$ .

Тогда, пользуясь связью  $z$ -преобразований входных и выходных сигналов коммутатора (16), с учетом (11) нетрудно получить формулу перехода от изображения входного сигнала к изображению выходного сигнала коммутатора:

$$K_{N,m}[x_{\text{вх}}(S, z)] = x_{\text{вых}}(S, z) = \frac{A\left(ze^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right)}{B\left(ze^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right)} \times \\ \times \sum_{k=1}^n \frac{F_1(S_k)}{F_2'(S_k)} \frac{z - e^{S_k T}}{(S - S_k) \left[z - e^{S_k T + j \frac{2\pi}{N} m}\right]}, \quad (18)$$

где  $S_k$  — корни полинома  $F_2(S)$ ;  $F_2'(S)$  — производная полинома  $F_2(S)$ .

#### Операции с комплексными коммутационными функциями.

1. Произведение комплексно-сопряженных коммутационных функций:

$$KK\Phi(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i) = 1. \quad (19)$$

2. Комплексная коммутационная функция является сингулярной и имеет разрывы в точках  $i=0, 1, 2, \dots$ . Согласно правилу обобщенного дифференцирования производная  $KK\Phi(N, m, i)$  равна сумме смещенных на  $nT$  дельта-функций, умноженных на соответствующие векторы, получаемые как разности соседних векторов коммутационной функции:

$$KK\Phi'(N, m, i) = \sum_{i=0}^{\infty} \left[ e^{j \frac{2\pi}{N} mi} - e^{j \frac{2\pi}{N} m(i-1)} \right] \delta(t - iT) = \\ = \left(1 - e^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right) KK\Phi(N, m, i) \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT). \quad (20)$$

3. Рассмотрим произведение функций  $KK\Phi'(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i)$ . Дельта-функция, входящая в производную  $KK\Phi'(N, m, i)$ , может фиксировать как правые, так и левые значения функции  $KK\Phi(N, m, i)$ . При фиксации дельта-функцией правых значений с учетом (20) произведение имеет вид

$$KK\Phi'(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i) = \\ = \left(1 - e^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT_+). \quad (21)$$

При фиксации дельта-функцией левых значений

$$KK\Phi'(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i) = \left(1 - e^{-j \frac{2\pi}{N} m}\right) KK\Phi(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i-1) \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT_-) = \\ = \left(e^{j \frac{2\pi}{N} m} - 1\right) \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT_-). \quad (22)$$

Аналогично можно записать комплексно сопряженные выражения (20) — (22).

**Некоторые структурные преобразования цепей, содержащих коммутаторы с несущей  $KK\Phi(N, m, i)$ .** Рассмотрим структурные преобразования цепей, основанные на переносах коммутаторов с несущей  $KK\Phi(N, m, i)$  через непрерывную линейную часть схемы. Линейное звено с произвольной передаточной функцией  $W(p)$  может быть структурно представлено в виде сочетания интегрирующих, пропорциональных звеньев и сумматоров. Правила переноса коммутатора через пропорциональное звено с комплексным коэффициентом усиления, узел разветвления и узел суммирования представлены на рис. 2, а — в. Эти правила основаны на обычном требовании неизменности пути передачи.

Если в структурной схеме два коммутатора с комплексно сопряженными несущими оказываются стоящими друг за другом, то в соответствии с (19) их действия взаимно компенсируются и они оба исключаются из структурной схемы (рис. 2, е).

Рассмотрим перенос коммутатора через интегрирующее звено. Для структурной схемы, содержащей интегрирующее звено  $1/p$  и коммутатор с несущей  $KK\Phi(N, m, i)$  (см. рис. 2, д), запишем уравнение связи между входной  $x(t)$  и выходной  $y(t)$  координатами:

$$y(t) = KK\Phi(N, m, i) \int_0^t x(t) dt. \quad (23)$$

Тогда

$$x(t) = \frac{KK\Phi(N, m, i) y'(t) - KK\Phi'(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i) \int_0^t x(t) dt}{KK\Phi(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i)}. \quad (24)$$

Умножая левую и правую части выражения (24) на  $KK\Phi(N, m, i)$ , получаем

$$y'(t) = KK\Phi(N, m, i) x(t) + \\ + KK\Phi'(N, m, i) \overline{KK\Phi}(N, m, i) y(t). \quad (25)$$

Этому уравнению с учетом (21) и (22) соответствует структурная схема рис. 2, д, где коммутатор и звено  $1/p$  поменялись местами, но при этом интегрирующее звено охвачено обратной связью с комплексным коэффициентом передачи и амплитудно-импульсным модулятором, фиксирующим левые значения входного сигнала  $T_-$  или его правые значения  $T_+$ . Аналогично можно получить правило переноса коммутатора через интегратор с их иным взаимным расположением (рис. 2, е).

В заключение отметим, что рассмотренные свойства цепей с модуляцией позволяют проводить как анализ, так и синтез устройств преобразовательной техники. В частности, предлагаемую методику рационально применять для построения импульсных моделей многофазных (в том числе и трехфазных) автономных инверторов.

# Динамические свойства выпрямителя в режиме прерывистого тока

ИСХАКОВ А. С., канд. техн. наук  
РСФСР, Северодвинск

Режим прерывистого тока управляемого выпрямителя (далее для краткости именуемый прерывистым режимом) является специфическим режимом, в котором особенно ярко проявляются нелинейные свойства выпрямителя, связанные с односторонней проводимостью вентилей. Прерывистый режим возникает тогда, когда ток проводящего вентиля уменьшается до нуля (строго говоря, до некоторого минимального значения, называемого током удержания, но им обычно в таких случаях пренебрегают) раньше, чем происходит отпирание очередного вентиля.

В прерывистом, так же как и в полупроводимом режиме, возникает в  $m$ -фазном выпрямителе с обратным вентилем при изменении угла отпирания  $\alpha$  в пределах  $\pi/2 - \pi/m < \alpha < \pi/2 + \pi/m$ , интервал дискретности состоит из двух участков. Однако в прерывистом режиме длительность участка проводимости вентиля является функцией параметров линейной части, угла  $\alpha$  и других переменных, тогда как длительность этого участка в полупроводимом режиме зависит только от  $\alpha$  и равна  $\pi/2 + \pi/m - \alpha$ , так как включение обратного вентиля фиксировано во времени и происходит в моменты перехода напряжения питания через нуль.

Анализ устойчивости замкнутой системы с выпрямителем в таком режиме методом «гладкой» составляющей, как отмечается в [1], приводит к неверным результатам. В связи с этим современные представления выпрямителя как элемента системы автоматического регулирования основаны на описании его как звена импульсной системы [1 и 2]. В этих статьях рассмотрены динамические модели выпрямителей с синхронной системой управления при конкретной нагрузке только для малых отклонений, т. е. применительно к линеаризованным системам.

В данной статье дается математическое описание прерывистого режима выпрямителя для конечных отклонений, как частный случай из него вытекает линейная модель. С целью анализа влияния прерывистого режима на такое фундаментальное свойство, как порядок уравнений математической модели, изучается выпрямитель с нагрузкой произвольного характера с позиций представления его как элемента динамической системы. При анализе динамических систем применяют два подхода, один из них основан на рассмотрении оператора, связывающего вход и выход системы, во втором подходе используется понятие состояния ее. Так как прерывистый режим определяется состоянием одной из координат линейной части (током проводящего вентиля), для описания системы выбран метод переменных состояния. Принимаются обычные допущения об идеальности вентилей, симметрии и синусоидальности питающих напряжений.

**Уравнения динамики.** Исследуемая система, показанная на рис. 1 в виде функциональной схемы, состоит из  $m$ -фазного источника напряжений,  $m$  ключей, непрерывной линейной части с передаточной функцией  $W(s)$  и системы управления. Замыкание ключа  $k_j$  происходит по сигналу системы управления, размыкание — в момент спада тока через ключ до нуля, сигнал на размыкание показан на рис. 1 стрелкой со стороны линейной части. Интервал дискретности  $\omega T_n$ , где  $\omega$  — круговая частота напряжения питания, состоящий из двух участков; участка проводимости ключа длительностью  $\lambda_n = \omega t_1$  и участка закрытого ключа длительностью  $\omega T_n - \lambda_n$ .

Рассмотрим процессы на интервале  $\omega T_n$ , начало которого совпадает с замыканием ключа  $k_j$ . Математическую модель замкнутой системы составляют уравнения, описывающие линейную часть на интервале дискретности и уравнение, характе-

ризующее систему управления (далее они называются соответственно уравнениями выпрямителя и управления). Уравнения выпрямителя содержат: уравнение состояния

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bu_j; \tag{1}$$

уравнение выхода

$$y = C^T X \tag{2}$$

и уравнение тока

$$z = D^T X, \tag{3}$$

где  $X$  —  $k$ -мерный вектор состояния линейной части с компонентами  $x_i$ ;  $A$  — матрица линейной части размером  $k \times k$ ;  $B$ ,  $C$  и  $D$  —  $k$ -мерные векторы; индекс « $T$ » означает транспонирование;

$$u_j = \begin{cases} U_m \left( \cos \omega t - \frac{\pi}{m} + \alpha_n \right) & \text{при } 0 < t < t_1; \\ 0 & \text{при } t_1 < t < T_n; \end{cases} \tag{4}$$

$\omega T_n = \omega T_0 - \alpha_n + \alpha_{n+1}$ ;  $T_0 = \frac{2\pi}{m\omega}$  — интервал дискретности  $m$ -

фазного выпрямителя;  $\alpha_n$  — угол отпирания.

Учитывая, что  $u_j$  является периодической по  $T_0$  функцией  $t$ , т. е.  $u_j(t) = u_{j+1}(t + T_0)$  далее индекс « $j$ » опускаем. Временные диаграммы  $u$ ,  $z$  и одной из переменных  $x_i$  показаны на рис. 2.

Пусть нагрузка помимо линейной части содержит источники напряжения (аккумуляторная батарея, двигатель постоянного тока, э. д. с. которого  $E_0$  на интервале дискретности полагается неизменной, и др.). В этом случае в (1) вместо скалярной функции  $u(t)$  записывается векторная  $u(t)$ , компонентами которой являются напряжения выпрямителя и источников  $u(t)$ ,  $E_0, \dots$ ; их воздействие учитывается матрицей  $B$ , число столбцов которой равно числу источников напряжения, воздействующих на линейную часть.

В качестве примера составления уравнения (1) на рис. 3 изображена нагрузка, содержащая линейную часть третьего порядка и источник постоянного напряжения  $E_0$ . Выбрав в качестве переменных состояния токи в индуктивностях  $i_{L_1}$ ,  $i_{L_2}$  и напряжение на емкости  $u_C$ , получим уравнение вида (1), где

$$X = \begin{pmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ u_C \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix};$$

$$u = \begin{pmatrix} u \\ E_0 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

## Список литературы

1. Гостев В. И., Чинаев П. И. Замкнутые системы с периодически изменяющимися параметрами. — М.: Энергия, 1979.
2. Куракин К. И., Куракин А. К. Анализ систем автоматического регулирования на несущей переменного тока. — М.: Машиностроение, 1978.
3. Шипило В. П., Долбня В. Т., Зезюлькин Г. Г. Импульсная модель однофазного автономного инвертора. — Электричество, 1978, № 11.

4. Зезюлькин Г. Г. Об одном методе функционального преобразования и его применении для синтеза пусковых схем однофазных автономных инверторов. — Тр. МЭИ, 1977, вып. 340.
5. Ковалев В. Н., Ковалев Ф. И. Преобразование Лапласа для цепей с периодическим коммутатором. — Электричество, 1980, № 2.
6. Трахтман Л. М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. — М.: Сов. радио, 1972.

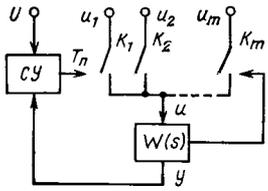
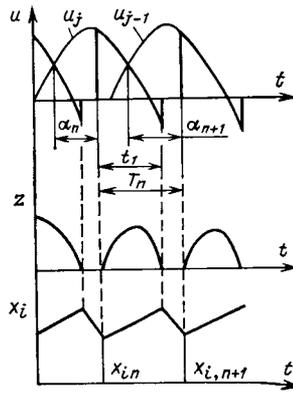


Рис. 1. Функциональная схема выпрямителя

Рис. 2. Диаграммы выходного тока  $z$  и переменной состояния  $x_i$ 

Решение уравнения состояния имеет вид

$$X(t) = e^{A(t-t_0)} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Считаем, что вектор  $X$  непрерывен в моменты переключений, тогда непрерывными будут выходной сигнал  $y$  и входной ток  $z$ .

Обозначим  $X$  в момент  $t_0=0$  через  $X_n$ . В этот момент  $z(0)=z_n=0$ , поэтому в силу линейной зависимости  $k$  переменных  $x_{in}$ , что следует из (3) —  $D^T X_n=0$ , вектор  $X_n$  имеет  $k-1$  независимых переменных. Решение (5) на первом участке

$$X(t) = e^{At} X_n + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (6)$$

содержит  $k$  переменных  $x_i$ .

В момент  $t=t_1=\lambda_n/\omega$ , когда ток  $z$  уменьшается до нуля:

$$X(\lambda_n) = e^{A t_1} X_n + \int_0^{t_1} e^{A(t_1-\tau)} B u(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Из (3) и (7) получаем выражение для вычисления  $\lambda_n$  в неявной форме:

$$E(\alpha_n, \lambda_n, x_{in}) = 0. \quad (8)$$

При этом должно выполняться условие прерывистого режима

$$\lambda_n < \omega T_n. \quad (9)$$

В установившемся режиме условие (9) приводится к виду

$$z(0) - z(T_0) < 0, \quad (10)$$

а равенство

$$z(0) = z(T_0) \quad (11)$$

служит для вычисления границы прерывистого и непрерывного режимов.

На втором участке  $t_1 < t < T_n$  ток  $z=0$ , это означает, что переменные  $x_i$  линейно зависимы, поэтому порядок уравнения состояния на этом участке на единицу меньше, чем на первом участке, т. е.  $X$  имеет  $k-1$  независимых переменных. Решение (5) на участке  $t_1 < t < T_n$

$$X(t) = e^{A(t-t_1)} X(\lambda_n)$$

в момент  $t=T_n$  определяет  $X_{n+1}$ :

$$X_{n+1} = e^{A(T_n-t_1)} X(\lambda_n).$$

Подставляя в последнее выражение  $X(\lambda_n)$  из (7), получаем

$$X_{n+1} = e^{A T_n} X_n + e^{A(T_n-t_1)} \int_0^{t_1} e^{A(t_1-\tau)} B u(\tau) d\tau. \quad (12)$$

Выражение (12) является нелинейным разностным уравнением вида

$$X_{n+1} = F(X_n, \alpha_{n+1}, \alpha_n, \lambda_n). \quad (13)$$

Уравнения (13) и (8) представляют математическую модель выпрямителя в прерывистом режиме для конечных отклонений. Она характеризуется дискретным вектором состояния  $X_n$ , являющимся результатом квантования непрерывного вектора состояния линейной части в моменты отпирания вентилей.

Специфическая особенность прерывистого режима выпрямителя состоит в том, что размерность вектора состояния ли-

нейной части на участке проводимости на единицу больше, чем на участке закрытого вентиля. Следствием этого является уменьшение размерности дискретного вектора состояния по сравнению с порядком передаточной функции линейной части. В этом состоит отличие уравнения (13) от подобных уравнений непрерывного и полуправляемого режимов, для которых размерность вектора состояния совпадает с порядком линейной части [3 и 4]. Кроме того, вычисление  $X_0$  в установившемся режиме ( $X_n = X_0, \alpha_n = \alpha_0$ ) является нелинейной операцией, что также отличает прерывистый режим от непрерывного и полуправляемого, в которых  $X_0$  определяется из линейного уравнения.

Для получения полной математической модели замкнутой системы необходимо (13) дополнить уравнением, определяющим интервал  $T_n$ . Измерение  $T_n$  осуществляется системой управления, которая выполняет функцию преобразования аналогового сигнала во временной интервал. Аналоговый сигнал представляет комбинацию сигналов задания и выхода  $y$ . Временным интервалом является угол отпирания (синхронные системы) или интервал  $T_n$  (интегральные или асинхронные). Учтывая, что синхронные системы управления рассмотрены в [1 и 2], ограничимся изучением интегральной. Измерение интервала  $T_n$  производится согласно выражению

$$\frac{1}{T_c} \int_0^{T_n} (U - y) dt = U_c, \quad (14)$$

где  $T_c$  — постоянная времени интегратора;  $U_c$  — сигнал задания.

В выражении (14) выходной сигнал  $y$  имеет ту же физическую размерность, что и сигнал задания  $U$ .

Разностное уравнение управления, получаемое из (14) подстановкой в него  $y$ , приводится к виду

$$R(\alpha_{n+1}, \alpha_n, x_{in}, \lambda_n) = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) относительно  $\alpha_n$  имеет первый порядок, в итоге совокупность уравнений (8), (13) и (15), являющаяся математической моделью замкнутой системы с выпрямителем в прерывистом режиме, будет иметь порядок  $k$ . Таким образом, размерность дискретного вектора состояния  $Y_n$  замкнутой системы, компонентами которого являются дискретный вектор состояния линейной части  $X_n$  и угол отпирания  $\alpha_n$ , совпадает с порядком линейной части и равна  $k$ , тогда как для непрерывного [3] и полуправляемого [4] режимов размерность  $Y_n$  равна  $k+1$ .

**Линейная модель.** При отклонениях замкнутая система характеризуется линеаризованными уравнениями выпрямителя (8) и (13):

$$\Delta X_{n+1} - L \Delta \alpha_{n+1} = M' \Delta X_n + N' \Delta \alpha_n + P \Delta \alpha_n; \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{k-1} e'_{1i} \Delta x_{in} + e'_{2} \Delta \alpha_n + e_3 \Delta \lambda_n = 0, \quad (17)$$

где  $L = \frac{\partial F}{\partial \alpha_{n+1}}$  — вектор с компонентами  $t_v = \frac{\partial F_v}{\partial \alpha_{n+1}}$ ;  $M' =$

$= \frac{\partial F}{\partial X_n}$  — матрица,  $m'_{vi} = \frac{\partial F_v}{\partial x_{in}}$ ;  $N' = \frac{\partial F}{\partial \alpha_n}$  — вектор,  $n'_v = \frac{\partial F_v}{\partial \alpha_n}$ ;

$P = \frac{\partial F}{\partial \alpha_n}$  — вектор,  $p_v = \frac{\partial F_v}{\partial \lambda_n}$ ;  $e'_{1i} = \frac{\partial E}{\partial x_{in}}$ ;  $e'_{2} = \frac{\partial E}{\partial \alpha_n}$ ;  $e_3 =$

$= \frac{\partial E}{\partial \alpha_n}$ ,  $i, v = 1, 2, \dots, k-1$ , и управления (15)

$$r_0 \Delta \alpha_{n+1} = \sum_{i=1}^{k-1} r'_{1i} \Delta x_{in} + r'_{2} \Delta \alpha_n + r_3 \Delta \lambda_n, \quad (18)$$

где  $r_0 = -\frac{\partial R}{\partial \alpha_{n+1}}$ ;  $r'_{1i} = \frac{\partial R}{\partial x_{in}}$ ;  $r'_{2} = \frac{\partial R}{\partial \alpha_n}$ ;  $r_3 = \frac{\partial R}{\partial \lambda_n}$ .

Подставляя  $\Delta \lambda_n$  из (17) в (16), получаем единое уравнение выпрямителя:

$$\Delta X_{n+1} - L \Delta \alpha_{n+1} = M \Delta X_n + N \Delta \alpha_n, \quad (19)$$

где  $M$  — матрица с элементами  $m_{vi} = m'_{vi} - p_v \frac{e'_{1i}}{e_3}$ ;  $N$  — век-

тор,  $n_v = n'_v - p_v \frac{e'_{2}}{e_3}$ .

Избавляясь таким же образом от  $\Delta\lambda_n$  в (18), находим уравнение управления:

$$r_0 \Delta\alpha_{n+1} = \sum_{i=1}^{k-1} r_{1i} \Delta x_{in} + r_k \Delta\alpha_n, \quad (20)$$

где  $r_{1i} = r'_{1i} - r_3 \frac{e'_{1i}}{e_3}$ ;  $r_k = r'_2 - r_3 \frac{e'_2}{e_3}$ .

Уравнения (19) и (20) являются линейной моделью замкнутой системы с выпрямителем в прерывистом режиме. Запишем их в форме одного уравнения:

$$\mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{Y}_{n+1} = \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{Y}_n, \quad (21)$$

где

$$\mathbf{H}_1 = \begin{vmatrix} 1 & \dots & 0 & l_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 1 & l_{k-1} \\ 0 & \dots & 0 & r_0 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{H}_2 = \begin{vmatrix} m_{11} & \dots & m_{1, k-1} & n_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{k-1, 1} & \dots & m_{k-1, k-1} & n_{k-1} \\ r_1 & \dots & r_{k-1} & r_k \end{vmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{Y}_n = \begin{vmatrix} \Delta x_{1n} \\ \dots \\ \Delta x_{k-1, n} \\ \Delta \alpha_n \end{vmatrix}.$$

Дальнейший анализ состоит в стандартной процедуре исследования устойчивости линейного уравнения. Для этого (21) приводят к нормальной форме:

$$\Delta \mathbf{Y}_{n+1} = \mathbf{H} \Delta \mathbf{Y}_n, \quad (22)$$

где  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_1^{-1} \mathbf{H}_2$ ;  $\mathbf{H}_1$  — невырожденная матрица; определяют коэффициенты характеристического уравнения:

$$\det |\lambda \mathbf{I} - \mathbf{H}| = 0, \quad (23)$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица размера  $k \times k$ , и находят условия, при которых корни (23) лежат в круге единичного радиуса. Условия устойчивости в конечном виде получают как ограничения, налагаемые на соотношения между параметрами системы и сигналами задания. Выражение (23) также можно использовать для реализации переходных процессов конечной длительности; эти условия (называемые далее условиями быстродействия) находят, приравняв коэффициенты (23) к нулю.

**Пример 1.** Рассмотрим систему стабилизации выходного тока выпрямителя с  $RL$ -нагрузкой (рис. 4,а) с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{b}{s - s_1},$$

где  $b = \frac{1}{L}$ ,  $s_1 = -\frac{R}{L}$ .

Вывод условий устойчивости и быстродействия приведен в приложении 1. Сравним эти условия с аналогичными условиями непрерывного режима [3] на границе режимов, уравнение которой согласно (11) имеет следующий вид:

$$\cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{m} - \varphi\right) = \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m} - \varphi\right) e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \varphi}. \quad (24)$$

Для конкретности положим  $m=2$ , тогда из (24) следует  $\alpha_0 = \varphi$ . Первое условие (П-6)

$$I(1-g_0) \operatorname{tg} \varphi > 0 \quad (25)$$

совпадает с приведенным в [3]. Вторые условия (П-6) и в [3] выглядят соответственно как

$$U_{\min} > I \frac{1-g_0}{2} \operatorname{tg} \varphi \quad \text{и} \quad U_{\min} > I \frac{1-g_0}{1+g_0} \operatorname{tg} \varphi. \quad (26)$$

Условия быстродействия (П-7) и в [3] имеют следующий вид:

$$U_{\text{опт}} = I(1-g_0) \operatorname{tg} \varphi; \quad U_{\text{опт}} = 2I \frac{1-g_0}{1+g_0} \operatorname{tg} \varphi. \quad (27)$$

Как видно из (26) и (27) выражения [3] больше, следовательно, на границе режимов существуют скачки условий устойчивости и быстродействия. При активной нагрузке условия устойчивости и быстродействия

$$U_{\min} > \frac{U_m}{2R} \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right); \quad U_{\text{опт}} = \frac{U_m}{R} \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)$$

совпадают с подобными условиями полууправляемого режима [4]. Требования к  $U_0$  вытекают из (П-8).

5\*

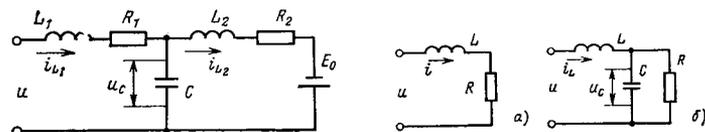


Рис. 3. Схема к примеру составления уравнения состояния

Рис. 4. Схемы к примерам

**Пример 2.** Рассмотрим систему стабилизации напряжения выпрямителя с  $LC$ -фильтром (рис. 4,б); передаточная функция линейной части имеет вид

$$W(s) = \frac{1}{(s-s_1)(s-s_2)}.$$

Пусть корни знаменателя простые и не кратные. Выбрав в качестве переменных состояния ток  $i_L$  и напряжение  $u_C$ , получим уравнения выпрямителя:

$$\frac{d\mathbf{X}'}{dt} = \mathbf{A}'\mathbf{X}' + \mathbf{B}'u; \quad y = (\mathbf{C}')^T \mathbf{X}'; \quad z = (\mathbf{D}')^T \mathbf{X}',$$

где

$$\mathbf{A}' = \begin{vmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{X}' = \begin{vmatrix} i_L \\ u_C \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{B}' = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{C}' = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \end{vmatrix}; \quad \mathbf{D}' = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Для упрощения вычислений целесообразно приведение  $\mathbf{A}'$  к диагональной форме, что соответствует представлению  $W(s)$  в виде параллельного соединения простых звеньев с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \sum_{i=1}^2 W_i(s) = \sum_{i=1}^2 \frac{b_i}{s-s_i}, \quad b_i = \frac{P(s_i)}{Q'(s_i)}$$

и выбору в качестве переменных состояния их выходных координат. Используя матрицу преобразования  $\mathbf{T}$ , вычисление которой производится по собственным значениям  $\mathbf{A}'$  [5], получаем преобразованные уравнения, приведенные в приложении 2. Там же даны уравнения динамики и расчет коэффициентов линейной модели. Конечный вывод условий устойчивости и быстродействия можно выполнить по аналогии с [3], где приведен пример анализа уравнения такого же вида как и П-16.

**Приложение 1.** Уравнения выпрямителя имеют вид:

$$\frac{di}{dt} = s_1 i + bu, \quad y = i, \quad z = i. \quad (\text{П-1})$$

Решение (П-1) при  $i_n=0$ :

$$i = I [\cos(\omega t + \beta_n) - \cos \beta_n e^{s_1 t}], \quad (\text{П-2})$$

где  $I = U_m (k^2 + \omega^2 L^2)^{-1/2}$ ;  $\beta_n = \alpha_n - \frac{\pi}{m} - \varphi$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = -\frac{\omega}{s_1}$ .

Уравнение (8) запишем таким образом:

$$E(\alpha_n, \lambda_n) = \cos(\lambda_n + \beta_n) - \cos \beta_n g_n, \quad (\text{П-3})$$

где  $g_n = \exp(s_1 t_1)$ , что позволяет вычислить  $\lambda_n$  по  $\alpha_n$  при выполнении условия (9). Подставив  $i(t)$  в (14), находим уравнение управления (15):

$$R(\alpha_{n+1}, \alpha_n, \lambda_n) = U\omega T_n - U_C \omega T_C + I [\sin \beta_n - \sin(\lambda_n + \beta_n) - \operatorname{tg} \varphi \cos \beta_n (g_n - 1)]. \quad (\text{П-4})$$

Уравнение (18) будет иметь вид

$$r_0 \Delta \alpha_{n+1} = r'_2 \Delta \alpha_n + r_3 \Delta \lambda_n, \quad (\text{П-5})$$

где

$$r_0 = -\frac{\partial R}{\partial \alpha_{n+1}} = -U; \quad r'_2 = \frac{\partial R}{\partial \alpha_n} = -U + I \frac{1-g_0}{\cos \varphi} \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right); \quad r_3 = \frac{\partial R}{\partial \lambda_n} = 0.$$

При вычислении коэффициентов учтено, что (П-3) спра-

ведливо и в установившемся режиме. Так как  $r_3=0$ , то в (20)  $r_2=r'_2$ . Условия устойчивости запишем как

$$\left. \begin{aligned} -r_0 + r_2 > 0, \quad I \frac{1-f_0}{\cos \varphi} \cos \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{m} \right) > 0; \\ -r_1 + r_2 > 0, \quad U_{\min} > I \frac{1-g_0}{2 \cos \varphi} \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{m} \right), \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-6})$$

а условие быстрействия как

$$r_2 = 0, \quad U_{\text{опт}} = I \frac{1-g_0}{\cos \varphi} \cos \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{m} \right). \quad (\text{П-7})$$

Из (П-7) и выражения (П-4) для установившегося режима, описываемого как

$$I_d = U - \frac{T_C}{T_0} U_C,$$

$$\text{где } I_d = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} i dt = \frac{mU_m}{2\pi R} \left[ \sin \left( \lambda_0 + \alpha_0 - \frac{\pi}{m} \right) - \sin \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{m} \right) \right],$$

получаем требование по устойчивости и быстрействию:

$$U_{C \min} > \frac{T_0}{T_C} (U_{\min} - I_d); \quad U_{C \text{ опт}} = \frac{T_0}{T_C} (U_{\text{опт}} - I_d). \quad (\text{П-8})$$

Приложение 2. Преобразованные уравнения выпрямителя имеют вид:

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bu; \quad y = C^T X; \quad z = D^T X, \quad (\text{П-9})$$

$$\text{где } X = TX' = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; \quad A = T^{-1}A'T = \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix}; \quad B = TB' = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}; \\ C = C'T = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}; \quad D = D'T = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} - \text{матрица преобразования.}$$

Решение (П-9) для каждой переменной при  $0 < t < t_1$  следующее:

$$x_i = X_i \cos(\omega t + \beta_{in}) + (x_{in} - \cos \beta_{in}) e^{s_i t}, \quad (\text{П-10})$$

$$\text{где } X_i = U_m b_i (s^2 + \omega^2)^{-1/2}; \quad \beta_{in} = \alpha_n - \frac{\pi}{m} - \varphi_i; \quad \text{tg } \varphi_i = -\frac{\omega}{s_i}.$$

Обозначим  $X(0) = \lambda_n$ , тогда из (П-9) следует:

$$z(0) = D^T X_n = d_1 x_{1n} + d_2 x_{2n}.$$

Выбираем  $x_{1n} = x_n$ , тогда  $x_{2n} = -\frac{d_1}{d_2} x_n = kx_n$ . Вычислим следующие величины:

$$x_1(\lambda_n) = X_1 \cos(\lambda_n + \beta_{1n}) + (x_n - \cos \beta_{1n}) g_{1n};$$

$$x_2(\lambda_n) = X_2 \cos(\lambda_n + \beta_{2n}) + (kx_n - \cos \beta_{2n}) g_{2n}.$$

где  $g_{in} = \exp(s_i t_1)$ .

Из условия  $z(\lambda_n=0)$  определяем  $\lambda_n$  в форме (8)

$$E(x_n, \alpha_n, \lambda_n) = 0. \quad (\text{П-11})$$

Решение для  $x_1$  на участке  $t_1 < t < T_n$

$$x_1(t) = x_1(\lambda_n) e^{s_1(t-t_1)}$$

в момент  $t=T_n$  определяет уравнение выпрямителя (13):

$$x_{n+1} = (x_n - \cos \beta_{1n}) e^{s_1 T_n} + X_1 \cos(\lambda_n + \beta_{1n}) e^{s_1(T_n - t_1)} = F(\alpha_{n+1}, \alpha_n, x_n, \lambda_n). \quad (\text{П-12})$$

Подставляя  $y$  в (14), имеем:

$$\frac{1}{T_C} \int_0^{T_n} (U - y) dt = U_C = \frac{1}{T_C} \int_0^{T_n} U dt - \int_0^{t_1} \{c_1 [X_1 \cos(\omega t + \beta_{1n}) + (x_n - \cos \beta_{1n}) e^{s_1 t}] + c_2 [X_2 \cos(\omega t + \beta_{2n}) + (kx_n - \cos \beta_{2n}) e^{s_2 t}]\} dt. \quad (\text{П-13})$$

Вычисляя интеграл, получаем уравнение управления (15):

$$R(\alpha_{n+1}, \alpha_n, x_n, \lambda_n) = 0.$$

Уравнения (16)–(18) будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{n+1} - l \Delta \alpha_{n+1} &= m' \Delta x_n + n' \Delta \alpha_n + p \Delta \lambda_n; \\ e'_1 \Delta x_n + e' \Delta \alpha_n + e_3 \Delta \lambda_n &= 0; \\ r_0 \Delta \alpha_{n+1} &= r'_1 \Delta x_n + r'_2 \Delta \alpha_n + r_3 \Delta \lambda_n; \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-14})$$

$$\text{где } l = \frac{\partial F}{\partial \alpha_{n+1}}; \quad m' = \frac{\partial F}{\partial x_n}; \quad n' = \frac{\partial F}{\partial \alpha_n}; \quad r_0 = -\frac{\partial R}{\partial \alpha_{n+1}}; \quad r'_1 = \frac{\partial R}{\partial x_n}; \quad r'_2 = \frac{\partial R}{\partial \alpha_n}; \quad r_3 = \frac{\partial R}{\partial \lambda_n}.$$

Уравнения (19) и (20) преобразуются как

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{n+1} - l \Delta \alpha_{n+1} &= m \Delta x_n + n \Delta \alpha_n; \\ r_1 \Delta \alpha_{n+1} &= r_1 \Delta x_n + r_2 \Delta \alpha_n, \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-15})$$

$$\text{где } m = m' - p \frac{e'_1}{e_3}; \quad n = n' - p \frac{e'_2}{e_3}; \quad r_1 = r'_1 - r_3 \frac{e'_1}{e_3}; \quad r_2 = r'_2 - r_3 \frac{e'_2}{e_3}.$$

Уравнение (21) будет иметь вид

$$H_1 \Delta Y_{n+1} = H_2 \Delta Y_n, \quad (\text{П-16})$$

$$\text{где } H_1 = \begin{bmatrix} 1 & -l \\ 0 & r_0 \end{bmatrix}; \quad H_2 = \begin{bmatrix} m & n \\ r_1 & r_2 \end{bmatrix}; \quad \Delta Y_n = \begin{bmatrix} \Delta x_n \\ \Delta \alpha_n \end{bmatrix}.$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздеев А. Д., Иванов А. Г. Устойчивость замкнутых систем с вентиляльными преобразователями постоянного тока в режиме прерывистых токов. — Электричество, 1973, № 12.
2. Шипило В. П., Зинин Ю. С. Устойчивость системы автоматического регулирования с вентиляльным преобразователем в режиме прерывистых токов. — ЭП. Электропривод, 1974, вып. 1.
3. Исаков А. С., Придатков А. Г. Математическая модель выпрямителя. — Электричество, 1980, № 6.
4. Исаков А. С. Выпрямитель в полупроводящем режиме. — Электричество, 1981, № 6.
5. Воронов А. А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979.

[17.02.82]

УДК 533.9:538.63

## Перераспределение тока в плазме твердого тела в магнитном поле

ЯНКАУСКАС З. К., ВАЛЮКЕНАС Г. И.  
Литовская ССР, Вильнюс

Целью настоящей статьи является разработка методики расчета распределения потенциала и тока в плазме твердого тела, находящегося в сильном магнитном поле, с учетом влияния металлических контактов. Задачи такого типа возникают при проектировании и производстве датчиков и преобразователей

Холла. Предложенная методика позволяет также определить изменение сопротивления образца.

В общем случае постоянное магнитное поле сильно искажает конфигурацию линий тока и потенциала в плазме твердого тела. Лишь для длинных образцов при достаточном удалении

от металлических контактов электрическое поле Холла однородно и полностью компенсирует воздействие магнитного поля на движущиеся носители заряда, а картина линий тока такая же, как и в отсутствие магнитного поля. Вблизи же металлических контактов происходит закорачивание э. д. с. Холла и конфигурация линий тока усложняется [1]. Даже для областей простой геометрической формы (например, прямоугольной) общая методика расчета распределения потенциала в настоящее время отсутствует [2].

Ниже приводится решение указанной задачи для прямоугольного образца конечной длины с двумя металлизированными торцами (см. рисунок), помещенного в сильное магнитное поле, когда  $\rho V \gg 1$ , где  $\rho$  — подвижность носителей тока;  $V$  — индукция магнитного поля. К металлизированным торцам ( $y=0$  и  $y=b$ ) приложена разность потенциалов  $U_0$ . Поскольку исследуем прямоугольный образец, а постоянное магнитное поле  $\vec{B}$  направлено по оси  $z$ , конфигурация силовых линий тока от  $z$  не зависит (двумерное приближение).

Для простоты ограничимся случаем полупроводникового образца, электропроводность которого обусловлена электронами с изотропной эффективной массой (антимонид индия). Тогда компоненты тока  $j_x, j_y$  и электрического поля  $E_x, E_y$  будут связаны уравнениями движения [2 и 3]:

$$\left. \begin{aligned} j_x - \beta j_y &= \sigma E_x; \\ j_y + \beta j_x &= \sigma E_y, \quad \beta = \rho B, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводность материала при  $B=0$ .

Выражая  $j_x, j_y$  через  $E_x, E_y$ , можем переписать систему уравнений (1) в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_x + \beta E_y) &= j_x; \\ \frac{\sigma}{1 + \beta^2} (E_y - \beta E_x) &= j_y, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad (3)$$

а функция  $U$  удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

граничные условия имеют вид

$$E_x = 0 \text{ при } y=0 \text{ или } y=b; \quad (5)$$

$$j_x = 0 \text{ при } x=0 \text{ или } x=a. \quad (6)$$

Учитывая (2), вместо (6) имеем

$$E_x + \beta E_y = 0 \text{ при } x=0 \text{ или } x=a. \quad (7)$$

В случае сильного магнитного поля  $\beta \gg 1$  (например, для антимонида индия  $\beta \gg 1$  при  $B > 1$  Тл в жидком азоте из (7) следует, что на границах  $x=0$  и  $x=a$  отношение

$$\left| \frac{E_x}{E_y} \right| = \beta \gg 1 \quad (8)$$

и нормальная компонента поля значительно больше тангенциальной, т. е. границы  $x=0$  и  $x=a$  являются практически эквипотенциалами. Следовательно, эквипотенциалами являются все четыре границы прямоугольника  $y=b, y=0, x=0, x=a$ .

Но из (6) непосредственно следует, что границы  $x=0$  и  $x=a$  являются и линиями тока. На основе (1) вместо (5) имеем

$$j_x - \beta j_y \text{ при } y=0, y=b. \quad (9)$$

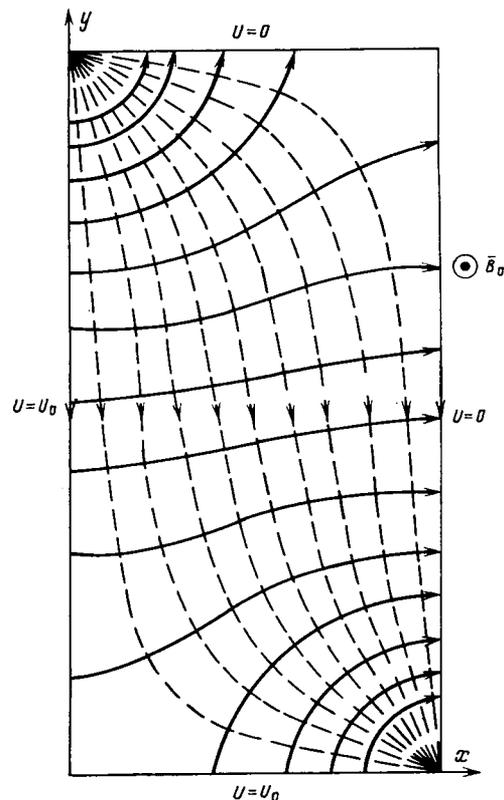
Из (9) следует, что при  $\beta \gg 1$  на границах  $y=0$  и  $y=b$  отношение

$$\left| \frac{j_x}{j_y} \right| = \beta \gg 1 \quad (10)$$

и тангенциальная компонента тока значительно превышает нормальную, т. е. границы  $y=0$  и  $y=b$  практически совпадают с линиями тока. Следовательно, с линиями тока совпадают все четыре границы прямоугольника:  $y=b, y=0, x=0, x=a$ .

Аналитическое выражение для функции  $U$  может быть представлено, как обычно, в виде ряда по собственным функциям:

$$U = \sum_{m=1}^{\infty} (c_m \sin mx + d_m \cos mx) (g_m \operatorname{sh} my + h_m \operatorname{ch} my),$$



Картина эквипотенциалей (---) и линий электрического поля (—), рассчитанная по формуле (13) для случая  $b=2a$  (эквипотенциалы одновременно являются линиями тока; направления тока и поля в каждой точке взаимно перпендикулярны и отмечены стрелками)

где  $c_m, d_m, g_m, h_m$  — коэффициенты, определяемые граничными условиями:

$$U = U_0 \text{ при } y=0; \quad (11a)$$

$$U = U_0 \text{ при } x=0; \quad (11b)$$

$$U = 0 \text{ при } y=b; \quad (12a)$$

$$U = 0 \text{ при } x=a. \quad (12b)$$

При помощи стандартной процедуры [4] получаем

$$U = \frac{4U_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi x}{a} \right] \frac{\operatorname{sh} [(2k-1)\pi(b-y)/a]}{\operatorname{sh} [(2k-1)\pi b/a]} + \frac{4U_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi y}{b} \right] \times \frac{\operatorname{sh} [(2k-1)\pi(a-x)/b]}{\operatorname{sh} [(2k-1)\pi a/b]}, \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

Качественная картина эквипотенциалей (они же линии тока) и линий электрического поля, полученная на основе (13) для случая  $a=1, b=2$ , изображена на рисунке. В частности, при  $y=0$  и  $y=b$  имеем  $j_y=0$ , т. е. токи возле металлизированных торцов текут параллельно торцам, а не перпендикулярно, как это имеет место при  $B=0$ .

Рассмотрим теперь изменение удельной электропроводности материала под воздействием магнитного поля.

Из (1) или (2) имеем

$$j = \sqrt{j_x^2 + j_y^2} = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \frac{\sigma}{1 + \beta^2} E. \quad (14)$$

Следовательно, в сильных магнитных полях электропроводность образца уменьшается обратно пропорционально  $(1 + \beta^2)$ .

Определим порядок ошибки, вносимой в расчеты из-за конечности параметра  $\beta$ . Вернемся к граничным условиям (11), (12) для потенциальной функции  $U$ . Если условия (11a) и (12a) являются точными, то условия (11b) и (12b) следуют из (8) лишь приближенно, т. к. совмещающая границы  $x=0$  и  $x=a$

АМБРОЗИ А.

## ШУМЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Изд. Венгерской Академии наук,  
Будапешт, 1982

Среди большого количества научных публикаций о полупроводниковых приборах книга А. Амбрози, изданная на английском языке, занимает точное и однозначное место. Эта книга о флуктуациях, возникающих в полупроводниковых приборах, обусловленных как дискретной природой носителей электрического заряда, так и их случайным тепловым движением. Монография Амбрози содержит достаточно подробное описание шумов, возникающих при работе полупроводниковых диодов, триодов, биполярных и полевых транзисторов.

Как пишет в предисловии автор книги, его целью «было дать возможность исследователю и инженеру-практику получить представление об электронных шумах, основанное на современных теоретических и практических результатах».

Поскольку электронный шум есть результат статистической природы ряда физических величин, в монографии большое внимание уделяется общим сведениям из теории вероятностей, математической статистики и статистической динамики. Подробно

рассмотрено прохождение случайных сигналов через линейные и нелинейные цепи, причем особое внимание уделено схемам, используемым при измерении шумов одно- и двухполупроводниковых выпрямителей, пик-детекторов, квадратичных детекторов и т. п.

Последняя глава книги посвящена проблемам измерения статических характеристик шумов.

Большим достоинством книги является библиография, включающая более 500 наименований, в том числе монографии, труды конференций и симпозиумов, а также журнальные статьи с 1960 по 1980 г. Для удобства пользования список литературы разделен по главам книги.

Несомненно, книга Андраша Амбрози будет полезным подспорьем для большого круга инженеров, занимающихся разработкой и применением полупроводниковых приборов.

БУРЛЯЕВ В. В., канд. техн. наук

ХОРВАТ Т., БЕРТА И.

## НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Это первая книга из серии монографий по статическому электричеству, издаваемой «Research Studies Press»; авторы ее — сотрудники Будапештского технического университета.

Книга предназначена широкому кругу читателей и может рассматриваться как введение в теорию статической электризации и практику защиты от ее нежелательных последствий. Вместе с тем она может служить и справочным пособием для специалистов.

В первой главе рассматриваются механизмы возникновения зарядов статического электричества, технологическое использование электростатической зарядки, говорится об опасности, которую может представлять статическое электричество в производственных процессах. Вторая глава посвящена методам защиты от разрядов статического электричества, таким как заземление электропроводящих частей оборудования, уменьшение скорости взаимного перемещения контактирующих материалов, увеличение их объемной проводимости и др.

В последующих трех главах излагаются принципы действия нейтрализаторов статического электричества различных типов (пассивных, активных, радиоактивных), а также рекомендуются оптимальные условия их применения в конкретных условиях: при нейтрализации поверхностных зарядов на пленках и волокнах, объемных зарядов в жидкостях и двухфазных потоках.

Завершающая глава посвящена комплексному применению нейтрализаторов разных типов, а также нейтрализаторам для специальных целей: ионизации воздуха в вентиляционных системах, очистки поверхностей, производств светочувствительных пленок и др.

Книга снабжена обширной библиографией, содержащей 129 наименований.

ЛАРИОНОВ В. П., доктор техн. наук

с эквипотенциалами, согласно (8) пренебрегаем на них тангенциальной составляющей поля  $E_y$ , которая мала по сравнению с нормальной составляющей  $E_x$ . Действительные эквипотенциалы могут составить с рассчитанными по (13) угол, приблизительно равный  $1/\beta$ .

Аналогичное положение существует и при определении конфигурации линий тока. Приближение связано с совмещением границ  $y=0$  и  $y=b$  с линиями тока и пренебрежением на них нормальной составляющей тока  $j_y$ , которая мала по сравнению с тангенциальной составляющей  $j_x$ . Таким образом, действительные линии тока могут составлять с расчетными угол порядка  $1/\beta$ .

Экспериментальное определение эквипотенциалов при помощи зонда, выполненное для прямоугольных образцов антимонида индия при  $\beta \geq 10$ , качественно подтвердило картину, представленную на рисунке, причем точность совпадения возрастала с уве-

личением  $\beta$ . Наибольшее отклонение (по напряжению) не превышало 6%.

Предлагаемая методика позволяет оценить конфигурацию линий тока и электрического поля в элементах Холла с учетом влияния металлческих контактов в сильных магнитных полях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимиров В. В., Волков А. Ф., Мейлихов Е. З. Плазма полупроводников. — М.: Атомиздат, 1979.
2. Thopson A. H., Kino G. S. Noise emission from InSb. — Journal of Applied Physics, 1970, vol. 41, № 7.
3. Янкаускас З. К., Чесонис В. И., Скрипник В. Г. Поверхностный магнитный эффект при наличии постоянного магнитного поля. — Журнал технической физики, XII, 1974, № 9.
4. Иоссель Ю. Я. Расчет потенциальных полей в энергетике. — Л.: Энергия, 1978.

[31.08.82]

## Новые стандарты

**ГОСТ 17525—81.** Генераторы электрические гидротурбинные (гидрогенераторы) капсульные. Общие технические условия.

Стандарт разработан взамен ГОСТ 17525—72, утвержден постановлением Госстандарта от 31 декабря 1981 г.; срок его действия — с 1 июля 1982 г. до 1 июля 1987 г.

Цель пересмотра — повышение технических требований к электрическим гидротурбинным генераторам.

Отличия нового стандарта от действующего:

установлены показатели к. п. д. гидрогенераторов при номинальном режиме работы;

предусмотрена необходимость: теплоизоляционных покрытий внутренних поверхностей капсулы при непосредственном водяном охлаждении; вентиляционной установки для подачи сухого подогретого воздуха внутрь капсулы при длительных стоянках агрегата; единой системы маслоснабжения турбины и генератора; введено требование о пуске и подъеме напряжения на генераторе при отсутствии напряжения в системе собственных нужд переменного тока;

дана единая система обозначения типа генераторов.

Внедрение стандарта позволит повысить качество, надежность и срок службы генераторов.

**ГОСТ 15049-81.** Лампы электрические. Термины и определения.

Стандарт разработан взамен ГОСТ 15049—74, утвержден постановлением Госстандарта от 31 декабря 1981 г.; срок его введения в действие — 1 января 1983 г.

Цель пересмотра — введение в народное хозяйство СССР СТ СЭВ 2737—80.

В отличие от действующего в новом стандарте:

установлено 124 термина вместо 54 (введены термины и определения видов электрических ламп и их деталей: лампы вакуумные, галогенные, декоративные, дневного света, дуговые, ленточные; лопатка, пластинка цоколя контактная, узел электродный и т. д.).

Внедрение стандарта позволит устранить разнобой в толковании понятий, касающихся ламп электрических.

**ГОСТ 21199—82.** Установки газотурбинные. Общие технические требования.

Стандарт разработан взамен ГОСТ 21199—75, утвержден постановлением Госстандарта от 5 февраля 1982 г.; срок его действия — с 1 января 1983 г. до 1 января 1988 г.

Цель пересмотра — повышение технических требований к газотурбинным установкам (ГТУ).

В отличие от действующего в новом стандарте:

расширена область распространения стандарта (включены газовые турбины парогазовых установок);

регламентирована наработка на отказ (3000 ч) для ГТУ базового класса использования;

введены требования к ремонтпригодности, а также пункт, определяющий адаптацию энергетических ГТУ к энергосистемам;

определены задачи и состав системы автоматического управления ГТУ, конкретизированы требования к ее элементам;

расширен нижний предел диапазона регулирования частоты вращения вала силовой турбины для приводных ГТУ;

введено требование к величине статистической неравномерности регулирования частоты вращения вала силовой турбины для энергетических ГТУ;

ужесточено требование к степени нечувствительности регулирования частоты вращения вала силовой турбины для ГТУ; уточнены требования к топливной системе ГТУ, работающих на жидком топливе;

установлены нормы по выбросу вредных веществ из выхлопного тракта ГТУ;

приведены в соответствие со стандартами по безопасности труда требования по допустимым величинам вибрации и шума в зоне обслуживания ГТУ;

уточнены требования по содержанию вредных элементов в тяжелом дистиллятном топливе, а также введено требование о недопустимости попадания масла в окружающую среду.

Внедрение стандарта позволит повысить технико-эксплуатационные показатели газотурбинных установок, их технический уровень и конкурентоспособность на мировом рынке.

**ГОСТ 19319-82.** Лазеры твердотельные. Основные параметры.

Стандарт разработан взамен ГОСТ 19319—73, утвержден постановлением Госстандарта от 22 января 1982 г.; срок его введения в действие — 1 января 1983 г.

Цель пересмотра — совершенствование основных параметров лазеров.

В отличие от действующего в новом стандарте:

расширена область распространения стандарта; введены дополнительные параметры (расходимость излучения и длительность импульсов излучения);

исключена таблица допустимых сочетаний значений энергии импульса излучения и частоты повторения импульсов.

Внедрение стандарта позволит повысить эксплуатационные и технологические возможности лазеров.

**ГОСТ 10434—82.** Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.

Стандарт разработан взамен ГОСТ 10434—76, утвержден постановлением Госстандарта от 3 февраля 1982 г.; срок его действия — с 1 января 1983 г. до 1 января 1988 г.

Цель пересмотра — уточнение классификации соединений и повышение технических требований к ним.

В отличие от действующего в новом стандарте:

введена классификация контактных соединений: по области применения, климатическому исполнению, стабильности электрического сопротивления;

установлены требования к выводам электротехнических устройств по ГОСТ 24753—81, винтовым контактными зажимам по СТ СЭВ 2188—80, линейной аппаратуре по ГОСТ 13276—79, крутящим моментам при затяжке болтов (от 15 до 380 Н·м), а также требования безопасности по ГОСТ 12.2.007.0—75;

расширена возможность выбора средств стабилизации электрического сопротивления и способов присоединения проводников к выводам электротехнических устройств;

усовершенствована технология нанесения защитных металлопокрытий на алюминий и его сплавы;

предусмотрено применение алюминиевых сплавов вместо дефицитной проводниковой меди.

Внедрение стандарта позволит повысить надежность контактных соединений и сократить потери электроэнергии в них.

Пресс-центр Госстандарта — по материалам  
ВНИИКИ

# УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» В 1982 г.

Автор и название статьи	№ ж-р-нала	Стр.
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА</b>		
Поливанов К. М. — Механические силы, действующие на электроды конденсатора в присутствии диэлектрика	1	1
Демирчян К. С., Чечурин В. Л. — Расчет вихревых магнитных полей на основе использования скалярного магнитного потенциала	1	7
Шоффа В. Н. — К расчету разомкнутых магнитных систем методами теории цепей	1	14
Мирзабекян Ж. М., Рубанович С. Г. — Определение электрических потерь в экране симметричных кабелей с многократно скрученными жилами	1	37
Лукович В. В. — Определение параметров электрзащиты трубопроводов, расположенных в кусочно-однородной среде	1	42
Львов Е. Л. — Гармонический баланс с учетом произвольного числа высших нечетных гармоник	2	32
Жуйков В. Я., Коротеев И. Е. — Применение теоремы умножения оригиналов для расчета цепей с периодическим коммутатором	2	54
Лидоренко Н. С., Мучник Г. Ф., Иванов А. М., Сушко В. Н., Сальников Л. А., Базин В. М. — Экспериментальная проверка проникновения электромагнитной волны в многослойные системы	3	41
Фрумкин А. Л. — Прикладные методы обращения интеграла Дюамеля	3	62
Григорьев И. И. — Измерение токораспределения в параллельных цепях с помощью секционированного пояса Роговского	3	64
Тетельбаум Я. И. — Обобщение метода приближенной G-диакоптики и использование его для решения внешних краевых задач	4	32
Игнатов В. Е., Лутидзе Ш. И., Скобарихин Ю. В. — Сверхпроводящие преобразователи на основе энергетических квантронов	4	36
Мирзабекян Ж. М., Рубанович С. Г. — Расчет электромагнитного поля в симметричных кабелях связи	4	42
Недялков К. В. — К расчету магнитных цепей	4	50
Есенин В. В. — Анализ температурных зависимостей электротехнических устройств	4	52
Русин Ю. С. — К оценке электрической емкости замкнутых оболочек	4	72
Ефименко Л. А. — Мультипольный спектр магнитного поля замкнутого токового контура	5	75
Никифоров М. Г., Харченко А. Ф. — Электрические характеристики LC-разрядного контура с учетом сопротивления искры	6	51
Пеленский Р. А. — О контактных электрических слоях	6	67
Бондалетов В. И., Гусаров А. А., Балтаханов А. М. — Сравнение двух численных методов расчета двухмерных импульсных магнитных полей с движущимися проводниками	7	41
Журавлев Э. Н., Ярославский В. Н. — Электростатический расчет систем с емкостными связями	7	46
Львов Е. Л. — Гармонический баланс в релейных системах с учетом внешних гармоник	8	24
Павлов Н. А. — Анализ двухмерного электромагнитного поля цилиндрического индуктора	8	47
Титов М. Н. — Исследование методом конформных отображений электрического поля конденсатора с неоднородным диэлектриком	9	57
Рябихин Е. А. — Об одном методе моделирования электрических цепей с заданной точностью	9	65
Семкин Б. В., Юшин А. В. — О согласовании параметров генератора с формирующей линией и канала искрового разряда	9	67
Костенко М. В. — Построение приближенных формул для решения электротехнических задач по способу «предельных точек»	9	72
Зелях Э. В. — Метод расчета переходных процессов в линейных электрических цепях	10	59
Новожилов О. П. — Моделирование ферромагнитных нелинейных элементов с помощью тестовых сигналов	10	63
Володин В. В., Найденов А. Ф. — О расчете взаимной индуктивности соосных круговых контуров	11	63

Автор и название статьи	№ жур-нала	Стр.
Шафоростов В. Я., Петренко Л. Г. — Вибрации обкладок конденсаторов при переменном напряжении	11	64
Иоссель Ю. Я. — Оценка емкостей в системах коаксиальных кольцевых электродов, расположенных на плоской границе двух диэлектрических сред	11	66
Янкаускас З. К., Валюкенас Г. И. — Перераспределение тока в плазме твердого тела в магнитном поле	12	68
<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</b>		
Радченко А. П. — Моделирование рассеивания электрических зарядов с поверхности полимерных материалов	1	51
Карасев В. В. — Расчет процесса перемагничивания магнитопровода насыщающихся реакторов	2	26
Шафоростов В. Я., Тарасов Б. М. — К выбору диэлектриков для конденсаторов тиристорных преобразователей	2	52
Петрашко А. И. — Ближайшие задачи электроизоляционной техники по обеспечению прогресса электромашиностроения	3	15
Вершинин Ю. Н., Заславская Т. Б., Соколовский В. Л. — Особенности пробоя изоляции в сверхпроводящем кабеле	3	20
Сквирская И. И., Сотников В. Г., Ушаков В. Я. — Влияние частоты воздействия импульсного напряжения на время до пробоя полиэтилена	3	49
Чернышев В. В., Швецов Г. И. — О создании высоковольтной оксидной изоляции	3	50
Иерусалимов М. Е., Ильенко О. С., Виноградный А. Н. — Метод исследования сравнительной стойкости электроизоляционных материалов к поверхностным частичным разрядам	3	52
Месенжник Я. З., Прут Л. Я. — Электрическая прочность жидких и твердых органических диэлектриков под давлением	3	54
Ивлиев Е. А., Иоссель Ю. Я. — О влиянии покрытий пластинчатых электродов на сопротивление растеканию между ними	3	55
Аронштам Ю. Л., Карпова Г. И., Подольская Г. В., Фрейеров В. О., Харин А. С. — Определение механической прочности фарфоровых изоляторов по характеристикам акустической эмиссии	5	50
Колесов С. Н., Колесов И. С. — Влияние остаточных явлений, вызванных ионизирующим излучением и давлением, на электрическую прочность полиэтилена и полистирола	5	72
Канискин В. А., Середа Г. Г. — Современное состояние исследований электрической изоляции криогенных устройств	9	37
Борисова М. Э., Койков С. Н., Орос Я. — Закономерности электрического старения полиэтиленовой кабельной изоляции при отсутствии частичных разрядов	12	58
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ТВН</b>		
Левит Л. М., Горбунова Л. М., Рабинович Р. С., Совалов С. А., Портной М. Г. — О реакции протяженной энергосистемы на небалансы активной мощности	1	20
Белохвастов В. А., Жуковский Ю. Г., Михайлов В. В. — Применение магнитодиэлектриков в качестве сердечников измерительных преобразователей тока	1	47
Майборода Г. А., Митюшкин К. Г., Скрыль В. Ф. — Метод групповой адаптивной передачи информации в энергосистемах	1	58
Денисенко Н. А., Гоффманн И. — Исследование стохастического характера симметричных составляющих тока и напряжения в системах электроснабжения	1	60
Влычков П. М., Гамов Н. К. — Повышение скорости и улучшение сходимости и надежности решения уравнений установившегося режима электрических систем	1	63

Федоров А. А., Садчиков С. В. — Характеристики и алгоритмы формирования и отбора вариантов систем промышленного электроснабжения	2	1	Казанцев В. Н., Кушнир Г. З., Слударж В. М. — Расчет потокораспределения в электрической сети с учетом регулирования трансформаторов	5	57
Куренный Э. Г., Дмитриев Е. Н., Ковальчук В. М. — Динамические показатели колебаний напряжения в электрической сети	2	5	Яцышин В. И., Цатурян Э. И. — О подавлении помех промышленной частоты в каналах связи	5	59
Дрехслер Р. — Коэффициент мощности и потери в сети при несимметричном и нелинейном потребителе	2	12	Золототрубов Н. П. — Пассивный синхронизатор для параллельной работы генераторов	5	61
Шуцкий В. И., Бурлаков А. А. — О вероятностной оценке уровня электробезопасности	2	16	Нестеров Е. В., Теймуразова В. А. — Оценка влияния собственного заряда самолета на инициирование молнии	5	63
Якимец И. В., Мальцев В. Н., Пикман А. Л. — Защиты преобразовательных подстанций передачи постоянного тока	2	21	Иванов А. В., Ларионов В. П. — О траекториях стримеров положительного импульсного разряда	5	64
Ершевич В. В., Крайз А. Г., Кривушкин Л. Ф. — Некоторые итоги разработки и внедрения поперечного регулирования в сетях 750—330 кВ	2	47	Фокин Ю. А. — Расчет показателей надежности в системах электроснабжения	6	1
Казанцев В. Н., Кушнир Г. З., Слударж В. М. — Управление реактивной мощностью и напряжением в энергосистемах на основе оптимизационных расчетов	3	1	Богданов В. А. — Выбор модели установившегося режима и сбор телеинформации в электроэнергетической системе	6	7
Жежеленко И. В., Липский А. М., Чубарь Л. А., Харламова З. В., Кашина Т. М. — Частотные характеристики узлов нагрузок сетей промышленных предприятий	3	6	Кривенцев В. И. — Принцип оптимизации автономных электроэнергетических систем по минимуму приведенных затрат	6	13
Кириевский Е. В., Калинин И. И. — Преобразователи тока, работающие на эффекте Холла, для релейной защиты автономных энергосистем	3	10	Решетов С. А. — Оптимизация электрических сетей при заданной потере напряжения	6	17
Ткаченко В. Н. — Расчет блуждающих и защитных токов в трубопроводной сети	3	44	Прусс В. А., Лимонов А. И. — Эффект эксплуатации электрической сети	6	21
Козлов В. Н., Лямец Ю. Я. — К анализу реле активного тока	3	47	Вишневский А. М. — К расчету электрического поля в задачах электрокоррозии металлов	6	27
Майкопар А. С. — Грозозащитные характеристики линий электропередач сверхвысокого напряжения с тросовой защитой	3	66	Городецкая Н. И., Пушков Н. В., Соломоник С. С. — Тепловой расчет коаксиального кабеля, передающего мощные одиночные импульсы	6	31
Шкарин Ю. П. — Методика расчета высокочастотных помех от короны на проводах линий электропередачи	3	69	Майкопар А. С. — Двухцепные грозовые отключения высоковольтных линий электропередачи	6	67
Веников В. А. — Задачи и возможности автоматизированного перспективного проектирования электроэнергетических систем	4	1	Конторович А. М., Шелухин Н. Н. — Расчет режимов энергосистем при больших небалансах мощности и изменениях частоты	7	1
Ершевич В. В., Хабачев Л. Д. — Первоочередные вопросы автоматизации проектирования энергосистем	4	5	Лосев Э. А., Завадский В. Г. — Оценка влияния элементов системы электроснабжения на надежность ее работы	7	6
Александров Г. Н., Евдокунин Г. А., Подпоркин Г. В. — Параметры воздушных линий электропередачи компактной конструкции	4	10	Шмойлов А. В. — Практические расчеты надежности схем электрических соединений	7	11
Азарьев Д. И., Белоусов И. В. — Повышение пропускной способности электропередач сверхвысокого напряжения с помощью реверсивных статических компенсаторов	4	18	Понизовский А. З. — Пробой воздушных промежутков при знакопеременных воздействиях	7	55
Шнелль Р. В., Картавец В. В. — Оптимизация основных параметров электропередачи	4	22	Цукерник Л. В., Васецкий В. М. — Уравнения режимов синхронного генератора с фильтрами симметричных составляющих в цепи нагрузок	7	69
Андрианов В. М., Дмоховская Л. Р. — Эквивалентирование схем при коммутациях на шинах промежуточной системы	4	46	Поспелов Г. Е., Федин В. Т. — О некоторых возможностях электропередач с емкостной связью	7	71
Кадомская К. П., Тихонов А. А. — Восстанавливающиеся напряжения на контактах генераторных выключателей электрических станций	4	56	Новаш В. И., Сопьяник В. Х. — Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит	7	74
Ольховский В. Я., Стрельников Н. А. — Статистическая линеаризация уравнений состояния сети промышленного электроснабжения	4	59	Бартоломей П. И., Окуловский С. К., Авраменко А. В., Ярославцев А. А. — Повышение эффективности метода Ньютона при расчетах установившихся режимов больших электрических систем	8	1
Туркия Н. Г., Готуа Т. К. — Ускоренные методы расчета токораспределения в энергетических системах	4	61	Фокин Ю. А., Харченко А. М. — Расчет надежности систем электроснабжения	8	5
Рагозин А. А., Оросева А. А. — Колебательная устойчивость автоматических регулируемых электроэнергетических систем	5	2	Лежнюк П. Д., Ярных Л. В. — Расчет токораспределения в электрической сети	8	10
Михайлова М. В. — Об использовании фильтровых избирательных органов в устройстве однофазного автоматического повторного включения	5	7	Ушаков Е. И. — Учет асинхронной нагрузки при расчетах аperiodической устойчивости сложных электроэнергетических систем	8	14
Бороденко В. А., Поляков В. Е. — Пусковой орган ввода автоматического резерва для комплексной нагрузки	5	13	Цукерник Л. В. — Об учете характеристик нагрузок и методике расчета статической устойчивости энергосистем	8	21
Мамедяров О. С. — Регрессионный анализ установившихся режимов электрической системы	5	19	Аржаников Е. А. Дистанционная защита и одностороннее определение места повреждения	8	29
Ализаде А. А., Бейдуллаев М. А., Велиев Х. А., Юриков П. А. — Об избирательной поражаемости молнией поверхности земли и воздушных линий	5	44	Вавин Н. В. — О расчетной оценке надежности релейной защиты	8	34
Жежеленко И. В., Липский А. М., Чубарь Л. А. — Определение расчетных нагрузок по нагреву проводов	5	53	Меерович Э. А., Карабаев Г. Х., Барышев В. И. — Магнитный повторитель для измерения токов в линиях электропередачи высокого напряжения	8	50
Поспелов Г. Е., Шапиро И. З. — Оценка погрешностей приближенного эквивалентирования распределительных сетей 6—10 кВ	5	55	Цапенко Е. Ф., Случевский Ю. П., Чучелов Д. Н. — Определение параметров изоляции фаз относительно земли в сети с изолированной нейтралью	8	52
			Маркушевич И. С. — Управление реактивной мощностью в энергосистеме	9	1
			Аввакумов В. Г. — Решение задач с нескалярным целевым функционалом при расчете электроэнергетических систем	9	5
			Гурский С. К., Домников С. В. — Распределение активной мощности методом гарантированного относительного уровня	9	10

Артамонов А. Ф., Верещагин И. П., Головин Г. Г., Литвинов В. Е. — Расчет поля коронного разряда для аксиально-симметричных систем электродов	9	16	О пуске синхронной машины в режиме вентильного двигателя с имитатором положения ротора	2	55
Гамм Б. З. — Защита синхронных генераторов от асинхронных режимов	9	21	Алиевский Б. Л. — Основное расчетное уравнение линейных электромашинных генераторов	2	59
Тер-Оганесян И. М. — Влияние стальных труб на погрешность измерения сопротивления петли фаза — нуль	9	49	Лисицкий Е. Л., Олейников А. М. — К расчету электромагнитной мощности асинхронного двигателя с двухслойным ротором	2	62
Раков В. А., Дульзон А. А. — Результаты измерения амплитуд токов молнии	9	53	Розов Ю. М., Тягунов А. П. — К расчету индукционного сопротивления, встраиваемого в роторную цепь асинхронного двигателя	2	64
Белохвастов В. А., Михайлов В. В. — Статические и динамические погрешности измерительных преобразователей тока с сердечником из магнитодиэлектрика	9	54	Буг Д. А. — Модификации коммутаторных электрических генераторов повышенного напряжения	3	31
Батюк И. И., Богданов В. А., Дорохин А. П., Орнов В. Г., Рабинович М. А. — Оценка крутизны частотных характеристик энергосистем	9	60	Ланда М. Л., Сердюк И. Г. — Определение допустимых аварийных перегрузок силовых трансформаторов	3	37
Барамысова Г. А., Бурлаку М. И., Журавлев В. Г. — Оценка экономического эффекта при распределении нагрузки с учетом экологических факторов	9	62	Латышева В. А., Мещенина М. П., Пашкевич В. И., Фетисов В. В. — Метод расчета реактивной э. д. с. и добавочных коммутационных потерь в обмотке якоря машины постоянного тока	3	71
Бурханов Р. С., Вялов С. И. — Разрядные характеристики изоляционных промежутков при пониженной плотности воздуха	9	70	Терзян А. А. — Методы и средства автоматизированного проектирования электрических машин автономной энергетики	4	25
Максимов А. И. — Единая энергетическая система СССР в XI пятилетке	10	1	Литвинов Б. В., Инкин А. И. — Добавочные потери от вихревых токов в зубцовых зонах электрических машин с витым магнитопроводом	4	63
Железко Ю. С., Интервалы неопределенности расчетных значений потерь электроэнергии в сетях	10	5	Коськин Ю. П., Трофимов Ю. А., Цейтлин Л. А. — Основные соотношения в двухмерной и трехмерной моделях криотурбогенератора	4	66
Ланда М. Л., Мельник В. А. — Пути снижения потерь электроэнергии в трансформаторах распределительных сетей	10	10	Петленко Б. И. — Годограф тока асинхронных машин с комбинированной вторичной цепью	4	69
Мирзабекян Г. З., Шеваленко И. С., Орлов А. В., Догалин Г. С. — Расчет эффективности работы электрофильтра при питании знакопеременным напряжением низкой частоты	10	14	Сарапулов Ф. Н., Бегалов В. А., Иваницкий С. В., Иваницкая В. В. — Исследование короткозамкнутого асинхронного двигателя с разомкнутым магнитопроводом	5	30
Якимец И. В. — Переключатели магнитного потока в электроэнергетических устройствах трансформаторного типа	10	17	Бочкарев И. В. — Расчет электромагнитного поля двухроторного асинхронного двигателя	5	34
Бородин И. Ф. — Электротехнология в сельском хозяйстве	11	1	Глухивский Л. И., Маляр В. С. — Расчет переходных процессов в явнополюсной синхронной машине, возбуждаемой от дополнительной обмотки статора	5	40
Александров Г. И., Подпоркин Г. В. — Повышение электрической прочности воздушных промежутков провод — земля	11	7	Васютинский С. Б., Андреева Е. Ю., Сорокин В. А., Степанова И. П. — Расчет внешнего магнитного поля сухих трансформаторов	5	47
Мусин А. К., Тимофеева Г. Г. — Восстановление электрической прочности вакуумных и газоразрядных промежутков низкого давления	11	10	Алексеев И. И., Терзян А. А. — Расчет потерь в явнополюсном массивном роторе синхронной машины	5	66
Журавлев Э. Н., Ярославский В. Н. — О выборе формы электродов высоковольтного оборудования	11	54	Егорова Т. И., Токов М. И. — Добавочные потери холостого хода в обмотке якоря беспазовой машины постоянного тока	5	68
Шидловский А. К., Гринберг И. П., Железко Ю. С. — Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения	12	22	Саркисян В. О. Режим искусственной нагрузки асинхронных двигателей	6	39
Кулинич В. А. — Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства	12	28	Аврух В. Ю., Дугинов Л. А. — Совершенствование системы вентиляции турбогенераторов с помощью пазовых клиньев статора, выступающих в зазор	6	43
Лесин Н. М., Файбисович В. А. — Повышение помехоустойчивости микро-ЭВМ, используемых в устройствах релейной защиты	12	54	Ермилов М. А., Глухов О. М. — Характеристики для расчета передаваемого момента электромагнитных гистерезисных муфт	6	49
Каринский Ю. И. — Импульсные реле сопротивления	12	56	Имас А. А. — Значения индукции искробезопасных трансформаторов	6	63
Мустафаев Р. И., Носов Ю. Л. — Об оценке надежности систем электроснабжения	12	60	Киселев В. И., Морозов Д. Н., Каросас И. И. — Расчет установившихся и переходных режимов машин постоянного тока с несимметричной магнитной цепью	6	69

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тальшинский И. Т. — Метод исследования электрических машин на основе теории отражения электромагнитных волн	1	24	Пунгин Л. М., Самойленко Б. Ф., Махотин Н. Д., Бондарук П. А. — Определение емкости составляющей выходного напряжения индуктосина	7	58
Сипайлов Г. А., Лоос А. В., Чучалин А. И. — Форсировка возбуждения и самовозбуждение синхронных импульсных генераторов	1	29	Сыч И. П. — Совершенствование термометрического метода контроля нагрева электрических машин	7	61
Исмаходжаев С. К., Джабаров Н. Г., Муминджанов А. Ф. — Исследование исполнительного двухроторного асинхронного двигателя	1	54	Ледовский А. Н., Сугробов А. М. — Магнитное поле в электрических машинах с постоянными магнитами из сплава $\text{SmCo}_5$	7	65
Иванов-Смоленский А. В., Мартынов В. А. — Расчет обмоточных коэффициентов симметричных многофазных обмоток переменного тока	1	69	Гайтов Б. Х., Семенко Л. П. — Характеристики асинхронного двигателя с массивным ротором при частотном управлении	8	54
Ефименко Е. И. — Уточнение теории и расчета параметров явнополюсных синхронных машин	2	37	Арутюнян В. С. — О свойствах пространственных гармоник поля явнополюсной синхронной машины	8	60
Ломакин В. А. — Новый принцип вентильно-механической коммутации постоянного тока	2	43	Ломакин В. А., Каменский И. М. — Электромагнитные процессы в полупроводниковом коммутаторе машины постоянного тока, работающей в переходных режимах	8	64
Вилесов Д. В., Кантурска С. Г., Димитров Л. В. — Бесконтактная синхронизация судовых генераторов	2	49	Лопухина Е. М., Минасян В. М., Семенчуков Г. А., Нгуен Хонг Тхань. — Добавочные моменты однофазных асинхронных двигателей с двухфазными и трехфазными обмотками	10	40
Ильин В. И., Гинзбург С. М., Севастьянова В. Н. —			Счастливы Г. Г., Федоренко Г. М., Выговский В. И. — Нестационарный нагрев крайних пакетов турбогенераторов	10	49

Сарапулов Ф. Н., Емельянов А. А., Иваницкий С. В., Резин М. Г. — Исследование электромеханических переходных процессов линейного асинхронного короткозамкнутого двигателя	10	54	Гельман М. В. — Расчет вентильных преобразователей по частотным характеристикам линейной части схемы	8	56
Хожайнов А. И., Кузнецов С. Е., Андреев В. И., Питулайнин Н. М. — Экспериментальные исследования кондукционного линейного электродвигателя с герметичным жидкометаллическим токоподводом	10	57	Рябенский В. М., Швец Э. А. — Динамическая модель и устойчивость в малом стабилизированных преобразователей с инверторным регулированием	8	58
Данько В. Г., Милых В. И., Станкевич А. И. — Вихревые токи в низкотемпературной зоне криостата двигателя постоянного тока	11	14	Исхаков А. С., Придатков А. Г. — Оценка быстродействия и переходные процессы в выпрямителях с интегральной системой управления	8	67
Власов Е. Н., Ходжаев К. Ш. — Нестационарные процессы синхронного генератора, питающего индуктивный накопитель энергии	11	19	Калиниченко А. Я. — Развитие принципов управления многофазными тиристорными широтно-импульсными преобразователями	9	27
Лоос А. В., Лукутин А. В., Чучалин А. И. — Исследование намагничивающего действия реакции якоря в синхронных импульсных генераторах	11	24	Жемеров Г. Г. — Расчет нагрева тиристоров непосредственного преобразователя частоты методом моделирования случайного процесса	9	32
Варлей В. В. — Вопросы теории рабочих процессов электромагнитной муфты редуктора	11	28	Черников Г. Б. — Оптимизация схемы высоковольтного тиристорного вентилля	9	71
Евланов В. С. — Модель линейных индукционных машин	11	33	Яценко А. А. — Энергетические показатели тиристорных регуляторов мощности с импульсно-ступенчатым управлением	10	23
Тарасов В. Н. — Электромагнитные и электромеханические процессы при перевозбуждении гистерезисного двигателя	11	49	Абакумов П. Н., Чванов В. А. — Метод синтеза систем оптимального регулирования тиристорных преобразователей	10	29
Могильников В. С., Мартынов В. Н. — Анализ работы асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке	11	57	Зборовский И. А. — Двенадцатифазный преобразователь с делительным реактором-трансформатором	11	36
Готовцев Н. П., Федосов М. И. — Расчет магнитного поля в сверхпроводниковых униполярных электрических машинах	11	59	Здрок А. Г. — Исследование работы трехфазного выпрямителя с реверсом тока для заряда аккумуляторных батарей	11	47
Журавлев Ю. Н. — Электромагнитные силы в радиально-упорном коническом подшипнике	11	61	Шипилло В. П., Зезюлькин Г. Г. — Комплексные коммутационные функции и их применение для исследования цепей с периодической ступенчатой модуляцией	12	62
Саблин А. Д., Ходжаев К. Ш. — Управление переходным процессом синхронного генератора кратковременного действия	12	33	Исхаков А. С. — Динамические свойства выпрямителя в режиме прерывистого тока	12	65
Арутюнян В. С. — Расчет токов в цепи дополнительной обмотки синхронной машины	12	37			
Мамедшахов М. Э. — Уточненный метод теплового расчета сопряженных узлов электрических машин	12	41			
Бочкарев И. В. — Выбор исполнительного электродвигателя переменного тока для систем автоматики	12	43			

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Костелянец В. С., Костин В. Н. — Восстанавливающееся напряжение на тиристорах преобразователей с проволочными резисторами защитных цепей	1	32
Сулейманов Н. Т., Ураксеев М. А. — Использование метода статических испытаний для оценки надежности суммирующих преобразователей	1	49
Мамедов Ф. И., Набиев М. А. — К исследованию индуктивных преобразователей угловых перемещений со сплошными магнитопроводами и с распределенными параметрами	2	51
Вейгандт В. Я. — Анализ электромагнитных процессов многофазных преобразователей методом разностных уравнений	3	58
Завьялов В. И. — О стационарных процессах в преобразователях	5	24
Гельман М. В. — Об оценке влияния вентильных преобразователей на качество электроэнергии питающей сети	5	73
Бельскис А. — А. А. — Анализ цепей с вентильными преобразователями в квазипериодических режимах	6	53
Михайлов О. П. — Анизотропия чувствительности магнитоупругих преобразователей	6	57
Титц Г., Лабунцов В. А. — Перевод выпрямителя, питающего автономный инвертор напряжения, в инверторный режим для прерывания аварийных токов	6	59
Данилевич О. И. — О переходе трехфазного мостового преобразователя из режима непрерывного в режим прерывистого тока	6	61
Яценко А. А. — Применение схемы «скользящего треугольника» в многофазных преобразователях	7	17
Тарасов А. Н. — Исследование электромагнитных процессов при выключении высоковольтных тиристорных вентилей в мощных преобразователях	7	24
Булахов Е. К., Ступель А. И. — Вентильный преобразователь как элемент связи систем переменного и постоянного тока	7	30
Крайчик Ю. С. — Классификация гармоник напряжения и тока в цепях с вентильными преобразователями	7	36
Бродян Г. Л. — Моделирование каскадно-мостовых вентильных преобразователей	8	39

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Буль Б. К., Гаврилов Г. Г., Красных А. А. — Расчет децентрирующих сил в системе магнитного подвеса	4	54
Смирнов Ю. В. — Расчет электромагнитных устройств переменного тока с учетом изменения их параметров при нагреве	6	36
Колесов Ю. А., Кривов А. А. — Расширение диапазона работы импульсных датчиков скорости с Т-образным магнитопроводом	6	47
Баринберг А. Д. — Анализ магнитогидродинамических реле	7	72
Зекцер Д. М., Зекцер М. Д. — Уточненное выражение для магнитных проводимостей выпучивания поля	8	69
Смирнов Ю. В. — Тепловой расчет обмоток постоянного тока с учетом изменения их сопротивления при нагреве	8	70
Гринберг В. С. — Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита	10	45

## ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Абрамович Р. Д., Виницкий Ю. Д., Каржев А. В., Сытин А. П. — Анализ процесса частотного пуска обратимого агрегата ГАЭС от статического преобразователя частоты	1	67
Браславский И. Я., Валек В. М. — Расчет статических характеристик асинхронных электроприводов с параметрическим управлением	2	66
Дацковский Л. Х., Коринев Б. Л., Кузнецов И. С., Скрипник В. А., Федотенко Л. В. — Регулирование асинхронных электроприводов на основе непосредственных преобразователей частоты	3	25
Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. — Адаптивное автоматическое управление электромеханическими системами	7	51
Гусьяцкий Ю. М. — Синтез быстродействующей системы частотно-управляемого асинхронного электропривода	10	34
Малинин Л. И., Малинин В. И. — Пути улучшения технических характеристик импульсных электроприводов постоянного тока	11	42
Файнштейн Э. Г., Файнштейн В. Г., Жуков Н. С. — Прямое цифровое подчиненное регулирование вентильного электропривода постоянного тока	12	48
Гортинский В. В., Хвалов Б. Г. — Управление электроприводом вибрационных машин	11	52

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

- Мамошин Р. Р., Дам куок Чу. — Электромагнитные процессы и показатели качества энергии в цепях преобразовательного электровоза при питании от системы малой мощности 2 70
- Павлов И. В. — Расчет помехоподавляющего контура для тяговых сетей 7 57
- Ефремов И. С., Калашкин А. М. — Математическая модель надежности двигателей большегрузных электромобилей 9 44

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ, ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ, ЭЛЕКТРОСВАРКА

- Нус Г. С. — Уточненная методика определения основных параметров многошлаковых руднотермических электропечей 8 43

## ДИСКУССИИ

- Труновский Л. Е., Беляев Л. С., Ханаев В. А., Кудрин Б. И., Конторов Д. С., Журавлев В. Г., Шнелль Р. В. — по статье В. А. Веникова («Электричество», 1982, № 4) 10 68
- Ершевич В. В., Лысков Ю. И., Шлимович Д. Д., Холмский Д. В., Вайнштейн Л. М., Щербина Ю. В., Цукерник Л. В. — по статье В. А. Веникова («Электричество», 1982, № 4) 11 70

## БИБЛИОГРАФИЯ

- Бут Д. А., Гольдберг О. Д. — рецензия на книгу И. П. Копылова «Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах (электрические машины)» 3 77
- Синьков В. М. — рецензия на книгу В. А. Веникова, В. Г. Журавлева, Т. А. Филиппова «Оптимизация режимов электростанций и энергосистем» 6 73
- Валеев Х. С., Воробьев А. С., Колчин В. В., Костюков Н. С. — рецензия на книгу Б. М. Тареева «Физика диэлектрических материалов» 11 74
- Бурляев В. В. — рецензия на книгу А. Амбрози «Шумы в электронике» 12 70
- Ларионов В. П. — рецензия на книгу Т. Хорвата, И. Берта «Нейтрализация статического электричества» 12 70

## ХРОНИКА

- Серяков К. И. — VI Всесоюзный семинар по физике гашения дуги в выключателях высокого напряжения 1 73
- Негушил А. В. — Письмо в редакцию 1 76
- Фокин Ю. А., Архипцев Ю. Ф. — Всесоюзная научная конференция «Снижение потерь в электроэнергетических системах» 2 74
- Суханов Л. А., Ефремова Е. А., Данилевич Я. Б. — Новые стандарты на гидрогенераторы 4 73
- Богатенков И. М., Ойдрам Р. А., Халилов Ф. Х. — Теоретические и электрофизические проблемы повышения надежности и долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью (заседание секции IV Научного Совета АН СССР) 6 74
- Федотова Л. Г. — Знакомьтесь — «Электро—82». Советская экспозиция 7 77
- Либкинд М. С. — Управляемая поперечная компенсация передач переменного тока (заседание секции III Научного Совета АН СССР) 8 72
- Логинов С. И., Волченкова Ю. В. — Всесоюзное научно-техническое совещание «Проблемы создания турбо-гидрогенераторов и крупных электрических машин» 10 74

Колиушко Г. М., Кучинский Г. С., Халилов Ф. Х., Шилин О. В. — Емкостные накопители энергии в электрофизических установках предельных параметров (заседание секции IV Научного Совета АН СССР) 10 75

## ЮБИЛЕИ

- Развитие теории электроэнергетики в трудах профессора А. А. Глазунова (К 90-летию со дня рождения ученого) 1 74
- Давид Эммануилович Брускин (К 70-летию со дня рождения) 1 76
- Эдуард Александрович Меерович (К 75-летию со дня рождения) 1 76
- Лев Поликарпович Петров (К 70-летию со дня рождения) 1 77
- Алексей Владимирович Иванов-Смоленский (К 60-летию со дня рождения) 2 76
- Николай Владимирович Астахов (К 60-летию со дня рождения) 2 77
- Игорь Петрович Верещагин (К 50-летию со дня рождения) 2 77
- Юрий Николаевич Вершинин (К 50-летию со дня рождения) 2 78
- Зосим Григорьевич Каганов (К 70-летию со дня рождения) 3 78
- Валентин Андреевич Веников (К 70-летию со дня рождения) 4 75
- Александр Евгеньевич Слухоцкий (К 70-летию со дня рождения) 5 75
- Алексей Иванович Якобс (К 60-летию со дня рождения) 5 75
- Академик АН УССР Василий Михайлович Хрущов (К 100-летию со дня рождения) 6 76
- Виталий Иванович Щуцкий (К 50-летию со дня рождения) 7 77
- Александр Алексеевич Чернышев (К 100-летию со дня рождения) 8 73
- Азад Алиевич Эфендизаде (К 75-летию со дня рождения) 8 75
- Израиль Львович Каганов (К 80-летию со дня рождения) 8 76
- Юлий Маркович Элькинд (К 75-летию со дня рождения) 8 77
- Анатолий Михайлович Быстров (К 70-летию со дня рождения) 10 77
- Петр Алексеевич Долин (К 70-летию со дня рождения) 10 78

## НЕКРОЛОГИ

- Леонид Алексеевич Жуков 1 78
- Николай Григорьевич Максимович 1 78
- Александр Акимович Воробьев 4 76
- Вольдемар Вольдемарович Аспит 4 77
- Вениамин Львович Фабрикант 4 77
- Борис Алексеевич Константинов 5 76
- Дмитрий Павлович Ледянкин 5 76
- Самуил Исаакович Рабинович 7 78

## РАЗНЫЕ СТАТЬИ И ИНФОРМАЦИИ

- Государственная премия СССР 1981 г. в области электротехники 5 1
- Развитие электротехники и энергетики в советских социалистических республиках 12 1

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ СТАТЕЙ

А  
Абакумов П. Н. 10, 29  
Абрамович Р. Д. 1, 67  
Аввакумов В. Г. 9, 5  
Авраменко А. В. 8, 1  
Аврух В. Ю. 6, 43  
Адонц Г. Т. 12, 1  
Азарьев Д. И. 4, 18  
Александров Г. Н. 4, 10; 11, 7

Алексеев И. И. 5, 66  
Алиевский Б. Л. 2, 59  
Ализаде А. А. 5, 44  
Андреев В. И. 10, 57  
Андреева Е. Ю. 5, 47  
Андрианов В. М. 4, 46  
Аржанников Е. А. 8, 29  
Аронштам Ю. Л. 5, 50  
Артамонов А. Ф. 9, 16  
Арутюнян В. С. 8, 60; 12, 37

Архипцев Ю. Ф. 2, 74  
Аугустайтис А. П. 12, 1  
Б

Базин В. М. 3, 41  
Балтаханов А. М. 7, 41  
Барамысова Г. А. 9, 62  
Баринберг А. Д. 7, 72  
Бартоломей П. И. 8, 1  
Барышев В. И. 8, 50  
Батюк И. И. 9, 60

Бегалов В. А. 5, 30  
Бейдуллаев М. А. 5, 44  
Белоусов И. В. 4, 18  
Белохвастов В. А. 1, 47; 9, 54  
Бельскис А.-А. А. 6, 53  
Беляев Л. С. 10, 68  
Богатенков И. М. 6, 74  
Богданов В. А. 6, 7; 9, 60  
Бондалетов В. Н. 7, 41  
Бондарук П. А. 7, 58  
Борисова М. Э. 12, 58  
Бородин И. Ф. 11, 1  
Борцов Ю. А. 7, 51  
Бочкарев И. В. 5, 34; 12, 43  
Браславский И. Я. 2, 66  
Бродян Г. Л. 8, 39  
Булахов Е. К. 7, 30  
Буль Б. К. 4, 54  
Буралков А. А. 2, 16  
Бурлаку М. И. 9, 62  
Бурляев В. В. 12, 70  
Бурханов Р. С. 9, 70  
Бут Д. А. 3, 31; 3, 77

## В

Вавин Н. В. 8, 34  
Вайнштейн Л. М. 11, 72  
Валеев Х. С., 11, 74  
Валек В. М. 2, 66  
Валюкенас Г. И. 12, 68  
Варлей В. В. 11, 28  
Васецкий В. М. 7, 69  
Васютинский С. Б. 5, 47  
Вейгандт В. Я. 3, 58  
Велиев Х. А. 5, 44  
Веников В. А. 4, 1  
Верещагин И. П. 9, 16  
Вершинин Ю. Н. 3, 20  
Вилесов Д. В. 2, 49  
Виницкий Ю. Д. 1, 67  
Виноградный А. Н. 3, 52  
Вишневский А. М. 6, 27  
Власов Е. Н. 11, 19  
Влычков П. М. 1, 63  
Вологдин В. В. 11, 63  
Волченкова Ю. В. 10, 74  
Воробьев А. С. 11, 74  
Выговский В. И. 10, 49  
Вялов С. И. 9, 70

## Г

Гаврилов Г. Г. 4, 54  
Гайтов Б. Х. 8, 54  
Гамм Б. З. 9, 21  
Гамов Н. К. 1, 63  
Гельман М. В. 5, 73; 8, 56  
Гинзбург С. М. 2, 55  
Глухивский Л. И. 5, 40  
Глухов О. М. 6, 49  
Головин Г. Т. 9, 16  
Гольдберг О. Д. 3, 77  
Горбунова Л. М. 1, 20  
Городецкая Н. И. 6, 31  
Горгинский В. В. 11, 52  
Готовцев Н. П. 11, 59  
Готуа Т. К. 4, 61  
Гоффманн И. 1, 60  
Григорьев И. Н. 3, 64  
Гринберг В. С. 10, 45  
Гринберг И. П. 12, 22  
Гурский С. К. 9, 10  
Гусаров А. А. 7, 41  
Гусяцкий Ю. М. 10, 34

## Д

Дам куок Чу 2, 70  
Данилевич О. И. 6, 61  
Данилевич Я. Б. 4, 73  
Данько В. Г. 11, 14  
Дацковский Л. Х. 3, 25  
Демирчян К. С. 1, 7  
Денисенко Н. А. 1, 60  
Джабаров Н. Г. 1, 54

Димитров Л. В. 2, 49  
Дмитриева Е. Н. 2, 5  
Дмоховская Л. Ф. 4, 46  
Догадин Г. С. 10, 14  
Домников С. В. 9, 10  
Дорохин А. П. 9, 60  
Дрехслер Р. Э. 12  
Дугинов Л. А. 6, 43  
Дульзон А. А. 9, 53

## Е

Евдокунин Г. А. 4, 10  
Евланов В. С. 11, 33  
Егорова Т. И. 5, 68  
Емельянов А. А. 10, 54  
Ермаков В. С. 12, 1  
Ермилов М. А. 6, 49  
Ершевич В. В. 2, 47; 4, 5; 11, 70  
Есенин В. В. 4, 52  
Ефименко Е. И. 2, 37  
Ефименко Л. А. 5, 75  
Ефремов И. С. 9, 44  
Ефремова Е. А. 4, 73

## Ж

Жежеленко И. В. 3, 6; 5, 53  
Железко Ю. С. 10, 5; 12, 22  
Жемеров Г. Г. 9, 32  
Жуйков В. Я. 2, 54  
Жуков Н. С. 12, 48  
Жуковский Ю. Г. 1, 47  
Журавлев В. Г. 9, 62; 10, 71  
Журавлев Э. Н. 7, 46; 11,  
Журавлев Ю. Н. 11, 54

## З

Завадский В. Г. 7, 6  
Завьялов В. И. 5, 24  
Заславская Т. Б. 3, 20  
Зборовский И. А. 11, 36  
Здрок А. Г. 11, 47  
Зезюлькин Г. Г. 12, 62  
Зекцер Д. М. 8, 69  
Зекцер М. Д. 8, 69  
Зелях Э. В. 10, 59  
Золототрубов Н. П. 5, 61

## И

Иваницкая В. В. 5, 30  
Иваницкий С. В. 5, 30; 10, 54  
Иванов А. В. 5, 64  
Иванов А. М. 3, 41  
Иванов-Смоленский А. В. 1, 69  
Ивлиев Е. А. 3, 55  
Игнатов В. Е. 4, 36  
Иерусалимов М. Е. 3, 52  
Ильенко О. С. 3, 52  
Ильин В. И. 2, 55  
Имас А. А. 6, 63  
Инкин А. И. 4, 63  
Иоссель Ю. Я. 3, 55; 11, 66  
Исмаходжаев С. К. 1, 54  
Исхаков А. С. 8, 67; 12, 65

## К

Кадомская К. П. 4, 56  
Казанцев В. Н. 3, 1; 5, 57  
Калинин И. И. 3, 10  
Калиниченко А. Я. 9, 27  
Калозжин А. М. 9, 44  
Каневский И. М. 8, 64  
Канискин В. А. 9, 37  
Кантурска С. Г. 2, 49  
Карабаев Г. Х. 8, 50  
Карасев В. В. 2, 26  
Каржев А. В. 1, 67  
Каринский Ю. И. 12, 56  
Каросас И. И. 6, 69  
Карпова Г. И. 5, 50  
Картавцев В. В. 4, 22  
Кашина Т. М. 3, 6  
Кириевский Е. В. 3, 10  
Киселев В. И. 6, 69

Ковальчук В. М. 2, 5  
Козлов В. Н. 3, 47  
Койков С. Н. 12, 58  
Колесов И. С. 5, 72  
Колесов С. Н. 5, 72  
Колесов Ю. А. 6, 47  
Колиушко Г. М. 10, 75  
Колчив В. В. 11, 72  
Конторов Д. С. 10, 70  
Конторович А. М. 7, 1  
Коринев Б. Л. 3, 25  
Коротеев И. Е. 2, 54  
Костелянец В. С. 1, 32  
Костенко М. В. 9, 72  
Костин В. Н. 1, 32  
Костюков Н. С. 11, 72  
Косыкин Ю. П. 4, 66  
Котия А. К. 12, 1  
Крайз А. Г. 2, 47  
Крайчик Ю. С. 7, 36  
Красных А. А. 4, 54  
Кривенцев В. И. 6, 13  
Кривов А. А. 6, 47  
Кривушкин Л. Ф. 2, 47  
Кудрин Б. И. 10, 69  
Кузнецов И. С. 3, 25  
Кузнецов С. Е. 10, 57  
Кулинич В. А. 12, 28  
Куренный Э. Г. 2, 5  
Кучинский Г. С. 10, 75  
Кушнир Г. З. 3, 1; 5, 57

## Л

Лабунцов В. А. 6, 59  
Ланда М. Л. 3, 37; 10, 11  
Ларнонов В. П. 5, 64; 12, 70  
Латышева В. А. 3, 71  
Левит Л. М. 1, 20  
Ледовский А. М. 7, 65  
Лежнюк П. Д. 8, 10  
Лесин Н. М. 12, 54  
Либкинд М. С. 8, 72  
Лидоренко Н. С. 3, 41  
Лимонов А. И. 6, 21  
Липский А. М. 3, 6; 5, 53  
Лисицкий Е. Л. 2, 62  
Литвинов Б. В. 4, 63  
Литвинов В. Е. 9, 16  
Логинов С. И. 10, 74  
Ломакин В. А. 2, 43; 8, 64  
Лоос А. В. 1, 29; 11, 24  
Лопухина Е. М. 10, 40  
Лосев Э. А. 7, 6  
Лукович В. В. 1, 42  
Лукугин А. В. 11, 24  
Лутидзе Ш. И. 4, 36  
Львов Е. Л. 2, 32; 8, 24  
Лысков Ю. И. 11, 70  
Лямец Ю. Я. 3, 47

## М

Майборода Г. А. 1, 58  
Майкопар А. С. 3, 66; 6, 67  
Максимов А. И. 10, 1  
Малинин В. И. 11, 42  
Малинин Л. И. 11, 42  
Мальцев В. Н. 2, 21  
Мальер В. С. 5, 40  
Мамедов Ф. И. 2, 51  
Мамедшахов М. Э. 12, 41  
Мамедяров О. С. 5, 19  
Мамошин Р. Р. 2, 70  
Маркушевич Н. С. 9, 1  
Мартынов В. А. 1, 69  
Мартынов В. Н. 11, 57  
Махотин Н. Д. 7, 58  
Меерович Э. А. 8, 50; 12, 1  
Мельник В. А. 10, 10  
Месенжник Я. З. 3, 54  
Мещенина М. П. 3, 71  
Милян В. И. 11, 14  
Милян А. Н. 12, 1  
Минасян В. М. 10, 40

Мирзабеян Г. З. 10, 14  
Мирзабеян Ж. М. 1, 37; 4, 42  
Матюшкин К. Г. 1, 58  
Михайлов В. В. 1, 47; 9, 54  
Михайлов О. П. 6, 57  
Михайлова М. В. 5, 7  
Могильников В. С. 11, 57  
Морозов Д. Н. 6, 69  
Муминджанов А. Ф. 1, 54  
Мусин А. К. 11, 10  
Мустафаев Р. И. 12, 60  
Мучник Г. Ф. 3, 41

## Н

Набиев М. А. 2, 51  
Найденев А. Ф. 11, 63  
Нгуен Хонг Тхань 10, 10  
Недялков К. В. 4, 50  
Нестеров Е. В. 5, 63  
Нетушил А. В. 1, 76  
Никифоров М. Г. 6, 51  
Новаш В. И. 7, 74  
Новожилов О. П. 10, 63  
Носов Ю. Л. 12, 60  
Нус Г. С. 8, 43

## О

Ойдрам Р. А. 6, 74  
Окуловский С. К. 8, 1  
Олейников А. М. 2, 62  
Ольховский В. Я. 4, 59  
Орлов А. В. 10, 14  
Орнов В. Г. 9, 60  
Орос Я. 12, 58  
Орсоева А. А. 5, 2

## П

Павлов И. В. 7, 57  
Павлов Н. А. 8, 47  
Пашкевич В. И. 3, 71  
Пеленский Р. А. 6, 67  
Петленко Б. И. 4, 69  
Петрашко А. И. 3, 15  
Петренко Л. Г. 11, 64  
Пикман А. Л. 2, 21  
Питулайнин Н. М. 10, 57  
Подольская Г. В. 5, 50  
Подпоркин Г. В. 4, 10; 11, 7  
Поливанов К. М. 1, 1  
Поляков В. Е. 5, 13  
Поляхов Н. Д. 7, 51  
Понизовский А. З. 7, 55  
Портной М. Г. 1, 20  
Поспелов Г. Е. 5, 55; 7, 71  
Придатков А. Г. 8, 67  
Прусс В. А. 6, 21  
Прут Л. Я. 3, 54  
Пунгин Л. М. 7, 58  
Путов В. В. 7, 51  
Пушков Н. В. 6, 31

## Р

Рабинович М. А. 9, 60  
Рабинович Р. С. 1, 20  
Радченко А. П. 1, 51  
Рагозин А. А. 5, 2  
Раков В. А. 9, 53  
Рахимов К. Р. 12, 1  
Резин М. Г. 10, 54  
Решетов С. А. 6, 17  
Рогинский В. Ю. 8, 74  
Розов Ю. М. 2, 64  
Рубанович С. Г. 1, 37; 4, 42  
Русин Ю. С. 4, 72  
Рябенский В. М. 8, 58  
Рябихин Е. А. 9, 65

Саблин А. Д. 12, 33  
Садчиков С. В. 2, 1  
Сальников Л. А. 3, 41  
Самойленко Б. Ф. 7, 58  
Сарапулов Ф. Н. 5, 30; 10, 54  
Саркасян В. О. 6, 39  
Севастьянова В. Н. 2, 55  
Семенко Л. П. 8, 54  
Семенчук Г. А. 10, 40  
Семкин Б. В. 9, 67  
Сердюк И. Г. 3, 37  
Серсда Г. Г. 9, 37  
Серяков К. И. 1, 73  
Синьков В. М. 6, 73  
Сипайлов Г. А. 1, 29  
Сквирская И. И. 3, 49  
Скобарихин Ю. В. 4, 36  
Скрыль В. Ф. 1, 58  
Скрыпник В. А. 3, 25  
Слодарж В. М. 3, 1; 5, 57  
Случевский Ю. Н. 8, 52  
Смирнов Ю. В. 6, 36; 8, 70  
Совалов С. А. 1, 20  
Соколовский В. Л. 3, 20  
Соломонок С. С. 6, 31  
Сопьяник В. Х. 7, 74  
Сорокин В. А. 5, 47  
Сотников В. Г. 3, 49  
Станкевич А. И. 11, 14  
Степанова И. П. 5, 47  
Стрельников Н. А. 4, 59  
Ступель А. И. 7, 30  
Сугробов А. М. 7, 65  
Сулейманов Н. Т. 1, 49  
Суханов Л. А. 4, 73  
Сушко В. Н. 3, 41  
Счастливы Г. Г. 10, 49  
Сытин А. П. 1, 67  
Сыч И. П. 7, 61

## С

Саблин А. Д. 12, 33  
Садчиков С. В. 2, 1  
Сальников Л. А. 3, 41  
Самойленко Б. Ф. 7, 58  
Сарапулов Ф. Н. 5, 30; 10, 54  
Саркасян В. О. 6, 39  
Севастьянова В. Н. 2, 55  
Семенко Л. П. 8, 54  
Семенчук Г. А. 10, 40  
Семкин Б. В. 9, 67  
Сердюк И. Г. 3, 37  
Серсда Г. Г. 9, 37  
Серяков К. И. 1, 73  
Синьков В. М. 6, 73  
Сипайлов Г. А. 1, 29  
Сквирская И. И. 3, 49  
Скобарихин Ю. В. 4, 36  
Скрыль В. Ф. 1, 58  
Скрыпник В. А. 3, 25  
Слодарж В. М. 3, 1; 5, 57  
Случевский Ю. Н. 8, 52  
Смирнов Ю. В. 6, 36; 8, 70  
Совалов С. А. 1, 20  
Соколовский В. Л. 3, 20  
Соломонок С. С. 6, 31  
Сопьяник В. Х. 7, 74  
Сорокин В. А. 5, 47  
Сотников В. Г. 3, 49  
Станкевич А. И. 11, 14  
Степанова И. П. 5, 47  
Стрельников Н. А. 4, 59  
Ступель А. И. 7, 30  
Сугробов А. М. 7, 65  
Сулейманов Н. Т. 1, 49  
Суханов Л. А. 4, 73  
Сушко В. Н. 3, 41  
Счастливы Г. Г. 10, 49  
Сытин А. П. 1, 67  
Сыч И. П. 7, 61

## Т

Табакс К. К. 12, 1  
Тальшинский И. Г. 1, 24  
Тарасов А. Н. 7, 24  
Тарасов В. Н. 11, 49  
Тареев Б. М. 2, 52  
Теймуразова В. А. 5, 63  
Терзян А. А. 4, 25  
Терзян А. А. 5, 66  
Тер-Оганесян И. М. 9, 49  
Тетельбаум Я. И. 4, 32  
Тигунов А. П. 2, 64  
Тийсмус Х. А. 12, 1  
Тимофеева Г. Г. 11, 10  
Титов М. Н. 9, 57  
Титц Г. 6, 59  
Тихонов 4, 56  
Ткаченко В. Н. 3, 44  
Токов М. И. 5, 68  
Толстов Ю. Г. 12, 1  
Трофимов Ю. А. 4, 66  
Трунковский Л. Е. 10, 68  
Туркия Н. Г. 4, 61

## У

Ураксеев М. А. 1, 49  
Ушаков В. Я. 3, 49  
Ушаков Е. И. 8, 14

## Ф

Фазылов Х. Ф. 12, 1  
Файбисович В. А. 12, 54  
Файнштейн В. Г. 12, 48  
Файнштейн Э. Г. 12, 48

Федин В. Т. 7, 71  
Федоренко Г. М. 10, 49  
Федоров А. А. 2, 1  
Федосов М. И. 11, 59  
Федотенко Л. В. 3, 25  
Федотова Л. Г. 7, 77  
Фетисов В. В. 3, 71  
Фокин Ю. А. 2, 74; 6, 1; 8, 5  
Фрейеров В. О. 5, 50  
Фрумкин А. Л. 3, 62

## Х

Хабачев Л. Д. 4, 5  
Хвалов Б. Г. 11, 52  
Халилов Ф. Х. 6, 74; 10, 75  
Ханаев В. А. 10, 68  
Харин А. С. 5, 50  
Харламова З. В. 3, 6  
Харченко А. Ф. 6, 51; 8, 5  
Ходжаев К. Ш. 11, 19; 12, 33  
Хожанинов А. И. 10, 57  
Холмский Д. В. 11, 71

## Ц

Цапенко Е. Ф. 8, 52  
Цатурян Э. Н. 5, 59  
Цейтлин Л. А. 4, 66  
Цукерник В. Л. 7, 69; 8, 21; 11, 73

## Ч

Чалый Г. В. 12, 1  
Чванов В. А. 10, 29  
Черников Г. Б. 9, 71  
Чернышев В. В. 3, 50  
Чечурин В. А. 1, 7  
Чиженко И. М. 12, 1  
Чубарь Л. А. 3, 6; 5, 53  
Чучалин А. И. 1, 29; 11, 24  
Чучелов Д. Н. 8, 52

## Ш

Шапиро И. З. 5, 55  
Шафоростов В. Я. 2, 52; 11, 64  
Швец Э. А. 8, 58  
Швецов Г. И. 3, 50  
Шеваленко И. С. 10, 14  
Шелухин Н. Н. 7, 1  
Шидловский А. К. 12, 1; 22  
Шилин О. В. 10, 75  
Шипило В. П. 12, 62  
Шкарин Ю. П. 3, 69  
Шлимович Д. Д. 11, 70  
Шмойлов А. В. 7, 11  
Шнелль Р. В. 4, 22; 10, 72  
Шоффа В. Н. 1, 14

## Щ

Щербина Ю. В. 11, 73  
Щуцкий В. И. 2, 16

## Э

Эфендизаде А. А. 12, 1

## Ю

Юриков П. А. 5, 44  
Юшин А. В. 9, 67

## Я

Якимец И. В. 2, 21; 10, 17  
Янкаускас З. К. 12, 68  
Ярных Л. В. 8, 10  
Ярославский В. Н. 7, 46; 11, 54  
Ярославцев А. А. 8, 1  
Яценко А. А. 7, 17; 10, 23  
Яцышин В. И. 5, 59

Развитие электротехники и энергетики в советских социалистических республиках . . . . .	1
Шидловский А. К., Гринберг И. П., Железко Ю. С. — Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения . . . . .	22
Кулинич В. А. — Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства . . . . .	28
Саблин А. Д., Ходжаев К. Ш. — Управление переходным процессом синхронного генератора кратковременного действия . . . . .	33
Арутюнян В. С. — Расчет токов в цепи дополнительной обмотки синхронной машины . . . . .	37
Мамедшахов М. Э. — Уточненный метод теплового расчета сопряженных узлов электрических машин . . . . .	41
Бочкарев И. В. — Выбор исполнительного электродвигателя переменного тока для систем автоматики . . . . .	43
Файнштейн Э. Г., Файнштейн В. Г., Жуков Н. С. — Прямое цифровое подчиненное регулирование вентильного электропривода постоянного тока . . . . .	48
<b>ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ</b>	
Лесин Н. М., Файбисович В. А. — Повышение помехоустойчивости микро-ЭВМ, используемых в устройствах релейной защиты . . . . .	54
Каринский Ю. И. — Импульсные реле сопротивления . . . . .	56

Борисова М. Э., Койков С. Н., Орос Я. — Закономерности электрического старения полиэтиленовой кабельной изоляции при отсутствии частичных разрядов . . . . .	58
--	----

## СООБЩЕНИЯ

Мустафаев Р. И., Носов Ю. Л. — Об оценке надежности систем электроснабжения . . . . .	60
Шипилло В. П., Зезюлькин Г. Г. — Комплексные коммутационные функции и их применение для исследования цепей с периодической ступенчатой модуляцией . . . . .	62
Исхаков А. С. — Динамические свойства выпрямителя в режиме прерывистого тока . . . . .	65
Янкаускас З. К., Валиукенас Г. И. — Перераспределение тока в плазме твердого тела в магнитном поле . . . . .	68

## БИБЛИОГРАФИЯ

Указатель материалов, помещенных в журнале «Электричество» в 1982 г. . . . .	72
--	----

## Contents

Development of Electrical and Power Engineering in the Soviet Socialist Republics . . . . .	1
Quality Control of Electric Power and Requirements Imposed on Measurement Facilities — A. K. Shidlovski, I. P. Greenberg, U. S. Zhelezko . . . . .	22
Controlled L-C Transforming Devices — V. A. Kulinich . . . . .	28
Control of Transients in a Synchronous Generator for Short-Term Duty — A. D. Sablin, K. S. Khodjayev . . . . .	33
Calculation of Currents in the Auxiliary Winding of a Synchronous Machine — V. S. Arutiunyan . . . . .	37
A High-Precision Method for Calculating the Heating of Mated Units in Electrical Machines — M. E. Mamedshakhov . . . . .	41
Selecting the Executive A. C. Motor for Automation Systems — I. V. Bochkaryev . . . . .	43
Direct Subordinated Dijital Control of an Electronic D. C. Drive — E. G. Fainshtein, V. G. Fainshtein, N. S. Djukov . . . . .	48
<b>FROM OPERATING EXPERIENCE</b>	
Improving the Noise Immunity of Micro-Computers Employed in Protective Relaying — N. M. Lesin, V. A. Faibisovitch . . . . .	54

Impulse Type Impedance Relays — U. I. Karinski . . . . .	56
Laws Governing the Electrical Ageing of Polyethylene Cable Insulation in the Absence of Partial Discharges — M. E. Borisova, S. N. Koikov, J. Oros . . . . .	58

## REPORTS

On Appraising the Reliability of Power Supply Systems — R. I. Mustaphayev, U. L. Nosov . . . . .	60
Complex Commutating Functions and Their Application in Studying Circuits Having Periodic Step Modulation — V. P. Shipillo, G. G. Zeziulkin . . . . .	62
The Dynamic Properties of a Rectifier for Intermittent Duty — A. S. Iskhakov . . . . .	65
Redistribution of Current in the Plasma of a Solid Body in a Magnetic Field — Z. K. Jankauskas, C. I. Valiukenas . . . . .	68

## BIBLIOGRAPHY . . . . . 70

CONTENTS OF THE JOURNAL «ELECTRICHESTVO» FOR 1982 . . . . .	72
---	----

- УДК 621.31.658.562  
Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения. Шидловский А. К., Гринберг И. П., Железко Ю. С. — «Электричество», 1982, № 12.
- Рассмотрены вопросы необходимости и целесообразности разработки и практического применения методов и средств повышения качества электрической энергии у приемников, подключенных к распределительным сетям, измерения и контроля показателей качества электроэнергии, рекомендуемых ГОСТ 13109—67. Библ. 7.
- УДК 621.314.214.332  
Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства. Кулинич В. А. — «Электричество», 1982, № 12.
- В статье изложен принцип действия обобщенного трансформирующего устройства — индуктивно-емкостной предназначенной для регулирования напряжения в промышленных электрических сетях. Устройство, представляющее собой бесконтактный многоцелевой регулятор напряжения, во многих случаях более эффективно, чем обычно используемое устройство РПН. Библ. 6.
- УДК 621.313.322.018.762.3:62-5  
Управление переходным процессом синхронного генератора кратковременного действия. Саблин А. Д., Ходжаев К. Ш. — «Электричество», 1982, № 12.
- Рассматривается переходный процесс синхронного генератора кратковременного действия, сопровождающийся существенным изменением угловой скорости. Генератор включен на активно-индуктивную нагрузку и работает за счет кинетической энергии предварительно раскрученного маховика, механически связанного с ротором. Определен закон изменения возбуждения, обеспечивающий заданное значение мощности в течение рабочего процесса за исключением малого интервала времени после включения. Изучены переходные процессы генератора при указанном изменении напряжения возбуждения. Используются асимптотические методы нелинейной механики и численное интегрирование. Библ. 5.
- УДК 621.313.32.001.24  
Расчет токов в цепи дополнительной обмотки синхронной машины. Арутюнян В. С. — «Электричество», 1982, № 12.
- В установленном синхронном режиме токи в цепи определены аналитически через параметры цепи переменного тока, эквивалентирующие нагрузку выпрямителя и особенности коммутации. Приведено выражение для выпрямленного тока в удобной форме, из показателей коммутации связанной только с углом, дано сравнение расчета с опытом. Библ. 4.
- УДК 621.313.017.71.001.24  
Уточненный метод теплового расчета сопряженных узлов электрических машин. Мамедшахов М. Э. — «Электричество», 1982, № 12.
- На основе машинного интегрирования локально-одномерным методом краевой двухмерной задачи с разрывными коэффициентами проанализирован ход нестационарного процесса нагрева наборного узла применительно к электрическим машинам. — Библ. 11.
- УДК 621.313.333  
Выбор рационального типа исполнительного электродвигателя переменного тока для систем автоматики. Бочкарев И. В. — «Электричество», 1982, № 12.
- Проведено сравнение характеристик исполнительных электродвигателей переменного тока различных типов: с полым немагнитным ротором, с ротором типа «белочья клетка» и совмещенных машин с двумя концентрично расположенными рабочим и вспомогательным роторами. Получены аналитические зависимости для расчета основных выходных параметров, по которым рассчитаны кривые для различных частот питания, чисел пар полюсов и габаритных размеров, позволяющие выбрать наиболее рациональный тип исполнительного электродвигателя и предварительно определить оптимальный вариант основных геометрических размеров. Полученные зависимости позволяют уже на первом этапе проектирования комплексно учесть все основные требования технического задания. Библ. 8.
- УДК 62-83:621.3.078  
Прямое цифровое подчиненное регулирование вентильного электропривода постоянного тока. Файнштейн Э. Г., Файнштейн В. Г., Жуков Н. С. — «Электричество», 1982, № 12.
- На основе D-преобразования Лапласа синтезированы цифровые регуляторы тока и скорости тиристорного привода постоянного тока. Проведен анализ влияния обратной связи по э. д. с. двигателя и нелинейности характеристик преобразователя. Даны структурные схемы управления с коррекцией запаздывания и описаны результаты экспериментальных исследований привода с разработанным цифровым управляющим устройством. Библ. 3.
- УДК 621.391.82:681.142-523.8:621.316.925.2  
Повышение помехоустойчивости микро-ЭВМ, используемых в устройствах релейной защиты. Лесин И. М., Файбисович В. А. — «Электричество», 1982, № 12.
- Предложены два имитатора помех для исследований помехоустойчивости микро-ЭВМ в устройствах релейной защиты и автоматики. Описан комплекс аппаратных и программных средств, существенно повышающих уровень помехозащищенности микро-ЭВМ по сети питания и информационным цепям. Библ. 8.
- УДК 621.316.925  
Импульсные реле сопротивления. Каринский Ю. И. — «Электричество», 1982, № 12.
- Описан импульсный способ построения реле сопротивления, состоящий в формировании из тока амплитудно-модулированного периодического импульсного сигнала, а из напряжения — непрерывного сигнала с последующим их сравнением. Высокая помехоустойчивость импульсного реле сопротивления обеспечивается наличием непрерывного опорного сигнала, а высокая точность — формирование импульсного сигнала в моменты времени, когда магнитопровод измерительного трансформатора не насыщен. Библ. 4.
- УДК 621.316.1.019.34.001.24  
Об оценке надежности систем электроснабжения. Мустафаев Р. И., Носов Ю. Л. — «Электричество», 1982, № 12.
- Предложен метод аналогового моделирования, позволяющий оценить надежность системы электроснабжения относительно узлов потребителей. Метод применим для систем любой сложности, которые могут быть представлены как плоскими, так и неплоскими графами. Библ. 9.
- УДК 621.314.001.24  
Комплексные коммутационные функции и их применение для исследования цепей с периодической ступенчатой модуляцией. Шипилов В. П., Зезюлькин Г. Г. — «Электричество», 1982, № 12.
- Предлагается периодические модулирующие функции, имеющие ступенчатый характер, заменять линейной комбинацией ортогональных комплексных коммутационных функций. После такой замены разрабатывается только одно функциональное преобразование, позволяющее определить связь изображений входных и выходных сигналов многительных звеньев. Данное функциональное преобразование позволяет решать общую задачу синтеза цепей с амплитудной модуляцией сигналов ступенчатыми несущими. Библ. 6.
- УДК 621.314.632.001.24  
Динамические свойства выпрямителя в режиме прерывистого тока. Исхаков А. С. — «Электричество», 1982, № 12.
- Рассмотрены динамические свойства замкнутой системы с выпрямителем в режиме прерывистого тока для конечных отклонений при нагрузке произвольного характера. Математическая модель замкнутой системы, построенная с помощью метода переменных состояния, состоит из разностных уравнений выпрямителя и схемы управления. Характерной особенностью этого режима является понижение размерности дискретного вектора состояния линейной части на единицу по сравнению с порядком ее передаточной функции. Получена линейная модель замкнутой системы выпрямителя с интегральной схемой управления и приведены соответствующие примеры. Библ. 5.
- УДК 533.9:538.63  
Перераспределение тока в плазме твердого тела в магнитном поле. Янкаускас З. К., Валукенас Г. И. — «Электричество», 1982, № 12.
- Аналитически исследовано влияние постоянного магнитного поля на распределение электрического тока в плазме твердого тела для прямоугольного образца с двумя металлизированными торцами. Библ. 4.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А., Ларионов В. П., Лидоренко Н. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушия А. В., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Савалов С. А., Тареев Б. М., Тиходев Н. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.

Научные редакторы: А. Б. Желдыбин, Б. Д. Макаршин

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.  
101000, Москва, Главной почтамт, абонентный ящик № 648

Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор О. Д. Кузнецова

Сдано в набор 15.10.82 Подписано в печать 06.12.82 Т-20355 Формат 63 × 9 1/8 Печать высокая Усл. печ. л. 10,0 Усл. кр.-отг. 10,5 Уч.-изд. л. 13,28  
Тираж 5882 экз. Заказ 268

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28