

ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1999

5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Секция теоретических основ электротехники, преобразовательной техники, электротехнических материалов

Бутырин П.А., председатель секции (Объединенный институт высоких температур РАН), **Булатов О.Г.** (Московский энергетический институт), **Козлов В.Н.** (С.-Петербургский государственный технический университет), **Лагарьков А.Н.** (Объединенный институт высоких температур РАН), **Макаршин Б.Д.**, ответственный секретарь редакции, **Миронов В.Г.** (Московский энергетический институт), **Розанов Ю.К.** (Московский энергетический институт), **Чечурин В.Л.** (С.-Петербургский государственный технический университет).

Научный редактор — **Макаршин Б.Д.**

Секция электроэнергетики

Строев В.А., главный редактор, председатель секции (Московский энергетический институт), **Дьяков А.Ф.** (Корпорация «Единый электроэнергетический комплекс РФ»), **Железко Ю.С.** (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), **Ишкин В.Х.** (РАО «ЕЭС России»), **Кошев Л.А.** (Научно-исследовательский институт постоянного тока), **Мамиконянц Л.Г.** (Научно-исследовательский институт электроэнергетики), **Никитин О.А.** (РАО «ЕЭС России»), **Семенов В.А.** (ЦДУ ЕЭС России).

Научный редактор — **Кудинова Л.С.**

Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов

Лоханин А.К., председатель секции (Всероссийский электротехнический институт), **Александров Г.Н.** (С.-Петербургский государственный технический университет), **Белкин Г.С.** (Всероссийский электротехнический институт), **Митькин Ю.А.** (Ивановская государственная энергетическая академия).

Научный редактор — **Кудинова Л.С.**

Секция электрических машин

Иванов-Смоленский А.В., председатель секции (Московский энергетический институт), **Бут Д.А.** (Московский государственный авиационный институт), **Данилевич Я.Б.** (Отдел (институт) электроэнергетических проблем РАН), **Евсеев Б.Н.**, заместитель главного редактора журнала, **Шакарян Ю.Г.** (Научно-исследовательский институт электроэнергетики).

Научный редактор — **Евсеев Б.Н.**

вода и автома-
тических процессов

(Московский энергетический ин-
ститут государственный электротех-
нический Ф. (Московский энергетический
техническое объединение «Антей»)).

Б.Н.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5
МАЙ
1999

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛИ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение физико-технических проблем энергетики),
ФЕДЕРАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЩЕСТВ

СОДЕРЖАНИЕ

Белотелов А.К. Пути повышения надежности функционирования устройств релейной защиты и автоматики	
Якимец И.В., Наровлянский А.В., Иванов И.А. Определение места повреждения в линиях электропередачи на основе измерения потоков мощности	
Иванов В.Ф. , Кощеев Л.А., Шлайфштейн В.А. Моделирование многоподстанционной передачи постоянного тока в составе сложной энергосистемы	
Цицикан Г.Н., Зайцев Г.З. Об оценке несимметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения	
Левин М.С., Лещинская Т.Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ	
Попов В.И. Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин (Часть I, окончание)	
Инкин А.И., Рейхердт А.А. Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в трехфазных кабелях с проводящей оболочкой	
Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н. Трехмерная модель электромагнитных процессов в индукционном электромеханическом преобразователе энергии	
Серебряков А.С. Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции	
Костюков Н.С., Лукичев А.А. Диэлектрические свойства керамики на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в области релаксационной поляризации	
ДИСКУССИИ	
Смирнов Ю.В. Оптимизация магнитного режима трехфазных асинхронных двигателей малой мощности	
Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Захаренко А.Б. Создание экономичных асинхронных двигателей малой мощности	
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Пятин Ю.М. Дешифраторный суперключ для инженерного проектирования линейных электрических цепей	
ХРОНИКА	
Памяти Г.Н. Петрова (К 100-летию со дня рождения)	
Александр Степанович Шаталов (К 85-летию со дня рождения)	
Игорь Владимирович Якимец (К 60-летию со дня рождения)	
Исаак Аронович Зборовский (К 70-летию со дня рождения)	
Зосим Григорьевич Каганов (Некролог)	

CONTENTS

A.K. Belotelov, Ways for Increasing the Reliability of Relay Protection and Automation Devices	2
I.V. Yakimets, A.V. Narovlyanskii and I.A. Ivanov, Detection of Fault Location on the Basis of Measuring Power Flows	5
V.F. Ivanov , L.A. Koshcheyev and V.A. Shlaifstein, Simulating Multiterminal DC Transmission Line as Part of a Complex Power System	10
G.N. Tsitsikyan and G.Z. Zaitsev, Estimation of Voltage Asymmetry in Three-Phase Electrical Supply Systems	13
M.S. Levin and T.B. Leshchinskaya, Analysis of Non-Symmetrical Operating Conditions of 0,38 kV Rural Networks	18
V.I. Popov, New Designs of Three-Phase Fractional-Slot Windings of Electrical Machines (Ending of I Part)	23
A.I. Inkin and A.A. Reikherdt, Layered Models and Electromagnetic Analysis of Three-Phase Cable Lines with a Conductive	28
O.Yu. Sidorov and F.N. Sarapulov, A Three-Dimensional Model of Electromagnetic Processes in an Electro-mechanical Energy Converter	35
A.S. Serebryakov, A Method of Measuring the Steady-State Value of Insulation Resistance	40
N.S. Kostyukov and A.A. Lukichev, Dielectric Properties of Ceramics on the Basis of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ in the Domain of Relaxation Polarization	44
DISCUSSIONS	
Yu.V. Smirnov, Optimization of a Magnetic Regime of Three-Phase Small Power Induction Motors	48
Ye.M. Lopukhina, G.A. Semenchukov and A.B. Zakharenko, Creating Economic Small Power Induction Motors	51
NOTES and LETTERS	
Yu.M. Pyatin , Deciphering Superkey for Engineering Designing Linear Electrical Circuits	54
CHRONICLE	
In Memory G.N. Petrov (to Mark the 100th Anniversary)	57
Aleksandr Stepanovich Shatalov (to Mark the 85th Anniversary)	61
Igor' Vladimirovich Yakimets (to Mark the 60th Anniversary)	62
Isaak Aronovich Zborovskii (to Mark the 70th Anniversary)	63
Zosim Grigor'yevich Kaganov (Notice Obituary)	64

Пути повышения надежности функционирования устройств релейной защиты и автоматики

БЕЛОТЕЛОВ А.К.

Рассматриваются проблемы обеспечения надежности функционирования релейной защиты и автоматики энергосистем. Возможности повышения надежности функционирования находящихся в эксплуатации аналоговых устройств РЗА исчерпаны. С внедрением микропроцессорных устройств РЗА появились большие возможности снижения трудозатрат на эксплуатацию и техническое обслуживание при сохранении достигнутого уровня надежности функционирования.

Ключевые слова: энергосистемы, релейная защита и автоматика, надежность, перспектива

Достаточно широко известно значение релейной защиты и автоматики (РЗА) в обеспечении надежной и бесперебойной работы энергетических систем.

Вопросам обеспечения надежности функционирования устройств РЗА уделяется большое внимание на всех этапах их разработки, изготовления и эксплуатации. Как показал многолетний опыт эксплуатации, повышения надежности функционирования устройств РЗА можно добиться только при сочетании высокой надежности элементной базы и устройств РЗА в целом с надлежащей системой эксплуатации и технического обслуживания.

В условиях эксплуатации одним из факторов, определяющих надежность функционирования устройств РЗА, является аппаратная надежность, которая определяется надежностью комплектующих элементов, соответствием фактических условий их работы техническим условиям (ТУ), технологией изготовления и системой контроля на всех этапах производства.

Надежность функционирования устройств и систем РЗА, т.е. их способность выполнять заданные функции в условиях эксплуатации обеспечивается наряду с аппаратной надежностью устройств, комплексом запроектированных технических решений, обеспечивающих без участия обслуживающего персонала диагностику устройства защиты в процессе эксплуатации и предотвращение неправильного действия устройства РЗА при его неисправности и комплексом плановых и внеплановых организационно-технических мероприятий, выполняемых обслуживающим персоналом в процессе технического обслуживания, т.е. системой эксплуатации и технического обслуживания.

Принятая в энергосистемах в настоящее время

The paper considers problems of ensuring the reliability of relay protection and automation devices of electrical power systems. The possibilities of increasing the reliability of analog relay protection and automation devices which are exploited are exhausted. With the application of microprocessor relay protection and automation devices greater opportunities are offered for reducing labour expenditures on exploitation and technical maintenance at the same achieved level of the reliability.

Key words: *electrical power system, relay protection and automation devices, reliability, prospects*

система эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА базируется на разработанных фирмой ОРГРЭС и введенных в действие решением Главтехуправления Минэнерго СССР в 1979 г. «Правила технического обслуживания устройств релейной защиты и электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110–750 кВ» [1] и аналогичных правилах для электрических сетей 0,4–35 кВ. Правилами регламентированы виды, объемы и периодичность технического обслуживания устройств РЗА. При разработке этого документа были учтены многолетний опыт эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА, а также работы отраслевых научно-исследовательских и проектных институтов по теории и практике обеспечения надежности функционирования релейной защиты и автоматики энергосистем.

Показатель правильной работы устройств РЗА, основную долю которых в энергосистемах России составляют аналоговые устройства на электромеханической и микроэлектронной базе, за последние годы стабилен и составляет 99,5%. Обеспечение такого высокого показателя функционирования устройств РЗА можно отнести за счет трех факторов:

оптимальная структура построения и методология применения устройств РЗА;

отработанная система эксплуатации и технического обслуживания устройств РЗА;

высокие трудозатраты персонала на эксплуатацию и техническое обслуживание.

Последний фактор влияет на распределение случаев неправильных срабатываний по условной виновности. Так за последние годы наблюдается тенденция увеличения случаев неправильной работы устройств РЗА из-за их неудовлетвори-

тельного состояния и ошибок персонала служб РЗА при техническом обслуживании, что, в свою очередь, при совершенной системе технического обслуживания указывает на моральной и физический износ устройств РЗА. Исходя из того положения, что на сегодняшний день от 30 до 50% находящихся в эксплуатации устройств РЗА физически и морально устарели, основные усилия персонала служб РЗА направлены на поддержание надежности функционирования этих устройств на должном уровне.

В то же время стабильность показателя правильной работы устройств РЗА можно объяснить тем, что все организационно-технические возможности повышения надежности функционирования устройств и систем РЗА исчерпаны.

Применение микропроцессорных устройств и систем РЗА открывает широкие возможности качественного повышение надежности их функционирования [2].

Из отечественных микропроцессорных устройств РЗА, серийно выпускаемых НТЦ «Механотроника» на базе предприятия АО «ЛЭМЗ» и «Электронмаш», весьма перспективными являются многофункциональный блок микропроцессорной релейной защиты присоединений 6–10 кВ типа БМРЗ, а также блок автоматики частотной разгрузки и частотного АПВ типа БМАЧР. В энергосистемах России широко применяются микропроцессорные устройства определения места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи и регистраторы аварийных событий.

К настоящему времени за рубежом накоплен положительный опыт эксплуатации микропроцессорных устройств различного назначения, показывающий, что микропроцессорные системы защиты, контроля и управления имеют равные или лучшие показатели надежности и значительно меньше трудозатраты на техобслуживание по сравнению с традиционными системами. Основными преимуществами микропроцессорных систем РЗА являются:

- улучшение традиционных характеристик и показателей, включающих улучшение характеристик и параметров срабатывания измерительных органов РЗА;

- уменьшение потребления по цепям переменного тока и напряжения и по цепям постоянного оперативного тока;

- повышение надежности функционирования и уменьшение трудозатрат на наладку и техническое обслуживание за счет высокой аппаратной надежности и применения автоматического контроля и диагностики; уменьшения габаритов по сравнению с микроэлектронными устройствами РЗА;

- получение новых функций и свойств, включая

функции цифрового осциллографа, регистрации событий, определение места повреждения (ОМП);

возможность использования микропроцессорных РЗА в качестве устройств нижнего уровня автоматизированных систем.

В России разработки микропроцессорных устройств РЗА особенно получили свое развитие с появлением микропроцессорных устройств и систем РЗА ведущих инофирм и созданием совместного предприятия АББ Реле-Чебоксары. В связи с этим при координации и техническом руководстве Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» разработаны и введены в действие в качестве отраслевого нормативного документа «Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем» [3]. При разработке этого документа исходили из следующих основных положений.

Вновь разрабатываемые в России микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики, как правило, должны быть основаны на хорошо зарекомендовавшей себя практике проектирования, принятой в России и странах СНГ. При этом должны быть максимально использованы возможности существенного улучшения эксплуатационных характеристик микропроцессорных устройств и систем РЗА, характерные для ныне выпускаемых аналогов ведущих фирм мира.

Безусловным требованием для вновь разрабатываемых защит является повышение технического и функционального уровня аппаратуры РЗА при резком снижении трудозатрат на ее эксплуатацию, в том числе за счет применения непрерывного диагностирования аппаратуры и программного обеспечения.

На нынешнем этапе разработки и внедрения отечественных систем РЗА необходимо ориентироваться на микропроцессорную элементную базу ведущих фирм мира, доступную на российском рынке. Только с помощью современной микропроцессорной техники можно создать конкурентоспособные системы РЗА, выпуск которых должен быть организован на предприятиях, имеющих высокую культуру и технологию производства соответствующего профиля, с привлечением ведущих научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций.

Так как новая аппаратура будет внедряться и на ныне действующих энергообъектах, то характеристики резервных микропроцессорных защит должны позволять согласование с существующими системами РЗА. В последующем, когда доля микропроцессорных систем РЗА увеличится, можно будет использовать цифровые каналы связи и возможности микропроцессоров для реализации новых алгоритмов резервных за-

щит. В связи с этим необходимо выполнять микропроцессорные устройства с возможностью изменения алгоритмов защит при использовании тех же аналоговых и дискретных входов.

При разработке микропроцессорных систем РЗА должна быть сохранена практика включения аналоговых входов для основных и резервных защит на разные трансформаторы тока и разные автоматические выключатели цепей напряжения.

Для обеспечения необходимого функционального резервирования функции основных и резервных защит должны, как правило, реализовываться на разных контроллерах, имеющих независимое питание по постоянному току и независимые выходные цепи, включая выходные реле.

Микропроцессорная элементная база дает возможность использовать в устройствах РЗА следующие основные способы обеспечения необходимой надежности:

резервирование аппаратных средств, функций защиты и программного обеспечения;

применение отказоустойчивых структур; непрерывная диагностика аппаратных средств и программного обеспечения;

хранение информации, констант и программ в энергонезависимой памяти.

Для достижения высоких показателей надежности в микропроцессорных РЗА, как правило, должна предусматриваться избыточность по защитным функциям (два или более устройства, две или более системы защит, функциональное резервирование, резервирование защит смежных элементов).

В целях обеспечения надежности функционирования релейной защиты и автоматики энергообъектов в целом принята следующая концепция применения микропроцессорных устройств РЗА [4].

Применение микропроцессорных систем РЗА, включающих в себя функции контроля и управления, интегрированных в АСУТП, целесообразно, в первую очередь, на новых энергообъектах.

При реконструкции и техническом перевооружении в рамках аналогичных работ, проводимых для всего энергообъекта, должна проводиться полная замена устройств РЗА и вторичной коммутации на микропроцессорные устройства и системы РЗА.

При применении микропроцессорных защит

на энергообъектах наравне с релейно-контактной аппаратурой особое внимание необходимо обращать на готовность этого объекта по обеспечению электромагнитной совместимости.

Немаловажную роль в обеспечении надежности функционирования устройств РЗА является анализ работы релейной защиты и автоматики на основе полученных данных о месте короткого замыкания, характере повреждения и параметрах аварийного режима. За последние годы получили широкое применение микропроцессорные фиксирующие приборы определения места повреждения (ОМП) и регистраторы аварийных событий с функциями ОМП. Поскольку эти приборы, помимо выполнения основных функций, позволяют косвенным путем оценивать правильность выбора уставок срабатывания релейной защиты, они относятся к устройствам РЗА, и, как правило, в микропроцессорных устройствах и системах РЗА энергообъектов 35 кВ и выше заложены функции ОМП и регистрации аварийных событий.

Дальнейшее развитие микропроцессорной базы и совершенствование алгоритмов РЗА создает хорошие предпосылки для создания и внедрения адаптивных защит, обеспечивающих достаточно высокие показатели надежности функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.35.617-89. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110—750 кВ. — М.: СПО ОРГРЭС, 1989.
2. Белотелов А.К. Современное состояние и перспективы развития релейной защиты и автоматики. — Тезисы докладов на научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем-98». — М., 1998.
3. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. — М.: СПО ОРГРЭС, 1997.
4. Белотелов А.К. Некоторые аспекты разработки и внедрения микропроцессорных устройств РЗА. Тезисы доклада на научно-технической конференции «Релейная защита и автоматическое управление электроэнергетическими системами» — Чебоксары, 1997.

[28.01.98]

Автор: Белотелов Алексей Константинович окончил Всесоюзный заочный политехнический институт в 1980 г. по специальности инженер-электрик. Главный специалист Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России».

Определение места повреждения в линиях электропередачи на основе измерения потоков мощности

ЯКИМЕЦ И.В., НАРОВЛЯНСКИЙ А.В., ИВАНОВ И.А.

Рассматривается метод определения места повреждения при авариях в высоковольтных линиях электропередачи, базирующийся на представлении узла несимметрии как генератора мощностей обратной и нулевой последовательностей. Разработаны алгоритмы и программы расчета расстояния до места аварии при различных видах короткого замыкания.

Ключевые слова: линия электропередачи, мощность прямой, обратной и нулевой последовательностей, круговые диаграммы мощности

Определение места повреждения (ОМП) на линиях электропередачи 110–750 кВ является одной из важнейших практических задач электроэнергетики. Число повреждений в рассматриваемых сетях составляет несколько тысяч в год и требует привлечения значительных материальных и людских ресурсов на поиск мест аварии и проведение ремонтно-восстановительных работ.

В настоящее наибольшее распространение получают микропроцессорные устройства, использующие дистанционные методы выявления места повреждения на основе определения симметричных составляющих аварийных токов и напряжений в узле измерения. Существующие устройства предназначены, в основном, для ОМП в сетях с глухозаземленными нейтралями при появлении поперечной несимметрии в виде двухфазного КЗ, двухфазного КЗ на землю и однофазного КЗ. При этом для каждого из перечисленных видов аварии устройство реализует собственный алгоритм по принципу дистанционной защиты с соответствующими допущениями, влияющими на погрешность измерения.

Далее рассматривается обобщенный способ определения места повреждения на основе оценки потоков мощности различных последовательностей, базирующийся на представлении узла несимметрии в виде генератора мощностей обратной и нулевой последовательностей.

Анализ распределения токов и напряжений вдоль линии электропередачи при аварии в энергосистеме показывает, что мощность обратной последовательности всегда направлена от места повреждения, где она имеет наибольшее абсолютное значение, к нулевым точкам системы в схеме обратной последовательности, а мощность нулевой последовательности направлена от места

A method for a detection of the fault location at emergencies in high-voltage transmission lines is considered. The method is based on a representation of the nonsymmetry node as a generator of negative-sequence and zero-sequence powers. Algorithms and programs for calculating a distance to the fault location at various kinds of faults have developed.

Key words: transmission line, positive-sequence power, negative-sequence power, zero-sequence power, power circular diagrams

повреждения, где она также имеет максимальное значение, к заземленным нейтралям в соответствии со схемой нулевой последовательности [1].

Если положительные направления для токов всех последовательностей выбрать одинаковым — к месту повреждения, то для повреждения будет соблюдаться равенство [1]

$$U_1 \overset{*}{I}_1 = -(U_2 \overset{*}{I}_2 + U_0 \overset{*}{I}_0), \quad (1)$$

где U_i , I_i ($i=0, 1, 2$) — комплексы напряжений и токов различных последовательностей в месте аварии (* над комплексом соответствует его сопряженному значению).

Знак минус (1) указывает на то, что при выбранных положительных направлениях токов мощности обратной и нулевой последовательностей направлены противоположно мощности прямой последовательности. Соотношение (1) между мощностями различных последовательностей в месте несимметрии в теории и практике использования симметричных составляющих [1–3] рассматривается как преобразование в месте аварии мощности прямой последовательности в мощность обратной и нулевой последовательностей направленных от точки несимметрии в энергосистему навстречу мощности прямой последовательности. Другими словами в месте аварии мощность прямой последовательности генераторов электрической энергии компенсирует мощности обратной и нулевой последовательностей, генерируемых несимметрией.

Равенство (1) удовлетворяется в месте повреждения, что подтверждается соотношениями между напряжениями и токами различных последовательностей при различных видах аварий [4]:

однофазное КЗ:

$$U_1 = -(U_2 + U_0); \quad I_1 = I_2 = I_0; \quad (2)$$

двафазное КЗ:

$$U_1 = U_2; \quad I_1 = -I_2; \quad (3)$$

двафазное КЗ на землю:

$$U_1 = U_2 = U_0; \quad I_1 = -(I_2 + I_0). \quad (4)$$

Для формирования алгоритма определения места повреждения рассмотрим линию с двусторонним питанием при КЗ фаз линии на землю (поперечная несимметрия). Этот случай может рассматриваться как универсальный, поскольку токи и напряжения содержат составляющие всех последовательностей. Считаем, что измерение проводится с одного конца высоковольтной линии с использованием микропроцессорной техники, позволяющей обрабатывать измеренные аварийные параметры на основе аналитических методов. На рис. 1 приведена схема

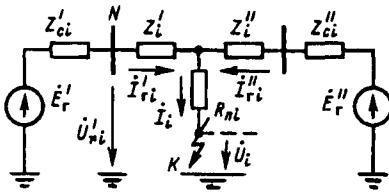


Рис. 1. Схема замещения электропередачи ($i=0, 1, 2$)

рассматриваемой электропередачи для токов и напряжений трех последовательностей. В схемах приняты следующие обозначения: E'_r, E''_r — комплексы ЭДС генераторов, входящие только в схему прямой последовательности; Z_{ci}, Z_{ci}' — комплексные сопротивления энергосистем, примыкающих к узлам, ограничивающим контролируемую линию; Z_i, Z_i'' — сопротивления линии до места аварии; R_{pi} — переходные сопротивления в месте аварии, рассматриваемые как симметричные элементы сети; в схеме нулевой последовательности $R_{p0}=3R_3$, где R_3 — сопротивление между фазой и землей при замыкании на землю.

Полагая, что известны напряжения и токи в узле измерения N — $U'_r, U'_r, U'_r, I'_r, I'_r, I'_r$ определим мощности прямой, обратной и нулевой последовательностей в месте аварии:

$$S_1 = U'_r I'_r = U'_r I'_r - I'_r Z'_1 I'_r - R_{p1} |I'_r|^2; \quad (5)$$

$$S_2 = U'_r I'_r = U'_r I'_r - I'_r Z'_2 I'_r - R_{p2} |I'_r|^2; \quad (6)$$

$$S_0 = U'_r I'_r = U'_r I'_r - I'_r Z'_0 I'_r - R_{p0} |I'_r|^2. \quad (7)$$

Выразим токи в месте аварии через контролируемые токи в узле измерения:

$$I_{ri} = C_{pi} I_i, \quad (8)$$

где C_{pi} — коэффициент токораспределения в точке КЗ, определяемый в виде

$$C_{pi} = \frac{Z_{\Sigma i}''}{Z_{\Sigma i}' + Z_{\Sigma i}''}. \quad (9)$$

Здесь $Z_{\Sigma i}' = L_{K3} Z_{iyd} + Z_{ci}$; $Z_{\Sigma i}'' = (L - L_{K3}) Z_{iyd} + Z_{ci}''$; L_{K3} — полная длина линии и расстояние от узла измерения до места аварии; Z_{iyd} — удельные сопротивления линии для различных последовательностей; в дальнейшем принято $Z_{1yd} = Z_{2yd}$.

Для схемы прямой последовательности соотношение (8) справедливо только для аварийной составляющей тока, т.е. для

$$I_{ab} = I_{r1} - I_h, \quad (10)$$

где I_h — ток предшествующего аварии симметричного нагрузочного режима.

Суммируя (5)–(7) и выделяя мнимую часть суммы — реактивную мощность, получаем в соответствии с (1) исходное уравнение для определения места аварии в виде

$$\text{Im} \left\{ \frac{U'_r (I'_r - I'_B)}{C'_{p1}} + \frac{U'_r I'_r}{C'_{p2}} + \frac{U'_r I'_r}{C'_{p0}} - \frac{|I'_r|^2 Z'_1}{C'_{p1}} + \frac{I'_r I'_h Z'_1}{C'_{p1}} - \frac{|I'_r|^2 Z'_2}{C'_{p2}} - \frac{|I'_r|^2 Z'_0}{C'_{p0}} \right\} = 0. \quad (11)$$

В уравнении (11) отсутствуют члены, содержащие неопределенный параметр R_{pi} , однако коэффициенты токораспределения, входящие в (11), зависят от расстояния L_{K3} и сопротивлений примыкающих систем Z_{ci} , в том числе и на удаленном конце линии.

На рис. 2 приведена диаграмма распределения потоков реактивных мощностей, качественно иллюстрирующая соотношение (11):

$$Q'_1 = \text{Im} \left\{ U'_r I'_{ab} / C'_{p1} \right\}; \quad Q'_2 = \text{Im} \left\{ U'_r I'_{r2} / C'_{p2} \right\};$$

$$Q'_0 = \text{Im} \left\{ U'_r I'_{r0} / C'_{p0} \right\}; \quad Q''_1 = \text{Im} \left\{ U'_r I''_{ab} / C'_{p1} \right\};$$

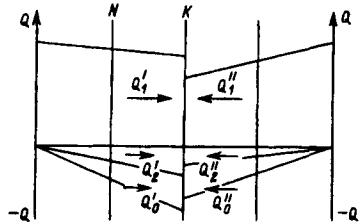


Рис. 2. Диаграмма потокораспределения реактивных мощностей различных последовательностей при КЗ на линии электропередачи

$$Q_1'' = \text{Im} \left\{ U_2 \frac{*}{I_{r2}} / C_{p2} \right\}; \quad Q_0'' = \text{Im} \left\{ U_0 \frac{*}{I_{r0}} / C_{p0} \right\}.$$

Характер распределения показывает, что в энергетическом отношении электропередача с двухсторонним питанием может быть представлена в виде двух потоков мощности от разных концов передачи, удовлетворяющих в точке КЗ балансу в виде

$$\text{Im} \left\{ \frac{U_1 \frac{*}{(I_{r1} - I_H)}}{C_{p1}} \right\} = -\text{Im} \left\{ \frac{U_2 \frac{*}{I_{r2}} + U_0 \frac{*}{I_{r0}}}{C_{p2}^* + C_{p0}^*} \right\}. \quad (12)$$

Для расчета расстояния до места КЗ по алгоритму (11) необходимо задавать удельные сопротивления линии Z_{iyd} и значение эквивалентных сопротивлений примыкающих к контролируемой линии энергосистем, которые в общем случае представляют собой комплексы. При условии приближенной оценки места аварии

$$C_{p1} = C_{p2} = C_{p0} = |C_p| \quad (13)$$

можно считать, что электропередача в энергетическом отношении распадается относительно точки КЗ на две независимые части [5].

Для известных видов аварии (однофазное, двухфазное, трехфазное КЗ) общий алгоритм (11) целесообразно представить частными алгоритмами, соответствующими граничным условиям несимметрии:

при однофазном КЗ

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_2 = I_0; \quad U_1 + U_2 + U_0 = 0; \\ \text{Im} \left\{ I_{r0}' e^{j\varphi_0} [U_{r1}' + U_{r2}' + U_{r0}' - L_{K3} Z_{1yd} \times \right. \\ &\times \left. (I_{r1}' + I_{r2}') - L_{K3} Z_{0yd} I_{r0}'] \right\} = 0; \\ \varphi_0 &= \arg C_{p0}'; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

при двухфазном КЗ, в том числе и на землю

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 &= 0; \quad I_0 = 0; \quad U_1 = U_2; \\ I_1 + I_2 + I_0 &= 0; \quad U_1 = U_2 = U_0; \\ \text{Im} \left\{ I_{r2}' e^{j\varphi_2} [U_{r2}' - U_{r1}' - L_{K3} Z_{1yd} (I_{r2}' - I_{r1}')] \right\} &= 0; \\ \varphi_2 &= \arg C_{p2}'; \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

при трехфазном КЗ

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= I_0 = 0; \quad U_2 = U_0 = 0; \\ \text{Im} \left\{ (I_{r1}' - I_H) e^{j\varphi_1} [U_{r1}' - L_{K3} Z_{1yd} I_{r1}'] \right\} &= 0; \\ \varphi_1 &= \arg C_{p1}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Точное отыскание корней в соотношениях (11), (14)–(16) требует информации об удельных

сопротивлениях и о комплексах сопротивлений примыкающих к контролируемой линии энергосистем. Если сопротивления различных последовательностей систем со стороны узла замера аварийных параметров могут быть определены по отношению напряжений и токов соответствующих последовательностей, то учет сопротивлений энергосистем противоположного конца передачи требует проведения дополнительных измерений. Это обстоятельство в определенной степени усложняет процесс измерения, однако отсутствие необходимости проведения расчетов в реальном времени аварийного режима делает такой подход к определению места повреждения вполне реальным.

Необходимо отметить, что отказ от учета сопротивлений примыкающих к линии энергосистем возможен при определенных соотношениях между аргументами коэффициентов токораспределения различных последовательностей. В частности, для большинства практических случаев можно принять $\varphi_1 = \varphi_2$. В то же время условие $\varphi_2 = \varphi_0 = 0$, используемое в технологических алгоритмах большого числа устройств ОМП, не позволяет получить точное значение замера на всей длине контролируемой линии (по данным исследований, проведенных в институте «Энергосетьпроект», односторонний замер с ошибкой менее 3% возможен только на расстоянии, меньшем 2/3 общей длины контролируемой линии). Главным образом это связано с тем, что углы φ_0 и φ_2 меняют свой знак по длине передачи, а их значения по концам линии могут сильно отличаться от нуля.

Возможность получения точных замеров на основе использования полной информации о параметрах электропередачи подтверждается результатами, изложенными в [6], где в качестве базового критерия используется значение реактивной мощности в переходном сопротивлении, выделенном из сети в месте КЗ. В отличие от [6] рассматриваемый способ оценки места повреждения базируется на универсальных соотношениях между потоками полных мощностей различных последовательностей в месте аварии при рассмотрении переходного сопротивления как элемента сети.

Соотношения (14)–(16) использованы в качестве базовых алгоритмов при создании программного комплекса определения мест повреждения высоковольтных линий электропередачи. Комплекс позволяет учитывать электромагнитную связь между близко расположенными линиями и наличие ответвлений от линии электропередачи. При определении места КЗ на линиях с ответвлением не требуется дополнительной корректировки алгоритмов (15), (16) при выполнении условий:

$$\left. \begin{array}{l} Z_{1\text{отв}} \gg Z'_{c1} + Z_{1\text{уд}} L_{\text{отв}}; \\ Z_{2\text{отв}} \gg Z'_{c2} + Z_{2\text{уд}} L_{\text{отв}}; \\ Z_{1\text{отв}} \gg Z''_{c1} + Z_{1\text{уд}} (L - L_{\text{отв}}); \\ Z_{2\text{отв}} \gg Z''_{c2} + Z_{2\text{уд}} (L - L_{\text{отв}}), \end{array} \right\} \quad (17)$$

где $L_{1\text{отв}}$, $Z_{2\text{отв}}$ — сопротивления соответствующих последовательностей ответвления; $L_{\text{отв}}$ — длина линии от места замера аварийных параметров до ответвления.

В алгоритме (14) сопротивление нулевой последовательности ответвления $L_{0\text{отв}}$ учитывается как элемент примыкающей системы в зависимости от места КЗ: до или после ответвления. При этом место ответвления рассматривается, соответственно, как конец или начало линии.

Работа программного комплекса построена на отыскании корней уравнений (14)–(16). При этом используется свойство функции $f(L_{K3}) = \text{Im} \sum S_i$ менять знак (при заданных значениях аварийных токов и напряжений) в момент перехода расстояния до места аварии через точку КЗ. Наличие такого свойства видно из анализа (11) для варианта ненагруженной линии с односторонним питанием, когда

$$Z_{ci}'' = \infty; \quad C_{pi}' = 1, \quad I_h = 0;$$

$$\text{Im} \sum_{i=0}^2 U'_{ri} I'_{ri} = \text{const} \quad (\text{задано в результате измерения});$$

$$\text{Im} \sum_{i=0}^2 |I'_{ri}|^2 Z_{iyd} L_{K3} \quad (\text{пропорционально расстоянию до места КЗ}).$$

Изменение знака функции $f(L_{K3})$ соответствует принятому в данном случае представлению о распределении потоков мощности, при котором место несимметрии является генератором мощностей обратной и нулевой последовательностей, направленных навстречу мощности прямой последовательности и равных ей в месте аварии.

При определенном соотношении аварийных параметров электропередачи решение уравнения (11) может иметь в пределах контролируемой линии два корня, один из которых соответствует действительному месту КЗ, а другой — фиктивному [7]. Выявление действительного корня проведено на основе построения круговых диаграмм для отдельных составляющих мощности в функции переменного параметра $K=L_{K3}/L$. Результаты построения приведены на рис. 3.I, где верхняя дуга 1 характеризует изменение реактивной мощности прямой последовательности, а нижняя дуга 2 — изменение суммарной мощности нулевой и обратной последовательностей при направлении мощности от места измерения

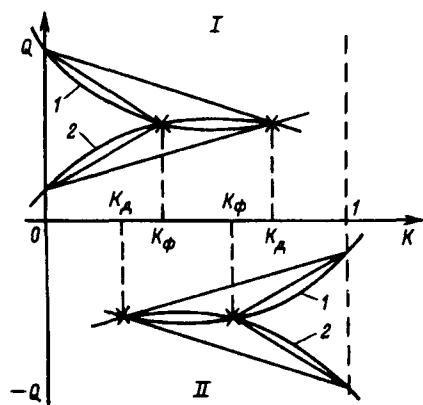


Рис. 3. Круговые диаграммы изменения реактивной мощности: I — направление мощности от узла измерения; II — к узлу измерения; 1 — реактивная мощность прямой последовательности; 2 — суммарная реактивная мощность обратной и нулевой последовательностей

вправо. Как видно из рис. 3 кривые имеют две точки пересечения, одна из которых соответствует реальному месту КЗ. Для выявления действительного корня проанализирована зависимость движения точек пересечения дуг от значения переходного сопротивления R_n , исходя из того, что реальное место КЗ от значения R_n не зависит, с уменьшением R_n увеличиваются угол между хордами окружностей и их радиусы, а при $R_n=0$, согласно [7], существует только один корень.

В соответствии с перечисленными условиями сделан вывод о расположении действительного корня при рассматриваемом направлении мощности со стороны конца контролируемой линии.

На рис. 3.II приведены кривые изменения составляющих реактивной мощности при направлении мощности от конца линии к месту измерения аварийных параметров.

При выходе места аварии слева или справа за границы контролируемой линии возможна неверная фиксация точки КЗ по фиктивному значению корня. В этом случае действие определителя мест повреждения должно быть согласовано с действием защит, реагирующих на аварии за пределами контролируемой линии.

На рис. 4 приведены кривые изменения функции $f(L_{K3}) = \text{Im} \sum S_i$ при наличии двух корней в решении уравнения (11) на интервале длины линии электропередачи с параметрами: $L = 115$ км; $L_{\text{отв}} = 70$ км; $E_r' = 172e^{j35^\circ}$ кВ; $E_r'' = 120,8$ кВ; $Z_{1\text{уд}} = Z_{2\text{уд}} = 0,026 + j 0,42$ Ом; $Z_{0\text{уд}} = 0,176 + j 1,47$ Ом; $Z'_{c1} = Z'_{c2} = j 80$ Ом; $Z''_{c1} = Z''_{c2} = Z''_{c0} = j 20$ Ом; $Z'_{c0} = j 30$ Ом; $Z_{0\text{отв}} = -j 20$ Ом. Кривые соответствуют режиму однофазного КЗ на расстоянии 110 км и 115 км

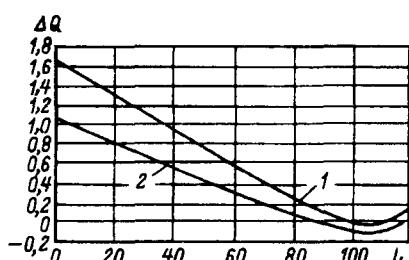


Рис. 4. Кривые изменения функции $f(L_{K3}) = \sum_{i=0}^2 S_i^2$: 1 — $L_{K3}=110$ км; 2 — $L_{K3}=115$ км

от узла измерения и иллюстрируют полученные выводы о нахождении истинного места аварии при определенных соотношениях параметров ($R_{n0}=50$ Ом).

Приведенные параметры электропередачи были использованы для проведения отладочных испытаний программного комплекса расчета мест повреждения при различных видах аварии. Работа комплекса не требует отыскания особой фазы. Результаты испытаний показали достаточно высокую точность расчета мест КЗ: ошибка меньше 1% расстояния от места КЗ до узла измерения.

Программный комплекс реализован в устройстве ОМП, разработанном на базе микропроцессора Intel 196 в институте «Энергосетьпроект»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. — М.: ГЭИ, 1957.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. — М.: Энергия, 1976.

3. Вагнер К.Ф., Эванс З.Д. Метод симметричных составляющих. — М.: ОНТИ, 1936.

4. Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

5. Якимец И.В., Иванов И.А. Определение места повреждения на основе измерения потоков мощности. Тезисы докладов НТК «Релейная защита и автоматическое управление электроэнергетическими системами». — Чебоксары, 1997.

6. Лямец Ю.А., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения мест повреждения ЛЭП. — Электричество, 1996, № 12.

7. Аржаников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыкании на землю. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

[29.10.98]

Авторы: Якимец Игорь Владимирович окончил факультет электрификации Московского института инженеров сельскохозяйственного производства в 1961 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические машины» в Московском энергетическом институте. Заведующий лабораторией института «Энергосетьпроект».

Наровлянский Александр Владимирович студент факультета электроники Московского государственного института электроники и математики.

Иванов Игорь Аристотельевич окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета в 1988 г. Старший научный сотрудник института «Энергосетьпроект».

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английском языках. Реклама в черно-белом изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 103012 Москва, К—12, Б. Черкасский пер., 2/10 или 101000 Москва, Главпочтamt, абонементный ящик № 648. Телефоны для справок: 924-24-80, 928-88-69.

Моделирование многоподстанционной передачи постоянного тока в составе сложной энергосистемы

ИВАНОВ В.Ф. , КОЩЕЕВ Л.А., ШЛАЙФШТЕЙН В.А.

Изложены результаты моделирования многоподстанционной передачи постоянного тока в составе сложной энергосистемы с использованием вычислительной программы EUROSTAG. Результаты были представлены и одобрены на собрании международного сообщества пользователей EUROSTAG в июне 1998 г.

Ключевые слова: энергосистема, электропередача постоянного тока, моделирование

Программа EUROSTAG наряду с большим объемом стандартных библиотечных элементов позволяет пользователям на основе языка макропрограммирования осуществлять моделирование любого дополнительного нестандартного элемента. Эта возможность программы была использована для создания моделей двухподстанционных и многоподстанционных передач постоянного тока (МППТ) в расчетах электромеханических переходных процессов энергосистем.

Точность отображения МППТ должна быть адекватна изучаемым процессам. При создании модели МППТ для проведения расчетов электромеханических процессов нет необходимости в учете высокочастотных составляющих, что позволяет учитывать преобразователи их внешними характеристиками и отказаться от учета емкостей в схемах замещения линий постоянного тока.

В то же время модель МППТ должна с достаточной степенью точности отображать действие систем регулирования преобразователей и систему управления от центрального регулятора, что в свою очередь призвано обеспечить энергетические характеристики преобразовательных подстанций в их взаимодействии с примыкающими энергосистемами переменного тока.

Необходимо отметить, что в настоящее время в мире практически функционирует лишь одна мощная МППТ, и нет достаточного объема статистических данных, полученных на реальных объектах и позволяющих сформулировать на их основе требования к моделированию МППТ. Поэтому в качестве исходных данных для определения требований использовались известные данные, относящиеся к двухподстанционным ППТ, результаты исследований на цифровых моделях, выполненных с использованием трехфазного «повентильного» представления преобразовательных подстанций (обычно с упрощенным представлением системы переменного тока), обеспечивающих в небольшом интервале отображение электромагнитного переходного процесса.

Results of simulating multiterminal DC transmission line as a part of a complex power system with the use of the EUROSTAG computer program are stated. Results were presented and approved at the meeting of the International EUROSTAG-Club in June 1998.

Ключевые слова: power system, DC transmission line, simulation

Кроме того, использовались результаты исследования на уникальной физической модели сложной энергосистемы (б. СССР) с четырехподстанционной передачей постоянного тока длиной более 3500 км (Сибирь—Казахстан—Урал—Центр).

Модели МППТ структурно были сформированы в виде совокупности следующих подсистем:

- силовые схемы преобразовательных подстанций;

- сеть постоянного тока;
- локальные системы регулирования;
- центральный регулятор;
- блоки имитационного моделирования.

При этом полуцели МППТ моделировались как две независимые униполярные передачи.

Разработанные на базе EUROSTAG модели ППТ и МППТ включают основные системы регулирования: регуляторы тока и мощности преобразователей, регуляторы угла погасания инверторов, центральный регулятор мощности для МППТ.

Известны различные реализации систем регулирования ППТ, однако идеологически они в значительной степени идентичны. В процессе разработки моделей МППТ были реализованы один из вариантов системы регулирования фирмы ABB и упрощенный для исследования электромеханических процессов вариант российской разработки.

Многоподстанционная ППТ является многомерным объектом, в котором реакция на то или иное первичное возмущение (например, выход из строя преобразовательного блока или участка линии) неоднозначна. Эта реакция определяется внешними управляющими сигналами от системы противоаварийной автоматики энергообъединения. При проведении данной разработки выбор управляющих воздействий на изменение нагрузки преобразователей в послеаварийном режиме осуществлялся пользователем.

Следствием принимаемых в модели упрощений, а также однолинейного принципа отобра-

жения сети переменного тока является невозможность точного отображения процесса опрокидывания инвертора и необходимость использования имитационного моделирования этого процесса.

Процесс опрокидывания имитируется, начиная с заданного уровня внезапного снижения напряжения на шинах переменного тока инвертора, при этом значения углов зажигания инвертора α снижаются до нижнего ограничения, что приводит к снижению до нуля его выпрямленного напряжения. После восстановления напряжения на стороне переменного тока до заданного уровня производится плавный переход на нормальное функционирование системы регулирования инвертора. Вся эта логика реализована с помощью специального макроблока «опрокидывание».

Одним из основных вопросов, рассмотренных с использованием модели двухподстанционной ППТ, было определение зоны допустимых значений отношения короткого замыкания (ОКЗ) передачи постоянного тока со стороны инвертора. В качестве примеров влияния значения ОКЗ на протекание переходных процессов на рис. 1 приведены результаты расчетов проходящего КЗ вблизи шин инвертора на стороне переменного тока при значениях ОКЗ = 2,5 и 1,25. Очевидно,

значение ОКЗ, принятое в последнем случае, неприемлемо, что согласуется со всеми известными представлениями.

Модель трехподстанционной ППТ представляет собой простейший вариант модели МППТ, для управления режимом которой уже требуется централизованная координация уставок тока преобразовательных подстанций, в связи с чем она явила основой отработки этой координации. На рис. 2 приведен процесс управления режимом трехподстанционной ППТ, который приводит к перераспределению мощности между инверторами. На этой же модели были рассмотрены переходные процессы, вызванные КЗ в системе переменного тока и управляющими воздействиями от системы противоаварийной автоматики на изменение мощности преобразовательных подстанций.

На примере этой же модели было реализовано упрощение, представляющееся приемлемым для исследования электромеханических переходных процессов. Суть этого упрощения сводится к замене группы локальных систем регулирования выпрямительных и инверторных подстанций единым по структуре, построенным по классическому принципу регулятором тока — угла α (д) преобразователя. Этот регулятор обеспечивает на выходе суммирование некоторого ми-

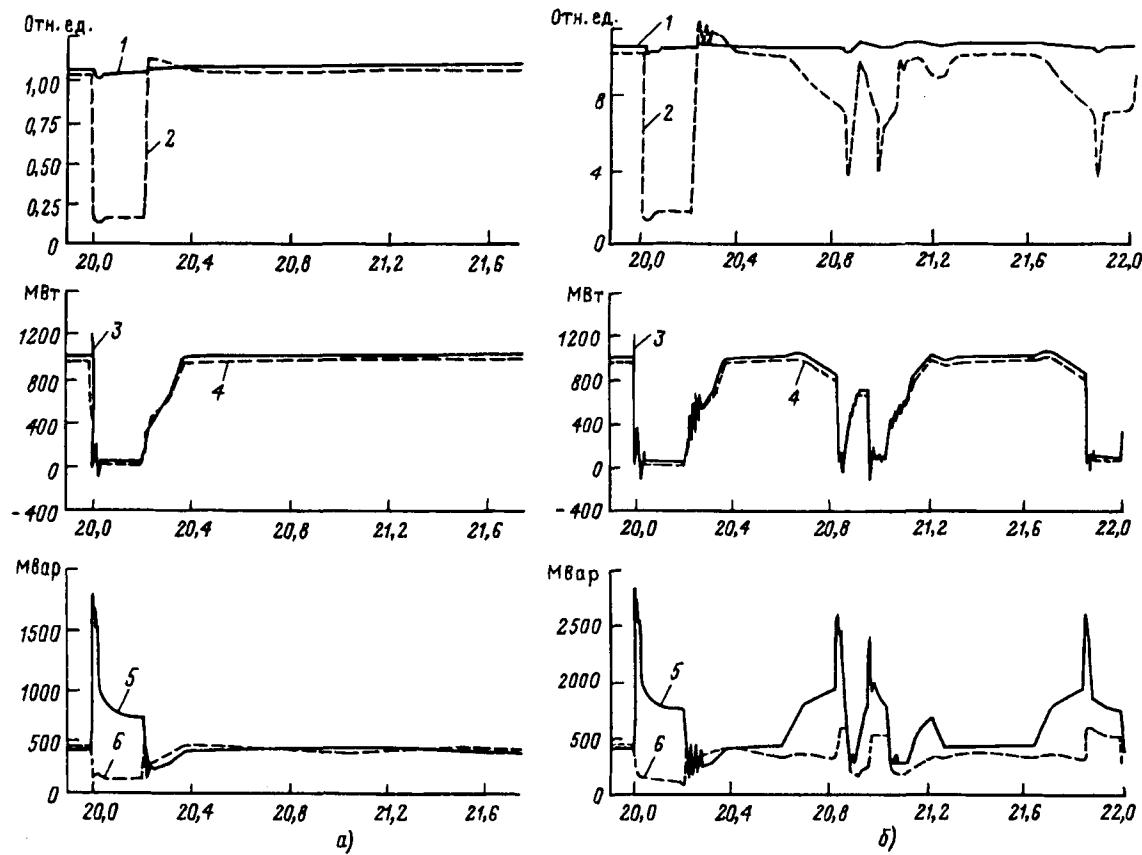


Рис. 1. Переходные процессы при КЗ на стороне переменного тока инвертора: а — ОКЗ = 2,5; б — ОКЗ = 1,25; 1, 2 — напряжение в узле примыкания выпрямителя и инвертора соответственно; 3, 4 — активная мощность выпрямителя и инвертора соответственно; 5, 6 — реактивная мощность выпрямителя и инвертора соответственно

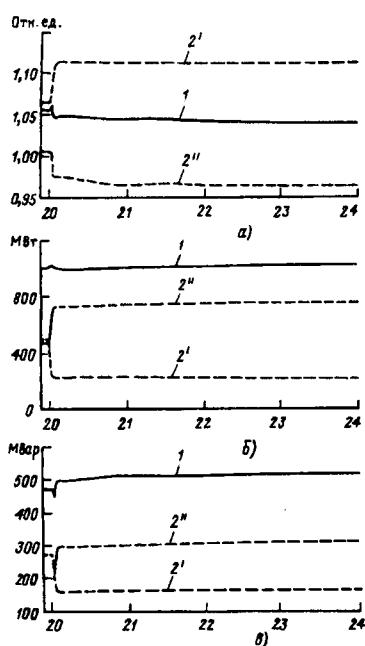


Рис. 2. Процесс перераспределения мощности между инверторами: а — напряжение в узле примыкания выпрямителя (1), инвертора 1 (2') и инвертора 2 (2''); б — активная мощность выпрямителя (1), инвертора 1 (2') и инвертора 2 (2''); в — реактивная мощность выпрямителя (1), инвертора 1 (2') и инвертора 2 (2'')

нимального угла $\alpha(\delta)$, равного $2-5^\circ$ для выпрямителя и $15-20^\circ$ для инвертора, с приращением этого угла, определяемым действием регулятора тока. Регулятор тока выполнен с тремя каналами: пропорциональным, инерционным и интегральным. Переход к такой системе моделирования позволяет унифицировать и макроблоки, отображающие силовую часть преобразовательных подстанций, работающих в выпрямительном и инверторном режимах.

Благодаря этим упрощениям достаточно легко удается создать модель МППТ с большим числом терминалов.

Расчетная схема энергосистемы с шестиподстанционной ППТ приведена на рис. 3. В этой схеме часть переменного тока сформирована из двух несинхронно работающих объединений. В основу моделирования положены апробированные принципы упрощенного представления результатов. Увеличение числа подстанций не создает каких-либо принципиальных особенностей в поведении преобразователей при рассматриваемых возмущениях. На рис. 4 приведен процесс, вызванный близким к шинам одного из инверторов КЗ.

Выполненные расчеты подтвердили работоспособность разработанной модели шестиподстанционной ППТ, основанной на упрощении представления систем регулирования и имитационном представлении процесса опрокидывания и втягивания инвертора при снижении напряжения на шинах переменного тока.

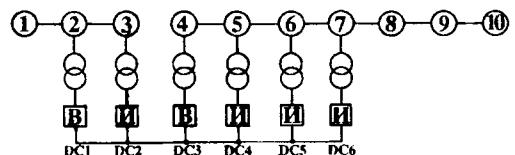


Рис. 3. Расчетная схема энергосистемы с шестиподстанционной ППТ

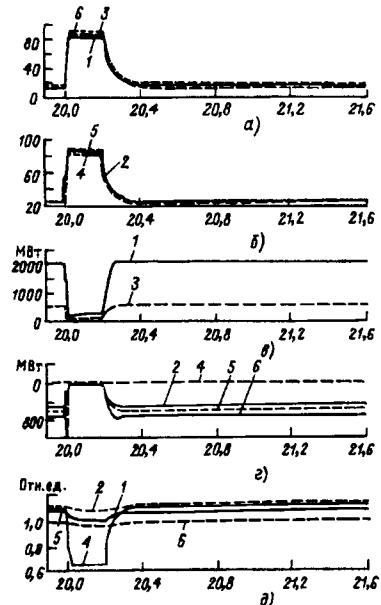


Рис. 4. Процессы при близком КЗ на стороне переменного тока в зоне примыкания инвертора DC4: а, б — угол регулирования: 1, 3 — выпрямителей DC1 и DC3; 2, 4-6 — инверторов DC2, DC4-DC6; в, г — активная мощность: 1, 3 — выпрямителей DC1 и DC3; 2, 4-6 — инверторов DC2, DC4-DC6; д — напряжение в узле примыкания выпрямителя DC1 (1) и инверторов DC2, DC4-DC6 (2, 4-6)

Таким образом, можно считать подготовленной модель многоподстанционной ППТ, которая может быть использована в исследованиях сколь угодно сложной энергосистемы переменного тока.

[21.09.98]

Авторы: Иванов Виктор Федорович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) в 1969 г. Работал старшим научным сотрудником Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ). Скоропостижно скончался в 1998 г.

Кощеев Лев Ананьевич окончил электроэнергетический факультет Ленинградского электротехнического института в 1955 г. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию «Методические основы создания централизованной системы противоаварийного управления ЕЭС СССР и исследование ее эффективности». Заместитель генерального директора НИИПТ.

Шлайфштейн Владимир Аронович окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1961 г. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию «Особенности работы электропередачи постоянного тока при значительных реактивностях ее связи с энергосистемами». Ведущий научный сотрудник НИИПТ.

Об оценке несимметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения

ЦИЦИКЯН Г.Н., ЗАЙЦЕВ Г.З.

На основании проведенного анализа существующих оценок несимметрии напряжений предложен вариант разложения системы векторов напряжений с сохранением одного и того же числового множителя при переходе от прямого к обратному преобразованию. Указаны преимущества предлагаемого разложения на симметричные составляющие. На основе геометрических построений получен дополнительный коэффициент несимметрии. Сформулированы рекомендации по строгой и приближенной оценке несимметрии напряжений в трехфазных системах.

Ключевые слова: трехфазные системы, качество электрической энергии, линейные преобразования, симметричные составляющие, коэффициент несимметрии

Несимметрия в системах электроснабжения характеризует качество электрической энергии и нормируется в настоящее время с помощью коэффициентов по обратной и нулевой последовательностям напряжений в результате разложения системы напряжений по методу симметричных составляющих [1].

Действующий стандарт ГОСТ 13109—87 [2] относит составляющие напряжений к номинальному напряжению. Однако в проекте новой редакции ГОСТ 13109 коэффициенты по обратной k_{2U} и нулевой k_{0U} последовательностям получаются из отношения соответствующих составляющих напряжений к составляющей прямой последовательности, в первом случае — для междудифазной системы напряжений.

Еще в [1] было записано, что «отношение амплитуды обратной последовательности к амплитуде прямой последовательности обычно называют коэффициентом несимметрии».

Приведенные в [3, 4] формулы для составляющих обратной и нулевой последовательностей внешне отличаются от формул [2], но выделяются сравнительной простотой. В ГОСТ 13109—87 имеются рекомендации и по приближенной оценке несимметрии. Тем не менее остается неясным, следует ли пользоваться так называемым коэффициентом небаланса в качестве еще одного показателя несимметрии.

Учитывая важное значение, придаваемое обеспечению качества электрической энергии, и имеющие место расхождения при оценке несимметрии, иногда внешне, а иногда значительные, представляется целесообразным остановиться на поставленном вопросе.

Прежде всего отметим, что метод симмет-

Using the results of an analysis of existing estimates of voltage asymmetry, the authors propose a new method of decomposition of a system of voltage vectors with retaining the same numerical factor when changing from direct to inverse transformation. Advantages of the proposed decomposition into symmetrical components are demonstrated. Using geometrical constructions, an additional coefficient of skewness is obtained. Recommendations regarding precise and approximate estimation of voltage asymmetry in three-phase systems are formulated.

Key words: three-phase systems, electric power quality, linear transformations, symmetrical components, coefficient of skewness

ричных составляющих является, по существу, определенным линейным преобразованием, вводимым с помощью матрицы преобразования [5—7]* в виде

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix} = T_s \begin{vmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — система фазных векторов, образующая вектор-столбец; $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ — вектор-столбец из симметричных составляющих нулевой, прямой и обратной последовательностей; матрица

$$T_s = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Здесь s — индекс, отличающий эту матрицу от матриц других преобразований; $a = \exp(i2\pi/3)$.

Преобразование (1) может быть записано для любой совокупности из трех векторов. В принципе, линейное преобразование векторов может быть и иным с матрицей, отличной от (2).

В связи с возможностью выбора того или иного преобразования отметим, что полная мощность трехфазной системы может быть определена как произведение

$$\dot{S} = \left\| \bar{I}_A \bar{I}_B \bar{I}_C \right\| \begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix} = \left\| \dot{U}_A \dot{U}_B \dot{U}_C \right\| \begin{vmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{vmatrix} \quad (3)$$

(черта сверху обозначает комплексное сопряжение).

Воспользуемся линейным преобразованием с

* В [7] — в общем случае для многофазных систем.

произвольной матрицей \mathbf{T} :

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix} = \mathbf{T} \begin{vmatrix} \dot{U}_{1T} \\ \dot{U}_{2T} \\ \dot{U}_{3T} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

аналогично для токов \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C .

В (4) элементы вектор-столбца снабжены индексом «T» с тем, чтобы подчеркнуть их зависимость от выбора матрицы \mathbf{T} , тогда

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \left\| \bar{I}_{1T} \bar{I}_{2T} \bar{I}_{3T} \right\| \bar{\mathbf{T}}' \mathbf{T} \begin{vmatrix} \dot{U}_{1T} \\ \dot{U}_{2T} \\ \dot{U}_{3T} \end{vmatrix} = \\ &= \left\| \dot{U}_{1T} \dot{U}_{2T} \dot{U}_{3T} \right\| \mathbf{T}' \bar{\mathbf{T}} \begin{vmatrix} \bar{I}_{1T} \\ \bar{I}_{2T} \\ \bar{I}_{3T} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Наиболее простой вид для полной мощности получается, когда

$$\bar{\mathbf{T}}' \mathbf{T} = 1, \quad (6)$$

где справа — единичная матрица.

Из (6) также следует, что

$$\mathbf{T}' \bar{\mathbf{T}} = 1. \quad (7)$$

При выполнении (6) находим:

$$\dot{S} = \dot{U}_{1T} \bar{I}_{1T} + \dot{U}_{2T} \bar{I}_{2T} + \dot{U}_{3T} \bar{I}_{3T}. \quad (8)$$

С другой стороны, условие (6) определяет матрицу \mathbf{T} как унитарную [8].

Унитарной является матрица

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{T}_s, \quad (9)$$

и, поскольку матрица \mathbf{T}_s — симметричная, то

$$\frac{1}{3} \mathbf{T}_s \bar{\mathbf{T}}_s = 1. \quad (10)$$

Отсюда получаем известное выражение для полной мощности через симметричные составляющие:

$$\dot{S} = 3(\dot{U}_0 \bar{I}_0 + \dot{U}_1 \bar{I}_1 + \dot{U}_2 \bar{I}_2). \quad (11)$$

Аналогично мощность пульсаций \dot{N} определяется как

$$\begin{aligned} \dot{N} &= \left\| \dot{U}_A \dot{U}_B \dot{U}_C \right\| \begin{vmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{vmatrix} = \left\| \dot{U}_0 \dot{U}_1 \dot{U}_2 \right\| \times \\ &\times \mathbf{T}_s' \mathbf{T}_s \begin{vmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix} = \left\| \dot{U}_0 \dot{U}_1 \dot{U}_2 \right\| \begin{vmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{vmatrix} = \end{aligned}$$

$$= 3(U_0 \bar{I}_0 + U_1 \bar{I}_1 + U_2 \bar{I}_2). \quad (12)$$

Можно не сомневаться в том, что вряд ли найдется еще линейное преобразование, обладающее всеми преимуществами и наглядностью в интерпретации, каким характеризуется преобразование с матрицей (2). Для иллюстрации в приложении приведен пример унитарной матрицы, отличной от (2).

Переходя к системе междуфазных напряжений, запишем их через фазные:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{AB} \\ \dot{U}_{BC} \\ \dot{U}_{CA} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_B - \dot{U}_C \\ \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Поскольку междуфазные напряжения не содержат нулевой составляющей, то, представляя обе части через симметричные составляющие, снабженные для междуфазных векторов индексом «m», получим:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} = (1-a^2) \dot{U}_1 + (1-a) \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{CA} = a \dot{U}_{1m} + a^2 \dot{U}_{2m} = (a-1) \dot{U}_1 + (a^2-1) \dot{U}_2. \end{cases} \quad (14)$$

Выражение для \dot{U}_{BC} может быть получено из (14).

Умножая первое уравнение на a и вычитая из него второе, получим:

$$\dot{U}_2 = \frac{a-1}{3a} \dot{U}_{2m} = \frac{e^{j\pi/6}}{\sqrt{3}} \dot{U}_{2m}. \quad (15)$$

Умножая первое из уравнений (14) на a^2 и вычитая из него второе, имеем:

$$\dot{U}_1 = \frac{e^{-j\pi/6}}{\sqrt{3}} \dot{U}_{1m}. \quad (16)$$

(В [4] в аналогичных выражениях (12) и (11) прослеживается опечатка: вместо умножения на 3 должно быть деление на 3, но в комментариях к этим выражениям заключение вполне правильное.)

Таким образом, соотношения между составляющими прямой и обратной последовательностей систем фазных и междуфазных напряжений по модулю такие же, как между значениями фазных и междуфазных напряжений при условиях симметрии. Кроме того, коэффициент несимметрии по обратной последовательности не меняется при переходе от фазной к междуфазной системе напряжений.

Теперь, исходя из (9) и (10), уместно заметить, что матрицу (2) в преобразовании (1) целесообразно, на наш взгляд, дополнить числовым коэффициентом $1/\sqrt{3}$. Тогда взаимно однозначное прямое и обратное преобразование характеризовалось бы одним и тем же коэффи-

циентом $1/\sqrt{3}$, а не 1 и $1/3$, как при общепринятом выборе, а в формулах для полной мощности (11) и мощности пульсаций (12) не было бы числового коэффициента 3.

Прямое преобразование имеет в этом случае вид

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{T}_s \begin{vmatrix} \dot{U}_{s0} \\ \dot{U}_{s1} \\ \dot{U}_{s2} \end{vmatrix}, \quad (17)$$

причем по сравнению с (1) здесь добавлен индекс s для симметричных составляющих для отличия от составляющих в (1).

Очевидно, что

$$\dot{U}_{s0, s1, s2} = \sqrt{3} \dot{U}_{0, 1, 2} \quad (18)$$

и отношение \dot{U}_{s2} к \dot{U}_{s1} такое же, как \dot{U}_2 к \dot{U}_1 , \dot{U}_{2M} к \dot{U}_{1M} , как \dot{U}_{s2M} к \dot{U}_{s1M} . Если для междуфазных напряжений воспользоваться аналогичным преобразованием, то

$$\dot{U}_{s1M, s2M} = \sqrt{3} \dot{U}_{1M, 2M}. \quad (19)$$

Как уже было отмечено в самом начале, коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательностям должны определяться отношениями:

$$k_{2U} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_{2M}}{\dot{U}_{1M}} = \frac{\dot{U}_{s2}}{\dot{U}_{s1}} = \frac{\dot{U}_{s2M}}{\dot{U}_{s1M}}, \quad (20)$$

$$k_{0U} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_{s0}}{\dot{U}_{s1}} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_0}{\dot{U}_{1M}} = \frac{3 \dot{U}_0}{\dot{U}_{s1M}}, \quad (21)$$

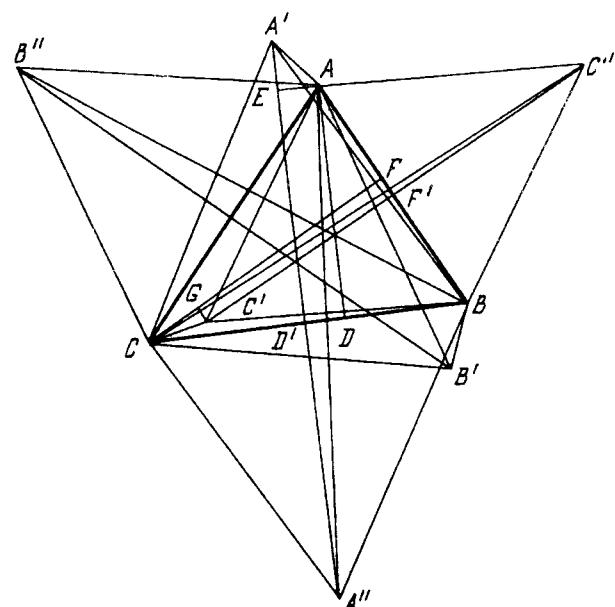
причем прямое преобразование для фазных векторов с индексом « s » дается выражением (17), а обратное — умножением (17) слева на $1/\sqrt{3} \bar{T}_s$:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{s0} \\ \dot{U}_{s1} \\ \dot{U}_{s2} \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{T}_s \begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix}. \quad (22)$$

Вполне естественно, что для оценки несимметрии по k_{2U} и k_{0U} согласно (20) и (21) основное внимание уделяется вычислению составляющих напряжений по известным или измеренным значениям фазных и междуфазных напряжений.

Именно расхождения в расчетных формулах согласно рекомендациям [2—4, 7, 9—10] обусловили интерес в статье к графическому нахождению (построению) составляющих в методе симметричных составляющих.

Графические построения описаны еще в [1, 11], но порознь для прямой и обратной со-



Треугольник междуфазных векторов, на сторонах которого построены по два равносторонних треугольника с вершинами в точках A' , A'' , C' , C'' , B' , B'' ; точки D' , D и E , F , F' и G — основания высот, опущенных из A' и A , C и C'

ставляющих, поэтому рассмотрим эти построения совместно на одном рисунке.

На рисунке изображен треугольник ABC , соответствующий в некотором масштабе треугольнику междуфазных напряжений. На каждой стороне треугольника, как на основаниях, в двух возможных вариантах построены равносторонние треугольники с вершинами в точках A' , A'' , B' , B'' и C' , C'' в соответствии с обозначением вершин треугольника ABC , которым эти стороны противостоят.

Из построений на рисунке вытекает:

$$A'D' = \frac{\sqrt{3}}{2} BC, \quad DD' = \frac{(CA)^2 - (AB)^2}{2BC} = CA \cos \alpha - 1/2 BC,$$

где угол α — угол при вершине C , и

$$AD = \sqrt{(CA)^2 - \left[\frac{(CA)^2 - (AB)^2}{2BC} + \frac{BC}{2} \right]^2};$$

$$AA', A''A =$$

$$= \sqrt{\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} BC \mp \sqrt{(CA)^2 - \left[\frac{(CA)^2 - (AB)^2}{2BC} + \frac{BC}{2} \right]^2} \right\}^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \sqrt{\left[\frac{(CA)^2 - (AB)^2}{2BC} \right]^2},$$

где минус должен быть для AA' , плюс — для $A''A$.

Легко доказать, что $AA' = BB' = CC'$ и $A''A = B''B = C''C$. Соответственно для BB' , $B''B$, CC' , $C''C$:

$$\begin{aligned} BB', B''B = & \sqrt{\left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} CA \mp \sqrt{(AB)^2 - \left[\frac{CA}{2} + \frac{(AB)^2 - (BC)^2}{2CA} \right]^2} \right\}^2 +} \\ & \rightarrow \frac{\rightarrow}{+ \left[\frac{(BC)^2 - (AB)^2}{2CA} \right]^2}, \\ CC', C''C = & \sqrt{\left\{ \sqrt{(BC)^2 - \left[\frac{AB}{2} + \frac{(BC)^2 - (CA)^2}{2AB} \right]^2} \mp \frac{\sqrt{3}}{2} AB \right\}^2 +} \\ & \rightarrow \frac{\rightarrow}{+ \left[\frac{(BC)^2 - (CA)^2}{2AB} \right]^2}. \end{aligned}$$

Из рисунка видно, что удвоенная высота каждого из трех равносторонних треугольников является диагональю параллелограммов со сторонами AA' и $A'A$, BB' и $B''B$, CC' и $C''C$ соответственно. Поэтому геометрическая сумма векторов $\vec{AA'}$ и $\vec{A'A}$, $\vec{BB'}$ и $\vec{B''B}$, $\vec{CC'}$ и $\vec{C''C}$ по модулю в 3 раза больше каждой стороны ABC соответственно. Отрезки AA' и $A'A$ можно рассматривать в принятом масштабе как значение составляющих U_{s1m} и U_{s2m} , если ΔACB составлен из междуфазных напряжений. Действительно, из выражений для CC' и $C''C$, например, имеем:

$$\begin{aligned} U_{s2m, s1m} = & \sqrt{\left\{ \sqrt{U_{BC}^2 - \left[\frac{U_{AB}}{2} + \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2U_{AB}} \right]^2} \mp \frac{\sqrt{3}}{2} U_{AB} \right\}^2 +} \\ & \rightarrow \frac{\rightarrow}{+ \left[\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{2U_{AB}} \right]^2}, \quad (23) \end{aligned}$$

причем в формуле (23) отсутствует числовой множитель $1/\sqrt{3}$, который имеется в формулах (12) и (2) из [2] для составляющих U_{2m} и U_{1m} . Из (23)

$$\begin{aligned} U_{s2m, s1m} = & \sqrt{\frac{1}{2}(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) +} \\ & \rightarrow \frac{\rightarrow}{+ \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{4U_{AB}^2 U_{BC}^2 - (U_{BC}^2 - U_{CA}^2 + U_{AB}^2)^2}}. \quad (24) \end{aligned}$$

Выражения (24) совпадают (с учетом оговорки по множителю $1/\sqrt{3}$) с выражениями, данными в [3].

Помимо оценки несимметрии по коэффициентам (20) и (21) можно рекомендовать следующий вспомогательный показатель, продиктованный построениями рисунка. Несимметрию может характеризовать любой из отрезков AA' , BB' и CC' , отнесенный к среднему арифметическому всех сторон треугольника, т.е.

$$k_{d2U} = \frac{U_{s2m}}{\frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})} = \frac{\sqrt{3} U_{2m}}{\frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})}. \quad (25)$$

Знаменатель в (25) весьма близок к U_{1m} ,

а числитель — к $(U_{m\max} - U_{m\min})$ (см. рисунок), поэтому

$$k_{d2U} \approx \frac{\sqrt{3} U_{2m}}{U_{1m}} \approx \frac{U_{m\max} - U_{m\min}}{\frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})}, \quad (26)$$

где $U_{m\max}$ и $U_{m\min}$ — максимальное и минимальное значения из междуфазных напряжений.

Из (26) следует, что значение k_{d2U} практически в $\sqrt{3}$ раз больше значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности и может служить для простейшей оценки степени несимметрии.

Отметим, что к формулам (23) и (24) с поправкой на множитель $1/\sqrt{3}$ могут быть приведены формулы П6.1 [9].

Степень приближения U_{1m} к среднему арифметическому из сторон треугольника междуфазных напряжений зависит от превышений значений углов поворота междуфазных векторов (один относительно другого) над значениями $2\pi/3$ и $4\pi/3$.

Пусть

$$\begin{aligned} \dot{U}_{CA} &= U_{CA}; \quad \dot{U}_{BC} = U_{BC} e^{j(\frac{2\pi}{3} + \varphi_2)}; \\ \dot{U}_{AB} &= U_{AB} e^{j(4\pi/3 + \varphi_1)}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\dot{U}_{1m} = \frac{1}{3} e^{j4\pi/3} (U_{AB} e^{j\varphi_1} + U_{BC} e^{j\varphi_2} + U_{CA})$$

и, если углы превышений достаточно малы, то

$$U_{1m} \approx \frac{1}{3} (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}).$$

Степень приближения достаточно высока (порядка 0,1% по условиям ГОСТ 13109—87).

В завершение остановимся на коэффициенте несимметрии по нулевой последовательности. Если считать треугольник междуфазных напряжений строго равносторонним, то из элементарных построений внутри треугольника для U_0 можно получить:

$$U_0 = \frac{1}{3} \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - U_m^2} = \frac{U_{s0}}{\sqrt{3}}, \quad (27)$$

где U_m — междуфазное напряжение.

В противном случае, как показано в [4], U_m^2 должно быть заменено на среднее арифметическое квадратов междуфазных напряжений, т.е.

$$\begin{aligned} U_0 = & \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - 1/3(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)} = \\ & \cdot \quad = \frac{U_{s0}}{\sqrt{3}}. \quad (28) \end{aligned}$$

Эта формула получена вполне строго и выгодно отличается от формулы (16) из [2] своей простотой.

Пример. Заданы (в отн. ед.) $U_{BC}=1,0$; $U_{CA}=0,95$; $U_{AB}=0,82$. Рассчитаем k_{2U} . Для U_{s2m} и U_{s1m} согласно формуле (23) имеем (в отн. ед.): 0,1827 и 1,5942 соответственно. Коэффициент несимметрии k_{2U} равен 0,1146 или 11,46%.

Согласно (26) имеем:

$$k_{2U} = \frac{1}{\sqrt{3}} k_{d2U}.$$

Подставляя числовое значение k_{d2U} :

$$k_{d2U} = \frac{1,0-0,82}{\frac{1}{3}(1,0+0,95+0,82)} = 0,1949,$$

получим: $k_{2U}=0,1125$ или 11,25%.

Здесь, как и ожидалось, разница между точным и приближенным значением превосходит 0,1%.

Приложение. Приведем пример унитарной матрицы, отличной от (2). Рассмотрим матрицу:

$$T = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j\xi) \begin{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(jz) & \mp 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(jz) \\ \mp 1 & 0 & \pm 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(jz) & \pm 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(jz) \end{vmatrix}. \quad (\text{П-1})$$

Проверкой можно установить, что результат умножения данной матрицы на сопряженную есть единичная матрица.

Запишем обратное преобразование в развернутом виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1T} &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\xi} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} e^{-jz} (\dot{U}_A + \dot{U}_C) \mp \dot{U}_B \right]; \\ \dot{U}_{2T} &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\xi} (\mp \dot{U}_A \pm \dot{U}_C) = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\xi} \dot{U}_{CA}; \\ \dot{U}_{3T} &= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\xi} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} e^{-jz} (\dot{U}_A + \dot{U}_C) \pm \dot{U}_B \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П-2})$$

Как видим, при перемене знака \dot{U}_{3T} переходит в \dot{U}_{1T} и наоборот, а для \dot{U}_{2T} меняется только знак, что для дальнейшего значения не имеет.

Можно выразить $\dot{U}_{1T,3T}$ с помощью U_0 :

$$\dot{U}_{1T,3T} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\xi} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} e^{-jz} 3\dot{U}_0 - \dot{U}_B \left(\frac{1}{\sqrt{2}} e^{-jz} \mp 1 \right) \right].$$

Полагая $\xi=-z$, найдем

$$\dot{U}_{1T,3T} = \frac{3}{2} \dot{U}_0 - \dot{U}_B \left(\frac{1}{2} \mp \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-jz} \right). \quad (\text{П-3})$$

Из (П-3) видно, что составляющие $\dot{U}_{1T,3T}$ плохо приспособлены для анализа несимметрии системы фазных напряжений. При $U_0=0$ и $z=\pi/2$ имеем одно и то же выражение:

$$\left| \frac{\dot{U}_{1T,3T}}{\dot{U}_{2T}} \right| = \sqrt{3/2} \frac{U_B}{U_{CA}},$$

и для показателя несимметрии в случае $U_0=0$ можно было бы ввести отклонение

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{\sqrt{3} U_B}{U_{CA}} \right). \quad (\text{П-4})$$

Выражение (П-4) — это вполне понятный показатель, но он характеризует несимметрию лишь при $U_0=0$.

Выводы. 1. С методической точки зрения следует отдать предпочтение прямому и обратному преобразованию (17) и (22) с одинаковым числовым коэффициентом $1/\sqrt{3}$ и с непосредственной геометрической интерпретацией модулей

составляющих прямой и обратной последовательностей напряжений. В то же время геометрические построения позволяют четко обосновать введение вспомогательного коэффициента несимметрии в виде (25) и (26).

2. Основные коэффициенты несимметрии должны задаваться как отношения составляющих обратной и нулевой последовательностей к прямой. Для коэффициента по нулевой последовательности требуется знать как фазные, так и одновременно междуфазные напряжения. Для коэффициента по обратной последовательности достаточно знания лишь междуфазных напряжений. Оценку коэффициентов несимметрии можно производить по точным и приближенным формулам. Коэффициент по обратной последовательности можно вычислять строго по любой из формул (23) и (24), коэффициент по нулевой последовательности — по (27), (28) и (23), (24) со знаком плюс на основании последнего из равенств (21), либо делением (23) и (24) на $\sqrt{3}$ с последующим применением предпоследнего из равенств (21).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. — Л.; М.: ОНТИ НКТП СССР, 1936.
2. ГОСТ 13109—87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. — М.: Изд-во стандартов, 1988.
3. Цапенко Е.Ф., Юнис Камаль. Контроль симметричных составляющих линейных напряжений сетей 6—10 кВ. — Изв. вузов. Энергетика, 1991, № 5.
4. Цапенко Е.Ф., Юнис Камаль. К вопросу расчета симметричных составляющих фазных напряжений электрических сетей. — Изв. вузов. Энергетика, 1992, № 2.
5. Stigant A.S. Modern electrical engineering mathematics. London, 1946.
6. Layhton M.A. Analysis of unbalanced polyphase network by the method of phase coordinates. Part 1. System representation in phase frame of reference. — Prog. IEEE, 1968, vol. 115, № 8.
7. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. — Киев: Наукова думка, 1985.
8. Беллмаи Р. Введение в теорию матриц / Пер. с англ. — М.: Наука, 1976.
9. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
10. Баркан Я.Д. Несимметрия в сетях низкого напряжения. — Электричество, 1970, № 3.
11. Clarke E. Circuit analysis of AC power systems. 1943, vol. 1, № 4.

[19.06.98]

Авторы: Цицикан Георгий Николаевич окончил Ереванский политехнический институт в 1963 г. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование» в Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ). Заведующий сектором ЦНИИ судовой электротехники и технологии, профессор Северо-Западного заочного политехнического института (СЗЗПИ), С.-Петербург.

Зайцев Герман Зельманович окончил электротехнический факультет ЛЭТИ в 1959 г. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском инженерно-экономическом институте по теме «Технико-экономическая оценка качества напряжения в промышленности». Заведующий кафедрой электроснабжения СЗЗПИ.

Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ

ЛЕВИН М.С., ЛЕЩИНСКАЯ Т.Б.

Приведены формулы для определения приближенных значений токов прямой, обратной и нулевой последовательностей по значениям трех фазных токов. Выполнены расчеты типичной сельской сети 0,38 кВ при схемах соединений обмоток трансформаторов «звезда—звезда—нуль» и «звезда—зигзаг—нуль». Показано, что в отличие от коэффициента обратной последовательности напряжений значения коэффициента нулевой последовательности напряжений при схеме «звезда—звезда—нуль» намного превосходят значения, нормируемые ГОСТ 13109-87. Потери мощности меньшие в сети с трансформаторами со схемой соединения обмоток «звезда—зигзаг—нуль».

Ключевые слова: сельские электрические сети, несимметричные режимы, токи, потери мощности, расчет

Из-за наличия однофазных потребителей в сельских сетях 0,38 кВ практически всегда имеет место несимметрия токов в фазах, которая, как известно, приводит к ряду неблагоприятных последствий [1]. Искажается симметрия системы напряжений, и фактические значения напряжения в различных точках сети могут существенно отличаться от значений, рассчитанных для симметричного режима. Наличие в системе напряжений составляющей обратной последовательности оказывает неблагоприятное воздействие на работу трехфазных асинхронных двигателей. Возникающие вследствие несимметрии токи обратной и нулевой последовательностей вызывают в соответствующих сопротивлениях сети дополнительные потери мощности и энергии, соизмеримые с потерями от токов прямой последовательности.

По указанным причинам ГОСТ 13109-87 «Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения» ограничивает допустимые значения напряжений обратной и нулевой последовательностей. Нормально допустимые значения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений (отношений соответствующих напряжений к номинальному) не должны превышать 2%, а их максимально допустимые значения — 4%.

Учитывая важное практическое значение проблемы несимметрии нагрузки в сельских сетях, ее исследованию в последние годы уделялось большое внимание. В частности, в [2, 3] сделан вывод о целесообразности использования в сельских сетях трансформаторов со схемой соединения «звезда—зигзаг—нуль» и их изготовление

Formulae are given for determining approximate values of positive-sequence currents, negative-sequence currents and zero-sequence currents by using the values of three phase currents. Calculations of a typical 0,38 kV rural network with transformer windings connected in «star—star—zero» and «star—zigzag—zero» are carried out. It is shown that in contrast to the negative-sequence coefficient of voltages the values of the zero-sequence coefficient of voltages when transformer windings are connected in «star—star—zero» largely exceed the ones established by the State Standard ГОСТ 13109-87. Power losses are less in a network with transformers connected in «star—zigzag—zero».

Key words: *rural electrical networks, non-symmetrical regimes, currents, power losses, calculation*

и применение было предусмотрено соответствующими документами.

В отличие от широко используемых трансформаторов со схемой «звезда—звезда—нуль», у которых сопротивление нулевой последовательности примерно в 10 раз больше сопротивления прямой последовательности, в трансформаторах с соединением «звезда—зигзаг—нуль» эти сопротивления практически равны, что существенно снижает неблагоприятное влияние несимметрии токов. В то же время в трансформаторе «звезда—зигзаг—нуль» затраты проводникового металла несколько выше, так как суммарная длина их обмоток примерно на 8% больше [6].

В [4, 5] приведены расчетные формулы, позволяющие при заданных комплексных сопротивлениях нагрузок в фазах и известных параметрах сети определить коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжений и токов, а также дополнительные потери мощности при несимметрии. Определенный недостаток этих и большинства других подобных работ заключается в том, что расчеты выполняются для задаваемых исследователем моделей сети без учета каких-либо экспериментальных данных о несимметрии. Объясняется это сложностью выполнения необходимых массовых измерений в условиях эксплуатации сетей.

В течение нескольких месяцев на 455 воздушных линиях (ВЛ) 0,38 кВ РЭУ Тамбовэнерго фиксировались показания счетчиков на ПС 10/0,4 кВ, измерялись токи во всех фазах ВЛ, а также выполнялись расчеты этих ВЛ на ЭВМ по специально разработанной программе РАП-0,38 [7]. В результате был сформирован обшир-

ный массив данных, включающий, в частности, фактические значения фазных токов ВЛ 0,38 кВ. Нами была выполнена обработка части этого массива, что позволяет установить некоторые статистические показатели несимметричных режимов сельских сетей.

Как известно, по результатам измерений лишь трех фазных токов значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей могут быть найдены только приближенно. С этой целью было принято допущение, что угол сдвига фаз во всех фазах одинаков.

Применительно к сельским сетям основанием для такого допущения могут служить следующие соображения. Как правило, в этих сетях однородные нагрузки (коммунально-бытовая или двигательная) питаются от отдельных ВЛ или даже трансформаторных подстанций (ПС). Если же нагрузка ВЛ смешанная, то обычно соотношение мощностей этих потребителей во всех фазах примерно одинаково. Тогда в комплексной форме фазные токи можно записать так:

$$\underline{I}_A = I_A; \quad \underline{I}_B = I_B a^2; \quad \underline{I}_C = I_C a, \quad (1)$$

где $a = e^{j120^\circ}$ — фазный множитель.

Следовательно (см., например [7]),

$$\underline{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a\underline{I}_B + a^2\underline{I}_C) = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C); \quad (2)$$

$$\underline{I}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2\underline{I}_B + a\underline{I}_C) = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C); \quad (3)$$

$$\underline{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C). \quad (4)$$

Учитывая, что $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$, выражения (3) и (4) можно переписать:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{1}{3} \left[I_A - \frac{I_B + I_C}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}(I_B - I_C) \right]; \quad (5)$$

$$\underline{I}_{A0} = \frac{1}{3} \left[I_A - \frac{I_B + I_C}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}(I_B - I_C) \right]. \quad (6)$$

Выражения (2), (5) и (6) можно использовать для расчета приближенных значений токов прямой, обратной и нулевой последовательностей по известным значениям трех фазных токов. В частности, из этих выражений следует, что если $\underline{I}_{A1} = I_{A1}$, то

$$I_{A2} = \frac{1}{3} \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - I_A I_B - I_B I_C - I_C I_A} \angle \varphi_2,$$

$$\text{где } \varphi_2 = \arctg \frac{\sqrt{3}(I_B - I_C)}{2I_A - I_B - I_C}, \quad aI_{A0} = I_{A2} \text{ и } \varphi_0 = -\varphi_2.$$

Для статистической обработки были выбраны результаты 61 измерения на девяти ПС 10/0,4 кВ, питающихся от ВЛ № 1, отходящей от шин 10 кВ Изосимовской ПС 35/10 кВ.

Измерения выполнялись ежемесячно в течение июня—декабря 1989 г. Номинальные мощности трансформаторов на ПС 10/0,4 кВ от 63 до 400 кВ·А. Минимальное значение $I_0/I_1 = 0,03$, максимальное — 0,90.

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведена векторная диаграмма токов для несимметричного режима сельской ВЛ. Токи в фазах $I_A = 62,5$ А; $I_B = 25$ А; $I_C = 75$ А. При допущении о равенстве фазных углов этих токов ток прямой последовательности $I_1 = 54,2$ А; а отношение $I_0/I_1 = I_2/I_1 = 0,28$.

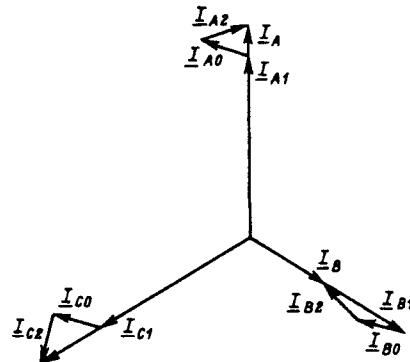


Рис. 1. Векторная диаграмма токов при несимметричном режиме

В результате расчетов на ЭВМ среднее значение отношения $I_2/I_1 = I_0/I_1$ составило 0,186, несмещенная дисперсия $D = \sigma^2 = 0,0298$, а среднее значение угла φ_0 равно 185°.

Построение статистического ряда значений $I_0/I_1 = I_2/I_1$ показало, что этот ряд можно выровнять с помощью закона равномерной плотности. Согласованность теоретического и статистического распределения подтверждена с помощью критерия Пирсона [9].

Наличие экспериментальных данных в соотношениях $I_0/I_1 = I_2/I_1$ значительно упрощает расчеты коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений. В частности, появляется возможность сравнить нормируемые ГОСТ 13109-87 значения этих коэффициентов с их значениями, характерными для реальных сельских сетей.

Содержание выполненных расчетов заключалось в следующем. Рассматривалась однотрансформаторная ПС 10/0,4 кВ, причем номинальные мощности трансформаторов принимались стандартными от 25 до 250 кВ·А включительно. Система напряжений на стороне 10 кВ ПС считалась симметричной, а значение фазного напряжения, приведенное к выводам 0,4 кВ, принималось равным 230 В. Нагрузка трансформатора считалась номинальной при токе прямой последовательности $I_{T1} = I_{T,\text{ном}}$. При этих условиях и, при $I_{T2} = 0,186 I_{T,\text{ном}}$ $\angle -185^\circ$ и $I_{T0} = 0,186 I_{T,\text{ном}}$

$I_{\text{ном}}$ $\angle 185^\circ$ рассчитывались напряжения прямой U_{11} , обратной U_{21} и нулевой U_{01} последовательностей на шинах 0,4 кВ.

К этим шинам помимо прочих ВЛ, которые не рассматривались, считалась присоединенной линия с нагрузкой 30 кВ·А ($I_{\text{л}}=43,35$ А; $\cos \varphi=0,95$) длиной 0,3 км, выполненная проводом А70. Для ТП с $S_{\text{н}}=25$ кВ·А нагрузка ВЛ принималась равной 25 кВ·А. Принималось, что ВЛ нагружена током прямой последовательности $I_{\text{л}1}=I_{\text{л}}$ и соответственно токами $I_{\text{л}2}=0,186 I_{\text{л}}$ $\angle -185^\circ$ и $I_{\text{л}0}=0,186 I_{\text{л}}$ $\angle 185^\circ$. При этих условиях определялись напряжения прямой U_{12} , обратной U_{22} и нулевой U_{02} последовательностей в конце линии. Кроме того, те же напряжения на шинах ПС 0,4 кВ и в конце ВЛ вычислялись при половинной нагрузке трансформатора и линии (см. приложение 1).

Все расчеты выполнялись для двух схем соединений обмоток трансформаторов: «звезда—звезда—нуль» и «звезда—зигзаг—нуль» при параметрах трансформаторов по [10].

Результаты расчетов напряжений для всех номинальных мощностей трансформаторов отличались незначительно, поэтому в табл. 1 в качестве примера приведены значения соответствующих напряжений и коэффициентов для трансформатора мощностью 100 кВ·А.

Отметим, что значения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей напряжений определялись как отношения соответствующих напряжений к напряжениям прямой последовательности, как это предусмотрено ГОСТ 23875-88 «Качество электрической энергии. Термины и определения».

Как уже отмечалось, при других стандартных номинальных мощностях трансформаторов от 25 до 250 кВ·А значения напряжений и коэффициентов K_{2U} и K_{0U} мало отличаются от приведенных в табл. 1.

Как следует из табл. 1, при схеме соединений «звезда—звезда—нуль» значение коэффициента K_{0U} превышает максимальное, предусмотренное

ГОСТ 13109—87 (4%), даже на шинах ПС при половинной нагрузке трансформатора. При полной нагрузке в конце ВЛ это значение превышает максимально допустимое более чем в 2 раза.

При схеме «звезда—зигзаг—нуль» коэффициент K_{0U} во всех случаях остается в пределах нормы; то же относится к коэффициенту K_{2U} при любой из схем соединений. Однако при схеме соединений «звезда—зигзаг—нуль» значение этого коэффициента несколько выше, так как сопротивление прямой (обратной) последовательности трансформаторов с этой схемой на 4,4% больше.

Что касается потерь мощности, то они во всех случаях меньше при схеме соединений обмоток «звезда—звезда—нуль». Объясняется это тем, что большие потери мощности в активном сопротивлении нулевой последовательности трансформаторов со схемой «звезда—звезда—нуль» с лихвой перекрывают несколько большие потери в активных сопротивлениях прямой и обратной последовательностей трансформаторов «звезда—зигзаг—нуль» (см. приложение 2).

Выполненные расчеты позволяют также оценить значение дополнительных потерь мощности, возникающих вследствие несимметрии нагрузки. Для полной сопоставимости результатов расчеты выполнялись для схем с одним трансформатором мощностью 25 кВ·А и отходящей ВЛ с передаваемой мощностью 25 кВ·А; с одним трансформатором 100 кВ·А и четырьмя отходящими ВЛ с передаваемой мощностью 25 кВ·А каждая; с одним трансформатором 250 кВ·А и с 10 ВЛ с передаваемой мощностью 25 кВ·А каждая. Отношение дополнительных потерь к потерям в схеме прямой последовательности практически не зависит от мощности трансформатора и значения нагрузки и составляет 26—29% при схеме соединения обмоток «звезда—звезда—нуль» и 11—12% при схеме соединения «звезда—зигзаг—нуль». Это соответствует результатам, полученным ранее в других расчетах.

Таблица 1

Расчетная точка сети	Схема соединения обмоток трансформатора	Значение параметра при полной нагрузке (числитель) и половинной нагрузке (знаменатель)				
		Симметричные составляющие напряжения, В			Коэффициент обратной и нулевой последовательностей, %	
		U_1	U_2	U_0	K_{2U}	K_{0U}
На шинах 0,4 кВ	«Звезда—звезда—нуль»	$225,6 \angle -2,3^\circ$	$19,3 \angle 58,6^\circ$	$19,3 \angle 68,6^\circ$	0,86	8,6
		$227,7 \angle -1,2^\circ$	$0,97 \angle 58,6^\circ$	$9,7 \angle 68,6^\circ$	0,43	43
	«Звезда—зигзаг—нуль»	$225,0 \angle -2,4^\circ$	$2,0 \angle 56,3^\circ$	$2,0 \angle 66,3^\circ$	0,89	0,89
		$227,5 \angle -1,2^\circ$	$1,0 \angle 56,3^\circ$	$1,0 \angle 66,3^\circ$	0,44	0,44
В конце ВЛ 0,38 кВ	«Звезда—звезда—нуль»	$220,6 \angle -3,4^\circ$	$3,1 \angle 48,3^\circ$	$23,9 \angle 63,2^\circ$	1,40	10,8
		$225,1 \angle -168^\circ$	$1,55 \angle 48,3^\circ$	$12,0 \angle 63,2^\circ$	0,69	53
	«Звезда—зигзаг—нуль»	$219,8 \angle -3,52^\circ$	$3,2 \angle 46,9^\circ$	$6,9 \angle 48,9^\circ$	1,45	3,1
		$224,8 \angle -1,7^\circ$	$1,6 \angle 46,9^\circ$	$3,4 \angle 48,0^\circ$	0,71	1,5

Приложение 1. Пример расчета симметричных составляющих напряжения и коэффициентов обратной и нулевой последовательностей при мощности трансформатора 100 кВ·А.

В таблице 2 приведены параметры трансформаторов с $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ и $I_{\text{ном}} = 144,3 \text{ А}$ со схемами соединения обмоток «звезда—звезда—нуль» и «звезда—зигзаг—нуль» [4, 10].

Таблица 2

Схема соединения	Напряжение u_K , %	Мощность P_K , кВт	Сопротивление, Ом					
			прямой и обратной последовательностей			нулевой последовательности		
			Z_{T1}	R_{T1}	X_{T1}	Z_{T0}	R_{T0}	X_{T0}
«Звезда—звезда—нуль»	4,5	1,97	0,072	0,032	0,064	0,72	0,32	0,64
«Звезда—зигзаг—нуль»	4,7	2,27	0,075	0,036	0,066	0,075	0,036	0,066

При расчетах предполагалось, что к трансформатору присоединены несколько ВЛ 0,38 кВ с нагрузками, обеспечивающими полную (или частичную) загрузку трансформаторов. Из этих ВЛ выделялась одна с нагрузкой 30 кВ·А ($I_L = 43,35 \text{ А}$) длиной 0,3 км, выполненная четырьмя проводами А70 ($R_0 = 0,412 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,309 \text{ Ом/км}$). Тогда комплексное сопротивление ВЛ прямой (обратной) последовательности $Z_{L1} = Z_{L2} = 0,124 + j 0,093 \text{ Ом}$.

Комплексное сопротивление ВЛ токам нулевой последовательности $Z_{L0} = Z_{\phi} + 3Z_h$, где Z_{ϕ} и Z_h – комплексные сопротивления соответственно фазного и нулевого провода. Тогда комплексное сопротивление ВЛ токам нулевой последовательности $Z_{L0} = 0,496 + j 0,372 \text{ Ом}$.

Выполним расчет напряжений прямой последовательности U_{11} (на шинах ПС 0,4 кВ) и U_{21} (в конце ВЛ) при полной нагрузке трансформатора со схемой «звезда—звезда—нуль» и ВЛ. В схеме на рис. 2,б: $E_1 = 230$, В; $I_{T1} = 144,3 \text{ А}$; $I_{L1} = 43,35 \text{ А}$; $Z_{T1} = 0,032 + j 0,064 = 0,072 \angle 63,6^\circ$; $Z_{L1} = 0,124 + j 0,093 = 0,155 \angle 36,9^\circ$.

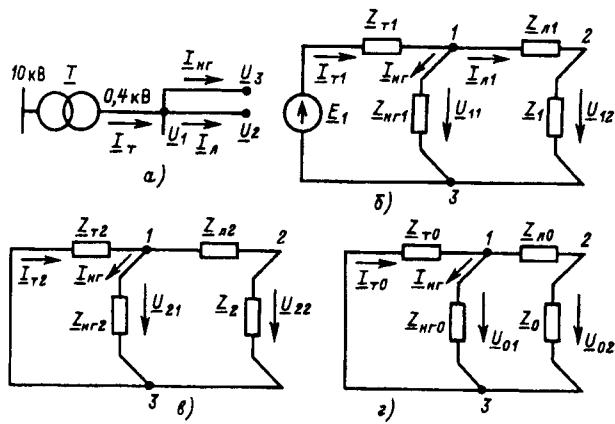


Рис. 2. Схемы сети (а), прямой (б) обратной (в) и нулевой (г) последовательностей: T – трансформатор с двумя вариантами схемы соединения обмоток: «звезда—звезда—нуль» и «звезда—зигзаг—нуль»; I_T – ток трансформатора; I_L – ток рассматриваемой ВЛ; $I_{\text{нг}}$ – суммарный ток остальных ВЛ; $Z_{\text{нг}}$ – их суммарная нагрузка

Напряжение прямой последовательности на шинах ПС:

$$U_{11} = E_1 - I_{T1} Z_{T1} = 230 - 144,3(0,032 + j 0,064) = 225,6 \angle -2,3^\circ \text{ В.}$$

Напряжение в конце ВЛ 0,38 кВ:

$$\begin{aligned} U_{21} &= U_{11} - I_{L1} Z_{L1} = 225,6 - j 9,2 - 43,35(0,124 + j 0,093) = \\ &= 220,4 \angle -3,5^\circ \text{ В.} \end{aligned}$$

Аналогично при схеме «звезда—зигзаг—нуль» (сопротивление трансформатора $Z_{T1} = 0,036 + j 0,00658 = 0,075 \angle 61,3^\circ$, сопротивление ВЛ прежнее):

$$U_{11} = 230 - 144,3 \cdot 0,075 \angle 61,3^\circ = 225 \angle -24^\circ \text{ В;}$$

$$U_{21} = 224,8 - j 9,5 - 43,5 \cdot 0,155 \angle 36,9^\circ = 219,8 \angle -3,5^\circ \text{ В.}$$

В схеме обратной последовательности (рис. 2,в):

$$U_{21} = -I_{T2} Z_{T2}; \quad U_{22} = U_{21} - I_{L2} Z_{L2}.$$

Кроме того, при полной нагрузке трансформатора и ВЛ:

$$I_{T2} = 0,186 I_{T1} \angle -185^\circ = 0,186 \cdot 144,3 \angle -185^\circ = 26,8 \angle 175^\circ \text{ А;}$$

$$I_{L2} = 0,186 I_{L1} \angle 175^\circ = 0,186 \cdot 43,35 \angle 175^\circ = 8,06 \angle 175^\circ \text{ А;}$$

$$Z_{T2} = Z_{T1}; \quad Z_{L2} = Z_{L1}.$$

Тогда при схеме «звезда—звезда—нуль»:

$$\begin{aligned} U_{21} &= -26,8 \angle 175^\circ \cdot 0,072 \angle 63,6^\circ = 1,93 \angle (175^\circ - 180^\circ + \\ &+ 63,6^\circ) = 1 + j 1,65 \text{ В.} \end{aligned}$$

В конце ВЛ 0,38 кВ:

$$\begin{aligned} U_{22} &= 1 + j 1,65 - 8,06 \angle 175^\circ \cdot 0,155 \angle 36,9^\circ = \\ &= 2,06 + j 2,3 = 3,1 \angle 48,3 \text{ В.} \end{aligned}$$

Для трансформатора со схемой «звезда—зигзаг—нуль»:

$$U_{21} = -26,8 \angle 175^\circ \cdot 0,075 \angle 61,3^\circ = 2,01 \angle 56,3^\circ = 1,12 + j 1,67 \text{ В;}$$

$$\begin{aligned} U_{22} &= 1,12 - j 1,67 - 8,06 \angle 175^\circ \cdot 0,155 \angle 36,9^\circ = \\ &= 2,18 + j 2,33 = 3,19 \angle 46,9 \text{ В.} \end{aligned}$$

В схеме нулевой последовательности (рис. 2,г):

$$U_{01} = -I_{T0} Z_{T0}; \quad U_{02} = U_{01} - I_{L0} Z_{L0}.$$

При полной нагрузке трансформатора:

$$I_{T0} = 0,186 \cdot 144,3 \angle 185^\circ = 26,8 \angle 185^\circ \text{ А;}$$

$$I_{L0} = 0,186 \cdot 43,35 \angle 185^\circ = 8,06 \angle 185^\circ \text{ А.}$$

При схеме соединений обмоток «звезда—звезда—нуль»:

$$Z_{T0} = 10 Z_{T1} = 0,72 \angle 63,6^\circ, \text{ Ом;}$$

$$Z_{L0} = Z_{\phi} + 3Z_h = 0,496 + j 0,372 = 0,62 \angle 36,9^\circ, \text{ Ом.}$$

Тогда

$$U_{01} = -26,8 \angle 185^\circ \cdot 0,72 \angle 63,6^\circ = 19,3 \angle 68,6^\circ, \text{ В;}$$

$$U_{02} = 19,3 \angle 68,6^\circ - 8,06 \angle 185^\circ \cdot 0,62 \angle 36,9^\circ = 23,9 \angle 63,2^\circ, \text{ В.}$$

Соответственно при схеме соединения обмоток «звезда—зигзаг—нуль» ($Z_{T0} = Z_{T1} = Z_{T2}$):

$$U_{01} = 2,01 \angle 66,3^\circ, \text{ В; } U_{02} = 6,89 \angle 48,9^\circ, \text{ В.}$$

Коэффициенты обратной и нулевой последовательностей напряжений приближенно можно определить как отношения соответствующих фазных напряжений к напряжению прямой последовательности.

Например, при схеме «звезда—звезда—нуль» на шинах ПС:

$$K_{2U\text{ПС}} = \frac{U_{21}}{U_{11}} 100 = \frac{1,93}{225,6} 100 = 0,86\%;$$

$$K_{0U\text{ПС}} = \frac{U_{01}}{U_{11}} 100 = \frac{19,3}{225,6} 100 = 8,6\%.$$

В конце ВЛ 0,38 кВ:

$$K_{2U\text{ВЛ}} = \frac{3,1}{220,4} 100 = 1,4\%;$$

$$K_{0U\text{ВЛ}} = \frac{23,9}{220,4} 100 = 10,8\%.$$

Как уже отмечалось, те же расчеты были выполнены при других номинальных мощностях трансформаторов при полной и половинной нагрузке ПС и ВЛ. Результаты расчетов для трансформаторов 100 кВ·А приведены в табл. 1.

Отметим, что модули комплексных напряжений U_2 и U_0 (их действующие значения) не зависят от значений угла $\varphi_0 = -\varphi_2$, поэтому приведенные в табл. 1 значения коэффициентов K_{2U} и K_{0U} можно рассматривать как близкие к значениям математических ожиданий этих коэффициентов в типичной сельской сети при любых углах $\varphi_0 = -\varphi_2$.

Приложение 2. Определение потерь мощности при несимметричных режимах сети с трансформатором 100 кВ·А.

Предполагаем, что от ПС отходят четыре ВЛ с передаваемой мощностью 25 кВ·А каждая ($I_L = 36,1$ А). Потери мощности определялись для трансформатора и всех четырех ВЛ раздельно для каждой из схем прямой, обратной и нулевой последовательностей. Например, при схеме соединения обмоток «звезда—звезда—нуль» потери в схеме прямой последовательности при полной нагрузке

$$\Delta P_1 = \Delta P_T + \Delta P_L = 3I_{T1}^2 R_{T1} + 4 \cdot 3I_{L1}^2 R_{L1} = 4,04 \text{ кВт}.$$

В схеме обратной последовательности

$$\Delta P_2 = 3I_{T2}^2 R_{T2} + 4 \cdot 3I_{L2}^2 R_{L2} = 0,136 \text{ кВт}.$$

В схеме нулевой последовательности

$$\Delta P_0 = 3I_{T0}^2 R_{T0} + 4 \cdot 3I_{L0}^2 R_{L0} = 0,968 \text{ кВт}.$$

Таким образом, для рассматриваемых условий дополнительные потери мощности, обусловленные несимметрией,

$$\Delta P_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_2 + \Delta P_0}{\Delta P_1} 100 = 27,3\%.$$

Аналогично выполнены расчеты и для других условий.

В табл. 3 приведены результаты расчетов потерь мощности в элементах сети и также дополнительных потерь $\Delta P_{\text{доп}}$.

Таблица 3

Схема соединения сети	Нагрузка	Потери в схемах последовательностей, кВт						Дополнительные потери $\Delta P_{\text{доп}}$ %	
		прямой ΔP_1		обратной ΔP_2		нулевой ΔP_0			
		ΔP_T	ΔP_L	ΔP_T	ΔP_L	ΔP_T	ΔP_L		
«Звезда—звезда—нуль»	Полная	2,1	1,94	0,069	0,067	0,70	0,268	27,3	
	Половинная	0,5	0,485	0,017	0,017	0,17	0,067	27,5	
«Звезда—зигзаг—нуль»	Полная	2,25	1,94	0,78	0,068	0,078	0,268	11,7	
	Половинная	0,56	0,485	0,019	0,017	0,019	0,067	11,6	

Выводы. 1. В типичной сельской сети с трансформаторами со схемой обмоток «звезда—звезда—нуль» значения коэффициентов нулевой последовательности напряжений при нагрузках 50% и более практически всегда превышают значения, предусмотренные ГОСТ 13109-87.

2. Суммарные потери мощности при несимметричной нагрузке в сети с трансформаторами со схемой соединения обмоток «звезда—зигзаг—нуль» меньше, чем в сети, питающейся от трансформаторов со схемой «звезда—звезда—нуль».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Будзко И.А., Захарин А.Г., Эбин Л.Е. Сельские электрические сети. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
- Левин М.С., Мурадян А.Е., Сырых Н.Н. Качество электроэнергии в сетях сельских районов. — М.: Энергия, 1975.
- Косоухов Ф.Д. Расчет падений напряжения и потерь мощности в сельских распределительных сетях при несимметрии токов. — Л.: ЛСХИ, 1982.
- Косоухов Ф.Д. Методы расчета и анализ показателей несимметрии токов и напряжений в сельских распределительных сетях. — Л.: ЛСХИ, 1984.
- Андраник В.Н. Электрические машины и аппараты. — М.: Колос, 1971.
- Разработка программы и расчет потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,38 кВ. Тамбовэнерго. — М.: ВНИИЭ, 1990.
- Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.
- Справочник по проектированию электроснабжения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

[22.12.98]

Авторы: Левин Моисей Соломонович окончил факультет электрификации сельского хозяйства Московского института механизации и электрификации с.х. в 1946 г. В 1966 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Оптимизация параметров сельских электрических сетей» в Московском государственном агронженерном университете им. В.П. Горячкина (МГАУ). Профессор кафедры электроснабжения с.х. МГАУ.

Лещинская Тамара Борисовна окончила факультет электрификации с.х. Московского института инженеров с.х. производства им. В.П. Горячкина в 1964 г. В 1990 г. защитила докторскую диссертацию по теме «Разработка многокритериальных методов оптимизации параметров систем электроснабжения» во Всесоюзном институте электрификации с.х. Зав. кафедрой электроснабжения с.х. МГАУ.

Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин. Часть I*

ПОПОВ В.И.

Группировка катушек несимметричных дробных двухслойных обмоток при целых числах $z/3$ и $d/3$ может определяться по электрическим углам сдвига пазовых векторов с учетом того, что mN пазов образуют не одну, а m звезд пазовых ЭДС с N пазами в каждой:

$$\alpha_{\text{п}} = 360^\circ p/z = 180^\circ/(mq); \alpha_{\text{в}} = 180^\circ/N = \alpha_{\text{п}} m/d, \quad (28)$$

т.е. между двумя векторами соседних пазов имеются $(d/m-1)$ других векторов и в D -рядах (12) симметричных обмоток разность номеров D вместо (13) равна (при $P \geq 0$)

$$D = (mNP + m)/d. \quad (29)$$

По значению D (29) определяются D -ряды (12), число таких рядов на d групп равно m , и каждый последующий ряд получается из предыдущего прибавлением к нему числа N . Значение $K_{\text{p max}}$ для основной гармонической получается при разделении mN пазов, представленных m рядами, на m фаз таким образом, чтобы каждая фаза содержала одинаковое число пазов N и чтобы они были возможно ближе друг к другу.

Последовательность больших и малых групп в группировке дробной несимметричной обмотки рассматриваемого вида не зависит, как и в симметричных обмотках, от целой части b числа q по (1). Вместе с тем ее группировка, полученная для d групп, не представляет собой повторения m одинаковых частей, как это было в симметричных обмотках, а должна определяться для md групп, образующих группировку несимметричной обмотки, повторяемую $2p/d$ раза. В соответствии с (1) в каждой фазе на d групп приходится $(d-c)$ малых групп с b катушками и (c) больших групп с $(b+1)$ катушками.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки рассматриваемого вида при кратном трем числе пазов z ($z/3 = \text{ц.ч.}$) имеют знаменатель дробности d числа q по (1), также кратный трем ($d/3 = \text{ц.ч.}$), чему соответствуют кратные трем числа полюсов ($2p=6, 12, 18, \dots$).

Исследуемые ниже такие обмотки для минимально возможного числа полюсов $2p=6$ имеют знаменатель дробности $d=p=3$ и $d=2p=6$, тогда по (1) числитель дроби c/d может при-

нимать значения $c=1, 2$ (при $d=3$) и $c=1, 5$ (при $d=6$), которым при $q=b+1/3, q=b+2/3, q=b+1/6, q=b+5/6$ соответствуют (для $b=0$) группировки:

$$\left. \begin{array}{l} 1000001010 \quad (c/d=1/3); \\ 101011110 \quad (c/d=2/3); \\ 1000000100000001000 \quad (c/d=1/6); \\ 1110111111011111110 \quad (c/d=5/6). \end{array} \right\} \quad (30)$$

Для $2p=6$ -полюсных обмоток при $b \neq 0$ группировки получаются по рядам (30) прибавлением к их элементам числа b , при этом обмотка содержит $6p=18$ катушечных групп (с номерами от 1Γ до 18Γ), при $d=3$ ряды в (30) повторяются $2p/d=2$ раза и обмотки по ним могут выполняться с $a=2$ ветвями, а при $d=6$ ряды в (30) не имеют повторений и обмотки по ним не могут иметь параллельных ветвей. При числах полюсов $2p=6t$ группировки (30) для $d=3$ повторяются $2t$ раза и максимально возможное число ветвей $a_{\text{max}}=2t$, а для $d=6$ ряды в (30) повторяются t раз и обмотка может иметь $a_{\text{max}}=t$ ветвей.

На звездах пазовых ЭДС исследуемых $2p=6$ -полюсных несимметричных дробных обмоток с $\alpha_{\text{п}}=360^\circ z/p$ по (28) размечены оси катушечных групп, где $N=z/3$ -лучевая звезда ЭДС повторяется $m=3$ раза. По ним определяются ЭДС катушечных групп, фаз и углы их сдвигов по значениям коэффициентов укорочения $K_{\text{y}}=\sin(\pi y_{\text{п}}/6q)$ концентрических катушек с использованием теорем синусов и косинусов, учитывая разворот на 180° векторов ЭДС групп с четными номерами, соответствующих зонам X, Y, Z . По фазным ЭДС определяются линейные ЭДС, используемые в (10) для оценки коэффициента несимметрии обмотки $K_{\text{нес}}$.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при целых числах $z/3, d/3$ и $q=b+1/6$ ($d=6$) для $p=3t$ формируются в $z=p(6b+1)$ пазах из $6p$ катушечных групп при группировке по (30), повторяемой $2p/6$ раз, и для ее $(b+1)$ катушечных групп внутренняя катушка содержит $(1-x)w_k$ витков, эквивалентное число полностью заполненных обмоткой пазов равно $z'=z-3x$; средний шаг катушек берется равным $y_{\text{п,ср}}=-2,5b+0,5$ и $2,5b$ для соответственно нечетных и четных чисел b , а значение x выбирается в пределах $0,5 \pm 0,6$.

Примеры выполнения $2p=6$ -полюсных обмоток при $q=b+1/6$ по такому алгоритму показаны

* Окончание ч. I статьи. Начало см. в предыдущем № 4, 1999 г. Нумерация формул, таблиц и рисунков продолжает таковую в первой части статьи.

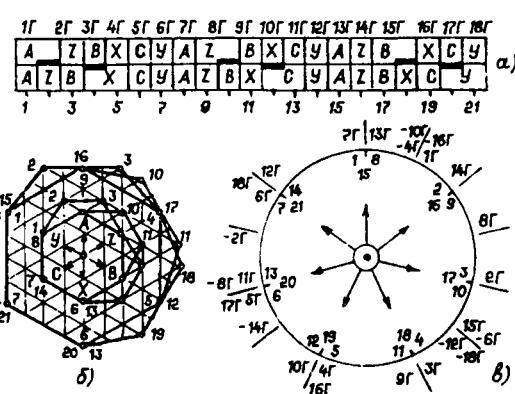


Рис. 6. Чередования по пазам фазных зон (а), многоугольники МДС (б) и звезда пазовых ЭДС (в) трехфазной несимметричной дробной ($q=b+1/6$) обмотки при $q=7/6$, $p=3$, $z=21$

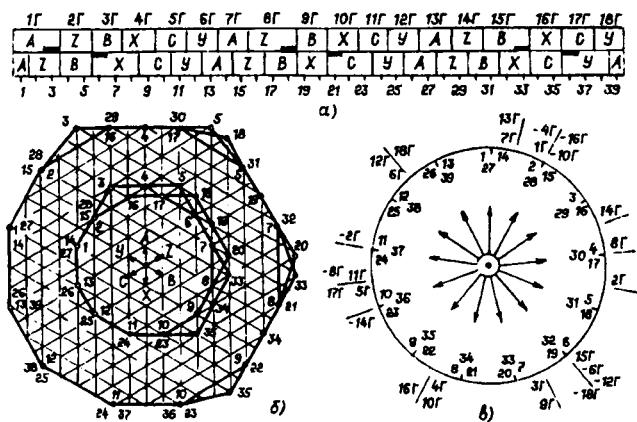


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но при $q=13/6$, $p=3$, $z=39$

на рис. 6 и 7 для значений $b=1$ и 2 .

При $q=1+1/6$ ($b=1$, $c=1$, $N=7$) обмотка (рис. 6, а) имеет $z=21$ паз, $bp=18$ катушечных групп при группировке по (30) 211111121111112111 для всей обмотки. При полюсном делении $\tau_p=z/2p=3,5$ она выполняется с шагами катушек по пазам $y_{pi}=4, 2$ ($y_{p,cr}=2,5b+0,5=3$) для двух- и ($y_p=3$) для однокатушечных групп. Ее многоугольники МДС построены на рис. 6, б: внутренний — для равновитковых ($x=0$), а наружный — неравновитковых (при $x=0,5$) катушек; масштабы их сетки отличаются вдвое.

При $q=2+1/6$ ($N=13$) и $p=3$ обмотка (рис. 7, а) имеет $z=39$ пазов, группировку 322222232222223222 при шагах катушек $y_{pi}=7, 5, 3$ и $6, 4$ ($y_{p,cr}=2,5b=5$ при $\tau_p=6,5$) соответственно для групп трех- и двухкатушечных; многоугольники МДС рис. 7, б построены по тем же условиям, что и для рис. 6, б.

Трехфазным несимметричным обмоткам при целых числах $z/3$, $d/3$ и $q=b+1/6$, $2p=6$ соответствуют звезды пазовых ЭДС вида рис. 6, в и рис. 7, в, по которым определяются ЭДС катушечных групп, фаз и углы их сдвигов:

$$\left. \begin{aligned} \sum E'_{krA} &= E_{1r+4r+10r+16r}; \\ \sum E''_{krA} &= E_{7r+13r}; \\ \sum E'_{krB} &= E_{6r+12r+15r+18r}; \\ \sum E''_{krB} &= E_{3r+9r}; \\ \sum E'_{krC} &= E_{5r+8r+11r+17r}; \\ \sum E''_{krC} &= (E_{2r+14r}) \cos(\alpha_{\pi}/2); \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_A &= \arcsin \left[\left(\sum E''_{krA} / E_{\Phi A} \right) \sin(180^\circ - \alpha_{\pi}/2) \right] = \gamma_B; \\ \varphi_{AB} &= (2b) \alpha_{\pi} + 2\gamma_A; \quad \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = (2b+0,5) \alpha_{\pi} - \gamma_B; \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

где $\gamma_A = \gamma_B$ — углы между векторами соответственно $\sum E'_{krA}$ и $E_{\Phi A}$, $\sum E'_{krB}$ и $E_{\Phi B}$; φ_{AB} , φ_{BC} , φ_{CA} — углы сдвига фазных ЭДС; значения фазных ЭДС определяются по выражениям:

для фаз *A* и *B*

$$E_{\Phi}^2 = \left(\sum E'_{kr} \right)^2 + \left(\sum E''_{kr} \right)^2 - \sum E'_{kr} \sum E''_{kr} \times 2 \cos(180^\circ - \alpha_{\pi}/2); \quad (33)$$

для фазы *C*

$$E_{\Phi} = \sum E'_{kr} + \sum E''_{kr}. \quad (34)$$

При $2w_{k*}=2$ витках паза для обмотки рис. 6, а при $\alpha_{\pi}=360^\circ/7$ и значениях ЭДС катушечных групп по (31) $\sum E'_{krA}=\sum E'_{krB}=\sum E'_{krC}=4,68154-0,78183x$, $\sum E''_{krA}=\sum E''_{krB}=1,94986$, $\sum E''_{krC}=1,75676$,

$$E_{\Phi C} = 6,438303 - 0,78183x \quad (35)$$

по (32)–(33) вычисляются и сводятся в табл. 2 параметры равновитковой ($x=0$) и неравновитковой ($x=0,5$) обмоток.

Таблица 2

Параметры при $q=b+1/6$	$z=21$		$z=39$		$z=57$	
	$x=0$	$x=0,5$	$x=0$	$x=0,5$	$x=0$	$x=0,5$
$E_{\Phi A}=E_{\Phi B}$	6,4937	6,1063	11,5964	11,2658	17,5810	17,2137
$E_{\Phi C}$	6,4383	6,0474	11,5638	11,2322	17,5568	17,1889
K_{ob}	0,9250	0,9364	0,8912	0,9004	0,9249	0,9300
$\gamma_A = \gamma_B$	7,4859	7,9638	4,2978	4,4242	3,0086	3,0729
φ_{AB}	117,8290	118,7848	119,3650	119,6176	119,7014	119,8300
$\varphi_{BC} = \varphi_{CA}$	121,0855	120,6076	120,3175	120,1912	120,4053	120,0850
E_{AB}	11,1224	10,5111	20,0210	19,4752	30,4053	29,7894
$E_{BC}=E_{CA}$	11,2602	10,5575	20,0893	19,5026	38,4531	29,8063
$K_{nec\%}$	0,82	0,29	0,23	0,095	0,105	0,034
$\sigma_d\%$	14,33	12,27	4,07	3,54	1,94	1,64

По многоугольникам МДС рис. 6,б определяется в общем виде значение квадрата среднего радиуса пазовых точек для неравновитковой обмотки (рис. 6,а)

$$R_d^2 = (102 - 30x + 6x^2)/21, \quad (36)$$

откуда по (3) вычисляются значения σ_d для исходной равновитковой и неравновитковой обмоток. Видим, что эффективность по коэффициенту σ_d возрастает для неравновитковой обмотки (рис. 6,а) в $14,33/12,27=1,17$ раза.

Оптимизацию по параметру x несимметричной обмотки можно выполнять по методике, использованной выше для симметричных обмоток.

Например, если для обмотки рис. 6,а условно принять ЭДС всех фаз равными по (35), то ее обмоточный коэффициент запишется в виде

$$K_{ob} = (6,438303 - 0,78183x)/(7-x), \quad (37)$$

тогда по (36)–(37) из (9) определяем $x_{opt}=0,626$, при котором дифференциальное рассеяние обмотки рис. 6,а будет минимальным.

Подобными расчетами вычисляются и сводятся в табл. 2 параметры обмотки с $q=2+1/6$ (рис. 7,а) при $\alpha_n = 360^\circ/13$, ЭДС $\sum E'_{krA} = \sum E'_{krB} = \sum E'_{krC} = 8,03793 - 0,66312x$, $\sum E''_{krA} = \sum E''_{krB} = 3,631386$,

$$E_{phC} = 11,56379 - 0,66312x,$$

$$R_d^2 = (552 - 72x + 9x^2)/39, \quad (38)$$

откуда видно уменьшение в неравновитковой ($x=0,5$) обмотке (рис. 7,а) $K_{нес\%}$ в $0,23/0,095=2,42$ раза и $\sigma_d\%$ в $4,07/3,54=1,15$ раза. В табл. 2 показаны также параметры обмотки при $q=3+1/6$ ($z=57$), для которой $K_{нес\%}$ и $\sigma_d\%$ снижаются соответственно в $0,105/0,034=3,1$ и $1,94/1,64=1,18$ раза.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при целых числах $z/3$, $d/3$ и $q=b+1/3$ ($d=3$) для $p=3t$ формируются в $z=2p$ ($3b+1$) пазах из $6p$ катушечных групп с концентрическими катушками при группировке по (30), повторяемой $2p/3$ раза; ($b+1$)-катушечные группы содержат по $(1-x)w_k$ витков во внутренней катушке групп 1Γ , 8Γ , 15Γ , 17Γ и в наружной катушке групп 6Γ , 10Γ , а b -катушечные группы 3Γ , 13Γ содержат катушку с $(1+x)w_k$ витками и $z'=z-4x$; средний шаг по пазам катушек принимается равным $y_{n,cr}=3b-k$ при $k=0$ для $b=1$, 2 и $k=1$ для $b=3$, а значение параметра x выбирается в пределах $0,2 \div 0,3$.

Примеры выполнения $2p=6$ -полюсных обмоток при $q=b+1/3$ по такому алгоритму показаны на рис. 8 и 9 для значений $b=1$ и 2 .

При $q=1+1/3$ ($b=1$, $c=1$, $N=4$), полюсности

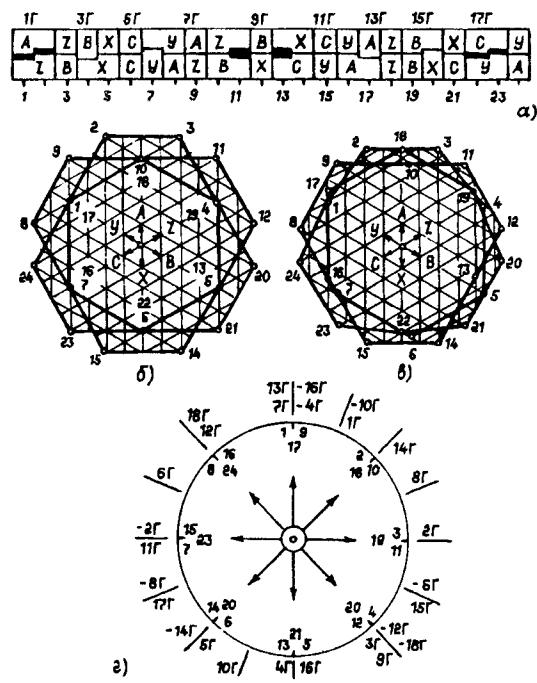


Рис. 8. Чередования по пазам фазных зон (а), многоугольники МДС (б, в) и звезда пазовых ЭДС (д) трехфазной несимметричной дробной ($q=b+1/3$) обмотки при $q=4/3$, $p=3$, $z=24$

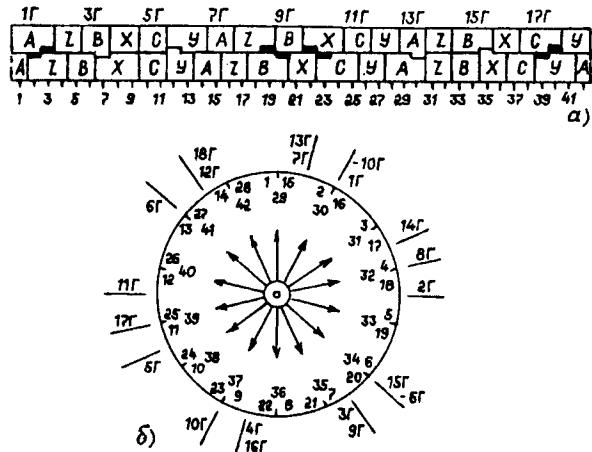


Рис. 9. То же, что и на рис. 8 (кроме б и в), но при $q=7/3$, $p=3$, $z=42$

$p=3$ обмотка имеет $z=6(3+1)=24$ паза (рис. 8,а) и содержит $6p+18$ катушечных групп при их группировке по (30) 211112121, повторяемой дважды. При полюсном делении $\tau_p=4$ она выполняется с шагами катушек $y_{pi}=4$ и 2 ($y_{n,cr}=3b=3$) для двух- и $y_{pi}=3$ для однокатушечных групп. Ее многоугольники МДС построены на рис. 8 в одинаковом масштабе сетки для обмоток исходной равновитковой (рис. 8,б) и неравновитковой при $x=0,25$ (рис. 8,в).

При $q=2+1/3$ ($N=7$) и $p=3$ обмотка (рис. 9,а) имеет $z=42$ паза и группировку 322223232 при шагах катушек $y_{pi}=8$, 6, 4 и 7, 5 ($y_{n,cr}=3b=6$) для трех- и двухкатушечных групп; внутренняя катушка двухкатушечных групп 3Γ , 13Γ содержит

по $(1+x)w_k$ витков. Многоугольники МДС строятся по условиям рис. 8,б и в.

Трехфазным несимметричным обмоткам при целых числах $z/3$, $d/3$ и $q=b+1/3$ для $2p=6$ соответствуют звезды пазовых ЭДС рис. 8,г и 9,б при симметричном сдвиге осей фаз A и B относительно фазы C и по ним определяются:

$$\left. \begin{aligned} \sum E'_{krA} &= E_{1r+7r+13r+16r}; \quad \sum E''_{krA} = E_{4r+10r}; \\ \sum E'_{krB} &= E_{3r+9r+12r+18r}; \quad \sum E''_{krB} = E_{6r+15r}; \\ \sum E'_{krC} &= E_{8r+17r}; \\ \sum E''_{krC} &= (E_{2r+5r+11r+14r}) \cos(\alpha_\pi/2); \\ \varphi_{AB}^\circ &= (2b+1)\alpha_\pi - 2\gamma_A^\circ; \\ \varphi_{BC}^\circ &= \varphi_{CA}^\circ = (360^\circ - \varphi_{AB}^\circ)/2; \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

значения $\gamma_A^\circ = \gamma_B^\circ$ определяются по (32), ЭДС фаз A , B — по (33), фазы C — по (34).

Расчеты для обмотки рис. 8,а (при $2w_{k*}=2$), выполненные подобно предыдущей обмотке по (39)–(40) и многоугольникам МДС рис. 8,б и в, сведены в табл. 3, откуда видно, что для неравновитковой обмотки рис. 8,а при $x=0,3$ коэффициент $K_{\text{нес}\%}$ снижается в $2,01/0,30=6,7$ раза, а коэффициент $\sigma_{d\%}$ — в $13,20/10,69=1,23$.

Таблица 3

Параметры при $q=b+1/3$	$z=24$		$z=42$		$z=60$	
	$x=0$	$x=0,3$	$x=0$	$x=0,25$	$x=0$	$x=0,2$
$E_{\Phi A}=E_{\Phi B}$	6,9733	6,7459	12,9873	12,7763	18,1338	17,9863
$E_{\Phi C}$	8,8284	6,4042	12,8766	12,4857	18,0513	17,7685
$K_{\text{об}}$	0,8656	0,8726	0,9250	0,9278	0,9053	0,9078
$\gamma_A^\circ=\gamma_B^\circ$	10,7991	9,4758	5,3712	5,0201	3,5348	3,3946
φ_{AB}°	113,4018	116,0486	117,8290	118,5314	118,9304	119,2108
$\varphi_{BC}^\circ=\varphi_{CA}^\circ$	123,2991	121,9757	121,0855	120,7343	120,5348	120,3946
E_{AB}	11,6568	11,4473	22,2446	21,9636	31,2381	31,0286
$E_{BC}=E_{CA}$	12,1465	11,5012	22,5204	21,9585	31,4213	31,0261
$K_{\text{нес}\%}$	2,01	0,30	0,82	0	0,39	0
$\sigma_{d\%}$	13,20	10,69	4,25	3,48	2,06	1,73

Подобными расчетами вычисляются и сводятся в табл. 3 параметры обмотки с $q=2+1/3$ (рис. 9,а), откуда видно снижение в неравновитковой обмотке рис. 9,а (при $x=0,25$) коэффициента несимметрии $K_{\text{нес}\%}$ до нуля и коэффициента дифференциального рассеяния $\sigma_{d\%}$ в $4,25/3,48=1,22$ раза. В табл. 3 показаны также параметры неравновитковой обмотки при $q=3+1/3$ ($z=60$), для которой при $x=0,2K_{\text{нес}\%}$ снижается до нуля, а $\sigma_{d\%}$ — в $2,06/1,73=1,19$ раза.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при целых числах $z/3$, $d/3$ и $q=b+2/3$ ($d=3$)

для $p=3t$ формируются в $z=2p(3t+2)$ пазах из $6p$ катушечных групп с концентрическими катушками при группировке по (30), повторяемой $2p/3$ раза; в первой группировке $(b+1)$ -катушечные группы содержат по $(1-x)w_k$ витков в наружной катушке групп 1Γ , 3Γ , 5Γ , 8Γ и во внутренней катушке групп 6Γ , 7Γ , а b -катушечные группы 2Γ , 4Γ , 9Γ содержат катушку с $(1+x)w_k$ витками и $z'=z-6x$; средний шаг по пазам катушек принимается равным $y_{\text{п.ср}}=3b+1$, значение параметра x выбирается в пределах $0,2 \div 0,3$.

При $q=1+2/3$ ($b=1$, $c=2$, $N=5$), полюсности $p=3$ обмотка имеет $z=6(3+2)=30$ пазов, содержит $6p=18$ катушечных групп при их группировке 212122221 , повторяемой дважды. При $\tau_\pi=5$ шаги катушек равны $y_{\text{ш}}=5$ и 3 ($y_{\text{п.ср}}=3b+1+4=4$) для двухкатушечных и $y_{\text{п}}=4$ для однокатушечных групп.

При $q=2+2/3$ ($N=8$) и $p=3$ обмотка имеет $z=48$ пазов и группировку 323233332 при шагах катушек $y_{\text{ш}}=9, 7, 5$ и $8, 6$ ($y_{\text{п.ср}}=3b+1=7$) для трех- и двухкатушечных групп и внутренняя катушка групп 2Γ , 4Γ , 9Γ содержит по $(1+x)w_k$ витков.

Расчеты для обеих обмоток, подобные предыдущим расчетам, сведены в табл. 4, откуда видно снижение для первой обмотки при $x=0,3$ коэффициентов $K_{\text{нес}\%}$ в $1,31/0,096=13,7$ раза и $\sigma_{d\%}$ в $7,93/7,04=1,13$ раза, для второй обмотки при $x=0,25$ — коэффициентов $K_{\text{нес}\%}$ в $0,53/0,069=7,7$ раза и $\sigma_{d\%}$ в $3,20/2,81=1,14$ раза; в табл. 4 показаны также параметры неравновитковой обмотки при $q=3+2/3$ ($z=66$), для которой при $x=0,2$ значение $K_{\text{нес}\%}$ снижается в $0,29/0,05=5,8$ раза.

Таблица 4

Параметры при $q=b+2/3$	$z=30$		$z=48$		$z=66$	
	$x=0$	$x=0,25$	$x=0$	$x=0,25$	$x=0$	$x=0,2$
$E_{\Phi A}=E_{\Phi B}$	9,0642	8,6242	14,9648	14,5173	20,1404	19,8245
$E_{\Phi C}$	8,7840	8,3085	14,8053	14,3053	20,0332	19,6332
$K_{\text{об}}$	0,8971	0,8967	0,9320	0,9320	0,9138	0,9149
$\gamma_A^\circ=\gamma_B^\circ$	3,7181	4,8872	2,8753	3,3202	2,2684	3,4626
φ_{AB}°	115,4360	117,7744	118,2506	119,1404	119,0822	119,4706
$\varphi_{BC}^\circ=\varphi_{CA}^\circ$	122,2820	121,1128	120,8747	120,4298	120,4589	120,2647
E_{AB}	15,3263	14,7673	25,6883	25,0351	34,7218	34,2451
$E_{BC}=E_{CA}$	15,6322	14,7465	25,8946	25,0085	34,8716	34,2170
$K_{\text{нес}\%}$	1,31	0,096	0,534	0,069	0,29	0,050
$\sigma_{d\%}$	7,93	7,04	3,20	2,81	—	—

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при целых числах $z/3$, $d/3$ и $q+5/6$ ($d=6$) для $p=3t$ формируются в $z=p(6b+5)$ пазах из $6p$ групп с концентрическими катушками при группировке по (30), повторяемой $2p/6$ раз, $(b+1)$ -катушечные группы содержат по

$(1-x)w_k$ витков во внутренней катушке групп $2\Gamma, 6\Gamma, 9\Gamma, 13\Gamma, 16\Gamma$ и b -катушечные группы $4\Gamma, 18\Gamma$ содержат катушку с $(1+x)w_k$ витками, а $z'=z-3x$; средний шаг катушек по пазам принимается равным $y_{n,cr}=3b+1$ при x в пределах $0,2 \div 0,3$.

При $q=1+5/6$ ($b=1, c=5, N=11$), полюсности $p=3$ обмотка имеет $z=3(6+5)=33$ паза, содержит $6p=18$ катушечных групп при их группировке 22212222212222221 . При $\tau_n=5,5$ шаги катушек по пазам равны $y_{ni}=5$ и 3 ($y_{n,cr}=3b+1=4$) для двух- и $y_n=4$ для однокатушечных групп.

При $q=2+5/6$ ($N=17$) и $p=3$ обмотка имеет $z=51$ паз при группировке 333233333323333332 , шагах катушек по пазам $y_{ni}=9, 7, 5$ и $8, 6$ ($y_{n,cr}=3b+1=7$) для трех- и двухкатушечных групп. Внутренняя катушка групп $4\Gamma, 18\Gamma$ содержит по $(1+x)w_k$ витков.

Результаты расчета параметров этих катушек сведены в табл. 5, откуда видны снижения для первой обмотки при $x=0,25$ коэффициентов $K_{нес\%}$ в $0,29/0,099=2,9$ раза и $\sigma_d\%$ в $5,71/4,93=1,16$ раза, для второй неравновитковой обмотки при $x=0,25$ — коэффициентов $K_{нес\%}$ в $0,12/0,029=4,2$ раза и $\sigma_d\%$ в $2,39/2,04=1,14$ раза. В табл. 5 показаны также параметры неравновитковой обмотки при $q=3+5/6$ ($z=69$), для которой при $x=0,2$ значение $K_{нес\%}$ снижается в $0,068/0,048=1,42$ раза.

Таблица 5

Параметры при $q=b+5/6$	$z=33$		$z=51$		$z=69$	
	$x=0$	$x=0,25$	$x=0$	$x=0,25$	$x=0$	$x=0,2$
$E_{\Phi A}=E_{\Phi B}$	9.5469	9,3994	15,6078	15,4340	20,6905	20,5871
$E_{\Phi C}$	9,4961	9,3071	15,5749	15,3754	20,6673	20,5211
$K_{об}$	0,8664	0,8715	0,9175	0,9203	0,8993	0,9020
$\gamma_A=\gamma_B$	5,9134	5,6804	3,7201	3,6257	2,7125	2,6707
φ_{AB}	119,0824	119,5484	119,6188	119,8074	119,7924	119,8760
$\varphi_{BC}=\varphi_{CA}$	120,4588	120,2258	120,1906	120,0963	120,1038	120,0620
E_{AB}	16,4587	16,2431	26,9814	26,7065	35,7995	35,6356
$E_{BC}=E_{CA}$	16,5297	16,2188	27,0309	26,6947	35,8356	35,6119
$K_{нес\%}$	0,29	0,099	0,123	0,029	0,068	0,048
$\sigma_d\%$	5,71	4,93	2,39	2,04	—	—

По табл. 2—5 видно заметное уменьшение у предлагаемых обмоток разностей значений фазных ЭДС и углов их сдвигов по сравнению с известными несимметричными обмотками такого вида с равновитковыми катушками, вследствие чего существенно снижается коэффициент несимметрии $K_{нес\%}$ линейных напряжений и

улучшается гармонический состав МДС исследованных обмоток, приближающихся по своим электромагнитным свойствам к симметричным обмоткам.

Электромагнитные параметры предложенных и исследованных новых схем трехфазных дробных несимметричных неравновитковых обмоток при целых числах $z/3, d/3$ для значения $x=x_{опт}$ и равновитковых ($x=0$) показаны (в порядке возрастания чисел пазов z) в табл. 6, где приведены показатели эффективности по степени снижения коэффициентов несимметрии $K_{нес\%}$ линейных напряжений и дифференциального рассеяния $\sigma_d\%$.

Таблица 6

z	q	Равновитковые ($x=0$)				Неравновитковые ($x=x_{опт}$)				Эффективность по	
		$K_{об}$	$K_{нес\%}$	$\sigma_d\%$	$x_{опт}$	$K_{об}$	$K_{нес\%}$	$\sigma_d\%$	$K_{нес\%}$	$\sigma_d\%$	
21	7/6	0,9250	0,82	14,33	0,63	0,9397	0,14	12,12	6,0	—	1,18
24	4/3	0,8656	2,01	13,20	0,30	0,8726	0,30	10,69	6,7	—	1,23
30	5/3	0,8971	1,31	7,93	0,25	0,8967	0,096	7,04	13,6	—	1,13
33	11/6	0,8664	0,29	5,71	0,20	0,8705	0	5,00	—	—	1,14
39	13/6	0,8912	0,23	4,07	0,63	0,9029	0,05	3,50	4,5	—	1,16
42	7/3	0,9250	0,82	4,25	0,25	0,9278	0	3,40	—	—	1,25
48	8/3	0,9320	0,53	3,20	0,20	0,9320	0,066	2,85	8,1	—	1,12
51	17/6	0,9175	0,12	2,39	0,20	0,9197	0	2,08	—	—	1,15
57	19/6	0,9249	0,10	1,94	0,68	0,9319	0	1,62	—	—	1,20
60	10/3	0,9053	0,39	2,06	0,20	0,9078	0	1,73	—	—	1,19
66	11/3	0,9138	0,29	—	0,15	0,9146	0,04	—	7,0	—	—
69	23/6	0,8993	0,07	—	0,15	0,9013	0	—	—	—	—

Результаты табл. 6 показывают уменьшение коэффициента дифференциального рассеяния σ_d на 12—25% у всех исследованных несимметричных обмоток, а коэффициент несимметрии $K_{нес}$ для некоторых схем (выделены жирным шрифтом) снижается до нуля, т.е. такие обмотки получаются практически симметричными.

Высокая степень эффективности исследованных обмоток показывает целесообразность их практического применения в электромашиностроении для трехфазных асинхронных и синхронных машин как единых серий, так и их специализированных исполнений и модификаций. По технологии изготовления предложенные обмотки не имеют существенных отличий.

Вторая часть этой статьи, посвященная исследованию схем трехфазных дробных петлевых несимметричных обмоток при нецелом числе $z/3$ для $2p=4$ и 6, будет опубликована в последующих номерах журнала.

Математическая модель для расчета электромагнитных процессов в трехфазных кабелях с проводящей оболочкой*

ИНКИН А.И., РЕЙХЕРДТ А.А.

Исследуются электромагнитные поля и эксплуатационные характеристики трехфазного кабеля с проводящей оболочкой. Исследование осуществляется с помощью слоистых расчетных моделей и каскадных схем замещения асинхронных электрических машин в предположении, что обмотки статора и заторможенного внешнего ротора представляют собой соответственно жилу и оболочку кабеля. Приводятся результаты расчетов газонаполненного кабеля напряжением 500 кВ.

Ключевые слова: трехфазный кабель, асинхронная электрическая машина, слоистые модели, электромагнитные расчеты

Наряду с однофазными коаксиальными кабелями в электроэнергетике применяются различные конструкции кабелей трехфазного исполнения (рис. 1). Оболочка кабеля выполняется либо в виде сплошных тонкостенных проводящих цилиндров, либо в виде цилиндрических оболочек, сформированных из стальной проволоки. При конструировании таких кабелей возникают проблемы, связанные с минимизацией габаритов, а также расчетами продольных и поперечных параметров кабеля и его эксплуатационных характеристик. Решению этих комплексных проблем должны предшествовать исследования потенциальных электрических и электромагнитных синусоидальных полей в системе «кабель—окружающее пространство».

При строгом подходе оговоренная задача теории поля аналитического решения не имеет. Связано это с тем, что в поперечном сечении кабеля габаритные размеры всех конструктивных элементов и расстояния между ними соизме-

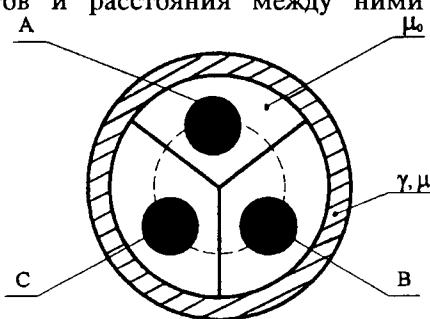


Рис. 1. Конструкция трехфазного кабеля с симметричным расположением фаз

* За помощь в постановке задачи и активное участие в обсуждении полученных результатов авторы выражают глубокую благодарность и признательность профессору К.П. Кадомской.

The electromagnetic fields and operating characteristics of a three-phase conductive-sheath cable are investigated using layered calculating models and stage equivalent circuits of asynchronous electrical machines with the assumption that the windings of the stator and locked external rotor are the cable core and sheath, respectively. Results of an analysis of a 500 kV gas-filled cable are given.

Key words: three-phase cable, asynchronous electrical machine, layered models, electromagnetic analysis

римы между собой и, следовательно, распределение зарядов на поверхностях проводящих тел, а также распределение токов в жилах и оболочке зависят не только от формы каждого конструктивного элемента, но и их взаимного расположения, а также от видов несимметрии фазных токов и линейных напряжений, связанных между собой.

В связи с этим исследования электромагнитных процессов в кабельных устройствах проводятся по двум самостоятельным направлениям, одно из которых включает в себя задачи интегрирования уравнений Лапласа для скалярного электрического потенциала при заданных линейных напряжениях, а второе — задачи интегрирования уравнений Гельмгольца и Лапласа для вектора электрической напряженности при заданных токах в жилах и оболочке. Предлагаемая вниманию работа находится в рамках второго направления.

Среди многообразия научных публикаций, касающихся оговоренной проблемы, следует особо отметить фундаментальную работу [1], в которой Б.М. Фрадкиным был предложен аналитический метод расчета синусоидального электромагнитного поля в многопроводном кабеле с выделением каждой жилы, проводящего экрана и окружающего пространства с целью учета влияния поверхностных эффектов и эффектов близости на интегральные параметры кабеля. На основании этого общего метода в [2] осуществлено решение частной конкретной задачи о расчете электромагнитного поля и параметров в двухпроводной линии в свободном пространстве. Однако, ввиду многочисленности расчетных подобластей с локальными координатами и связанной с этим

обстоятельством необходимостью решения бесконечных систем уравнений для определения постоянных интегрирования, практическая реализация этого метода вызывает существенные трудности.

Вместе с тем существует множество конструкций трехфазных кабелей с проводящей оболочкой, в которых при промышленных частотах токи практически равномерно распределяются по сечениям жил независимо от их геометрии. В оболочках таких кабелей и окружающем пространстве возникают сложные электромагнитные процессы, оказывающие значительное влияние на эксплуатационные характеристики кабеля. Эти характеристики находятся в функциональных зависимостях от геометрии кабеля, физических свойств дискретно однородных сред и частоты тока. Исследованию оговоренных электромагнитных процессов и установлению их влияния на эксплуатационные характеристики кабельных линий трехфазного исполнения и посвящена настоящая работа.

Если кабель имеет пространственно симметричное расположение жил и цилиндрическую оболочку, то при симметричной системе токов в жилах в объеме кабеля и окружающем пространстве устанавливается режим, который может охарактеризован следующими очевидными факторами:

1. Исследуемое поле является двухмерным плоскопараллельным.

2. Электромагнитное поле во всем объеме может быть разложено на пространственные гармонические с периодом, кратным 2π . При этом, как бы ни распределились токи в жилах и оболочке, гармонические нулевого порядка и кратные трем для каждой из трех фаз будут пространственно совмещены, а при симметричной системе токов в фазах их сумма для любого момента времени будет равна нулю. Отсюда следует, что поле в кабеле представляется в виде совокупности первой, второй, четвертой и т.д. пространственных гармонических, бегущих в прямом и обратном направлениях.

3. Аналогичные электромагнитные поля существуют и в поперечном сечении гипотетической «асинхронной машины», в которой статор имеет обмотку в виде жил кабеля, а внешний заторможенный ротор представляется в виде тонкостенной проводящей цилиндрической оболочки.

4. Электромагнитные поля и процессы в трехфазном кабеле можно исследовать с помощью разработанных ранее [3, 4, 5] слоистых моделей и каскадных схем замещения асинхронных электрических машин при учете специфики конструкции кабеля.

Расчетная модель кабеля. При формировании модели для расчета электромагнитного поля в

кабеле и окружающем пространстве будем исходить из известных эксплуатационных характеристик конкретных кабельных устройств, которые могут быть положены в основу принимаемых допущений, упрощающих инженерные расчеты параметров кабеля аналогичных конструкций.

Имеющиеся экспериментальные данные [6] позволяют утверждать, что на такой важный параметр, как потери в оболочке, форма жил существенного влияния не оказывает. Очевидно, что еще в большей степени это будет касаться и окружающего пространства. Это важное положение позволило, в частности, разработать хорошо согласующийся с экспериментом инженерный метод расчета потерь в ферромагнитной проводящей оболочке кабеля при ярко выраженном поверхностном эффекте [6] в предположении, что токи в круглых жилах сосредоточены на их осиях.

В связи с этим в настоящей работе принимается, что реальный ток в каждой жиле сосредотачивается в дугообразных настилах (длина дуги $2\theta R_0 \approx 2r_{jk}$) с линейной плотностью J_A . Этому допущению соответствует расчетная слоистая модель, представленная на рис. 2. Модель состоит из четырех расчетных подобластей, каждая из которых ограничена цилиндрическими поверхностями. Источником электромагнитного поля являются бегущие пространственные гармонические настила тока.

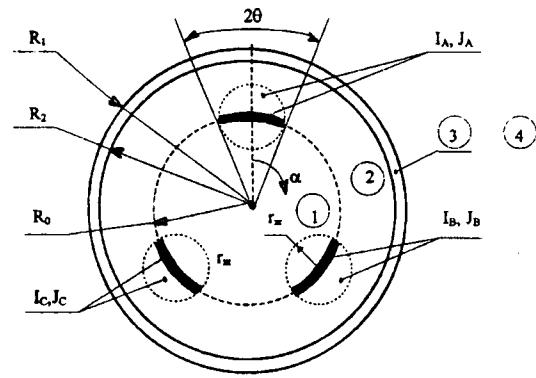


Рис. 2. Расчетная слоистая модель кабеля; 1, 2 — зоны внутренней области кабеля; 3 — оболочка; 4 — окружающее пространство

Для расчета поля в каждой из расчетных зон нужно знать гармонический состав бегущих волн плотностей настила тока или состав гармоник источников поля. Определим эти гармоники.

Рассмотрим фазу A (рис. 2). Настил с током I_A расположен по дуге R_0 с углом 2θ , с плотностью J_A . Ток в жиле и плотность настила тока связаны соотношением

$$J_A = I_A / 2R_0 \theta,$$

где I_A — действующее значение тока.

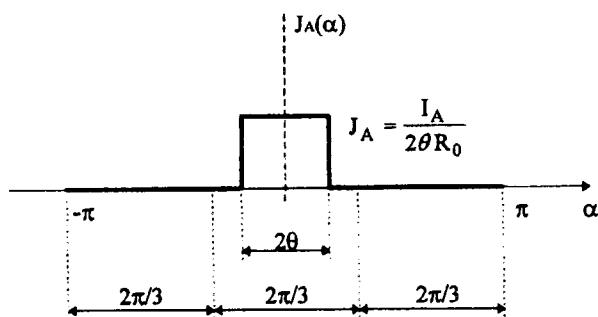


Рис. 3. График распределения плотности настила тока фазы A

На рис. 3 изображена пространственная кривая распределения $J_A(\alpha)$ по окружности радиусом R_0 . Представим ее гармоническим рядом:

$$J_A(\alpha) = J_0 + \sum J_{Ak} \cos(k\alpha).$$

Коэффициенты ряда J_0 и J_{Ak} найдем с помощью формул Эйлера:

$$J_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J_A(\alpha) d\alpha = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\theta} J_A d\alpha = \\ = \theta J_A / \pi = I_A / (2\pi R_0); \quad (1)$$

$$J_{Ak} = \frac{2J_A}{\pi} \int_0^{\theta} \cos(k\alpha) d\alpha = \frac{I_A}{\pi R_0} \frac{\sin(k\theta)}{k\theta}. \quad (2)$$

Если далее записать комплексные выражения для настилов токов фаз $J_A(j\omega, \alpha)$, $J_B(j\omega, \alpha)$, $J_C(j\omega, \alpha)$, а затем их просуммировать, то для k-й гармонической настила тока получим следующее выражение:

$$J_k = J_{k\phi} [\cos(k\alpha) (1 - \cos(2k\pi/3)) - \\ - j\sqrt{3} \sin(k\alpha) \sin(2k\pi/3)]. \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что для $k=0$ и всех гармоник, кратных трем, $J_k=0$.

При $k=1$

$$J_1 = J_{1\phi} [1,5 \cos(\alpha) - j 1,5 \sin(\alpha)] = 1,5J_{1\phi} \times \\ \times [\cos(\alpha) - j \sin(\alpha)] = 1,5J_{1\phi} e^{-j\alpha}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что амплитуда суммарной первой гармонической настила в полтора раза превышает значение амплитуды первой гармоники настила фазы. Полученному комплексному числу соответствует бегущая волна

$$J_1(\omega t, \alpha) = 1,5J_{1\phi} \sin(\omega t - \alpha).$$

Эта волна «бежит» в сторону возрастания координаты α с угловой скоростью вращения волны $\omega_{\text{вр}} = \partial\alpha/\partial t$. Данную скорость получим из уравнения

$$\frac{\partial}{\partial t} (\omega t - \alpha) = 0, \quad \omega = \frac{\partial\alpha}{\partial t} = \omega_{\text{вр}}^{(1)}.$$

По первой гармонике частота вращения совпадает с частотой питания сети ($\omega_{\text{вр}}$ — положительна, это значит, что движение происходит по часовой стрелке). Если далее рассмотреть вторую гармонику, то найдем, что ее амплитуда в полтора раза больше основной фазной гармоники настила тока:

$$J_2(\omega t, \alpha) = 1,5J_{2\phi} \sin(\omega t + 2\alpha).$$

Для второй гармоники скорость вращения будет равна

$$\omega = -2 \frac{\partial\alpha}{\partial t} = -2\omega_{\text{вр}}^{(2)}, \quad \omega_{\text{вр}}^{(2)} = -\frac{1}{2}\omega_{\text{вр}}^{(1)},$$

т.е. волна второй гармоники вращается против часовой стрелки со скоростью, вдвое меньшей, чем волна первой. Третья гармоника отсутствует, четвертая ведет себя как первая:

$$J_4(\omega t, \alpha) = 1,5J_{4\phi} \sin(\omega t - 4\alpha),$$

пятая как вторая и т.д.

Расчет электромагнитного поля во внутренней области кабеля. Рассмотрим произвольную цилиндрическую подобласть, ограниченную поверхностями $R_1(R_e)$ и $R_2(R_i)$ (рис. 4). Вектор электрической напряженности удовлетворяет уравнению

$$R^2 \frac{\partial^2 \dot{E}_k}{\partial R^2} + R \frac{\partial \dot{E}_k}{\partial R} - k^2 \dot{E}_k = 0. \quad (5)$$

Решение этого уравнения определяется совокупностью степенных функций:

$$\dot{E}_k = C_{1k} R^k + C_{2k} R^{-k}. \quad (6)$$

В соответствии со вторым уравнением Максвелла

$$\dot{H}_{ak} = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial R} = \frac{k}{j\omega\mu} \frac{1}{R} (C_{1k} R^k - C_{2k} R^{-k}). \quad (7)$$

Здесь C_{1k} и C_{2k} — постоянные интегрирования,

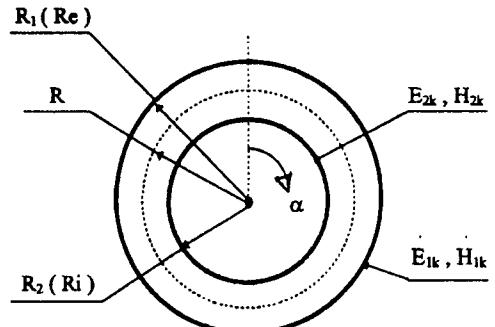


Рис. 4. Произвольная цилиндрическая подобласть, ограниченная поверхностями $R_1(R_e)$ и $R_2(R_i)$

которые можно найти, если задать какую-либо пару значений электрических или магнитных напряженностей на границах R_1 , R_2 .

Схема замещения непроводящей подобласти для компонент векторов E_k , H_k . Известно, что в синусоидальном режиме пассивный четырехполюсник описывается совокупностью стандартных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ I_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

з которых A , B , C , D — постоянные четырехполюсника, связанные соотношением $AD-BC=1$. Пассивный четырехполюсник может быть эквивалентно аппроксимирован трехэлементной схемой замещения (рис. 5) с параметрами

$$Z_1 = \frac{(A-1)}{C}, \quad Z_2 = \frac{(D-1)}{C}, \quad Z_3 = \frac{1}{C}.$$

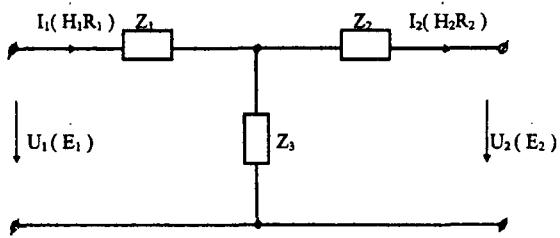


Рис. 5. Трехэлементная схема замещения пассивного четырехполюсника

Если с помощью граничных условий при $R=R_1$ и $R=R_2$ (рис. 4) из (6) и (7) исключить постоянные C_1 и C_2 , то после соответствующих преобразований получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \frac{1}{2}\dot{E}_2 \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right] + \\ &+ \dot{H}_2 R_2 \frac{j\omega\mu}{2k} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 R_1 &= \dot{E}_2 \frac{k}{2j\omega\mu} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right] + \\ &+ \frac{1}{2}\dot{H}_2 R_2 \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая аналогию системы (9), (10) и стандартной системы уравнений четырехполюсника (8), находим, что в (9) и (10) \dot{E}_1 соответствует U_1 и далее $\dot{E}_2 \rightarrow U_2$, $H_1 R_1 \rightarrow I_1$, $H_2 R_2 \rightarrow I_2$ а постоянные A , B , C , D описываются выражениями:

$$A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right]; \quad (11)$$

$$B = \frac{j\omega\mu}{2k} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right]; \quad (12)$$

$$C = \frac{k}{2j\omega\mu} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right]; \quad (13)$$

$$D = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{R_1}{R_2} \right)^k + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^k \right], \quad (14)$$

которые удовлетворяют условиям $A=D$ и $AD-BC=1$ симметричных четырехполюсников. Отсюда следует, что схема четырехполюсника (рис. 5) может рассматриваться и как $E-H$ схема замещения цилиндрической подобласти, представленной на рис. 4.

В этой схеме

$$Z_1 = Z_2 = (A-1)/C = \frac{j\omega\mu}{k} \frac{[(R_1/R_2)^k + (R_2/R_1)^k] - 2}{[(R_1/R_2)^k - (R_2/R_1)^k]}; \quad (15)$$

$$Z_3 = 1/C = \frac{2j\omega\mu}{k} \frac{1}{[(R_1/R_2)^k - (R_2/R_1)^k]}. \quad (16)$$

Электромагнитное поле и $E-H$ схема замещения проводящей оболочки. В проводящей оболочке электрическая напряженность поля E_k удовлетворяет уравнению

$$r^2 \frac{\partial \dot{E}_k}{\partial r^2} + r \frac{\partial \dot{E}_k}{\partial r} + (-j\omega\mu\gamma r^2 - k^2) \dot{E}_k = 0. \quad (17)$$

Если в (17) сделать замену переменной

$$x = nr = \sqrt{-j} \sqrt{\omega\mu\gamma} r = e^{-j\pi/4} r \sqrt{\omega\mu\gamma},$$

то для электрической напряженности будет получено известное уравнение Бесселя:

$$x^2 \frac{\partial^2 \dot{E}_k}{\partial x^2} + x \frac{\partial \dot{E}_k}{\partial x} + (x^2 - k^2) \dot{E}_k = 0. \quad (18)$$

Решение этого уравнения для оболочек обычно записывается в виде комбинаций цилиндрических функций третьего рода или функций Ганкеля, которые формируют из функций Бесселя 1-го и 2-го рода:

$$H_k^{(1)}(x) = J_k^{(1)}(x) + jJ_k^{(2)}(x), \quad H_k^{(2)}(x) = J_k^{(1)}(x) - J_k^{(2)}(x).$$

Таким образом, поле в оболочке по k -й гармонической E_k , H_{ka} описывается с помощью следующих соотношений:

$$\dot{E}_k = C_{1k} H_k^{(1)}(x) + C_{2k} H_k^{(2)}(x); \quad (19)$$

$$\dot{H}_{ka} = -\frac{\gamma}{n} \frac{\partial \dot{E}_k}{\partial x} = -\frac{\gamma}{n} [C_{1k} H_k^{(1)}(x) + C_{2k} H_k^{(2)}(x)]. \quad (20)$$

Решения (19) и (20) с помощью граничных условий для $R=R_1$ и $R=R_2$ и соответствующих преобразований также можно привести к стандартным уравнениям четырехполюсника и оп-

ределить для него параметры схемы замещения (рис. 5):

$$Z_{1k} = \frac{n}{\gamma R_1} \frac{H_k^{(1)}(x_2)[H_k^{(2)}(x_2) - H_k^{(2)}(x_1)] + H_k^{(2)}(x_2)[H_k^{(1)}(x_1) - H_k^{(1)}(x_2)]}{[H_k^{(1)}(x_2)H_k^{(2)}(x_1) - H_k^{(2)}(x_2)H_k^{(1)}(x_1)]}, \quad (21)$$

$$Z_{2k} = \frac{n}{\gamma R_1} \frac{H_k^{(1)}(x_2) \left[\frac{R_1}{R_2} H_k^{(2)}(x_1) - H_k^{(2)}(x_2) \right] + H_k^{(2)}(x_2) \left[H_k^{(1)}(x_2) - \frac{R_1}{R_2} H_k^{(1)}(x_1) \right]}{[H_k^{(1)}(x_2)H_k^{(2)}(x_1) - H_k^{(2)}(x_2)H_k^{(1)}(x_1)]}, \quad (22)$$

$$Z_{3k} = \frac{n}{\gamma R_1} \frac{[H_k^{(1)}(x_2)H_k^{(2)}(x_2) - H_k^{(1)}(x_2)H_k^{(2)}(x_1)]}{[H_k^{(1)}(x_2)H_k^{(2)}(x_1) - H_k^{(2)}(x_2)H_k^{(1)}(x_1)]}. \quad (23)$$

Каскадная схема замещения системы «кабель — окружающее пространство». При решении задач теории поля в многослойных средах обычно для каждого из слоев записывают решения, например, для касательных электрических и магнитных напряженностей. Каждое из этих решений содержит по две неизвестных постоянных для каждой гармонической поля. Эти постоянные затем определяют с помощью граничных условий или с помощью сшивки решений на границах, разделяющих смежные подобласти. При таком алгоритме расчета поля необходимо на конечном этапе аналитически решать алгебраическую систему уравнений достаточно высоких порядков. Решение этой системы требует проведения рутинных операций — преобразований, а полученные окончательные формулы и для постоянных и для компонент вектора поля оказываются громоздкими и лишенными наглядности. Иными словами, если в системе более двух слоев, то прямое аналитическое решение задачи оказывается достаточно трудоемким.

Вместе с тем, полученные выше трехэлементные $E-H$ схемы замещения различных расчетных подобластей позволяют решить эту задачу и просто, и наглядно. Действительно, для обеспечения сшивки решений на границах смежных подобластей достаточно в порядке чередования подобластей зажимы $E-H$ четырехполюсника для предыдущей подобласти соединить с выходными зажимами четырехполюсника для последующей, а на активной границе R_0 сформировать узел и в поперечную ветвь включить источник тока $I_k R_0 = (1,5 I_{jk} \sin(k\theta)) / (\pi R_0 k\theta)$. В итоге будет получена каскадная $E-H$ схема (рис. 6) замещения системы «кабель — окружающее пространство», состоящая

из четырех блоков. В этой схеме первый индекс в символике сопротивлений указывает на номер расчетной зоны, а второй соответствует номеру сопротивления в обобщенной схеме $E-H$ звена (рис. 5).

Расчет токов и напряженностей в каскадной схеме соответствует количественному определению значений E и H на поверхностях расчетных зон слоистой модели, а это значит, что далее по приведенным выше формулам могут без труда рассчитываться и двухмерные $E(r, \alpha)$, $H(r, \alpha)$ поля внутри каждой зоны.

Если при конкретных расчетах какое-либо сопротивление в цепи окажется несоизмеримым с остальными, то соответствующая ветвь может быть либо разомкнута, либо замкнута накоротко, что приводит к упрощению цепи и ее расчета. Это обстоятельство также характеризует важное достоинство каскадной схемы.

Комплексная мощность в элементах системы «кабель — окружающее пространство». Расчет мощности для каждой подобласти можно осуществить двумя способами. Первый способ заключается в том, что после вычисления электрических и магнитных напряженностей на границах зон расчет мощности осуществляется с помощью теоремы Пойнтинга. Второй способ связан с непосредственным использованием трехэлементной схемы той или иной подобласти слоистой модели. Так как эта схема получена по результатам решения уравнений электродинамики, то сумма комплексных мощностей, выделяющихся в ее элементах, должна быть пропорциональна истинной комплексной мощности в расчетной зоне кабеля. Для определения коэффициентов пропорциональности сопоставим выражения для мощности в какой-либо реальной конструктивной зоне и соответствующих элементах каскадной схемы, моделирующих эту зону. Наиболее просто эта задача решается для внутренней зоны 1, ограниченной поверхностью R_0 , так как она аппроксимируется единственным сопротивлением Z_1 . В соответствии с теоремой Пойнтинга комплексная мощность в зоне определяется поверхностным интегралом:

$$S = -\oint \left[\vec{E} \times \vec{H} \right] d\vec{S}.$$

Нетрудно показать, что в этом интеграле все слагаемые, включающие произведения $(E_k \vec{H}_q)$, при $k \neq q$ обращаются в нуль и поэтому оговоренные коэффициенты можно будет определить для каждой k -й гармонической в отдельности:

$$S_k = -\oint \left[\vec{E}_k \times \vec{H}_k \right] d\vec{S} = \oint \vec{E}_k \vec{H}_k^* R_0 d\alpha = \vec{E}_k \vec{H}_k^* 2\pi R_0.$$

Если далее учесть, что на поверхности R_0

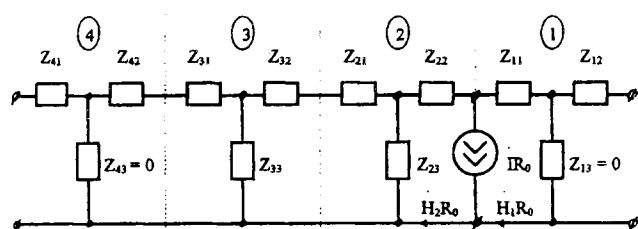


Рис. 6. Каскадная схема замещения системы «кабель — окружающее пространство»

(см. рис. 6) компоненты поля \dot{E}_k и \dot{H}_k связаны законом Ома: $\dot{E}_k = Z_{11} H_k R_0$, то комплексная мощность для k -й гармонической в зоне 1

$$S_k = 2\pi (R_0 H_k)^2 Z_{11}. \quad (24)$$

Обратимся вновь к схеме на рис. 6. Если все токи в ветвях (произведения типа $H \times R$ увеличить в 2π раз), то это не повлечет за собой нарушений узловых уравнений в цепи. Если далее величины всех сопротивлений в цепи уменьшить в 2π раз, то сохранят свои значения и напряжения на сопротивлениях:

$$(H_k R_0) Z_{11} = (H_k R_0) 2\pi \frac{Z_{11}}{2\pi}.$$

После этих операций мощность в сопротивлении Z_{11} будет определяться выражением

$$S_k = (H_k 2\pi R_0)^2 \frac{Z_{11}}{2\pi}, \quad (25)$$

что целиком соответствует выражению (24) для мощности во внутренней конструктивной зоне кабеля.

Таким образом, для приведения $E-H$ схемы (рис. 6) к эквивалентной по мощности в элементах системы «кабель — окружающее пространство» необходимо ток источника увеличить в 2π раз: $I_{k \text{пр}} = (J_k R_0) 2\pi$, а все сопротивления уменьшить в 2π раз: $Z_{\text{пр}} = Z/2\pi$.

Для удобства практического использования запишем выражения для приведенных токов источника и сопротивлений каскадной схемы замещения кабеля (рис. 6) для k -й гармонической (геометрические размеры соответствуют рис. 2 слоистой расчетной модели кабеля):

внутренняя область кабеля 1, окружающее пространство 4 —

$$Z_{11}^{(k)} = \frac{j\omega\mu_0}{2k\pi} = Z_{42}^{(k)}; \quad (26)$$

внутренняя область кабеля 2 ($R_0 < R < R_2$) —

$$Z_{21}^{(k)} = Z_{22}^{(k)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi k} \frac{[(R_2/R_0)^k + (R_0/R_2)^k] - 2}{[(R_2/R_0)^k - (R_0/R_2)^k]}; \quad (27)$$

$$Z_{23}^{(k)} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi k} \frac{1}{[(R_2/R_0)^k - (R_0/R_2)^k]}; \quad (28)$$

оболочка 3 ($R_2 < R < R_1$) —

$$Z_{31}^{(k)} = \frac{Z_{1k}}{2\pi}, \quad Z_{32}^{(k)} = \frac{Z_{2k}}{2\pi}, \quad Z_{33}^{(k)} = \frac{Z_{3k}}{2\pi}, \quad (29)$$

где Z_{1k} , Z_{2k} , Z_{3k} определяются по (21), (22), (23);

источник тока —

$$\dot{I}_k = 3I_{k \text{ж}} \frac{\sin(k\theta)}{k\theta}. \quad (30)$$

Для расчета комплексной мощности в каждой конструктивной зоне кабеля и окружающем пространстве может быть предложен следующий алгоритм.

1. Представить поперечное сечение кабеля и окружающее пространство в виде совокупности расчетных зон — подобластей, ограниченных цилиндрическими поверхностями.

2. Для каждой расчетной зоны составить трехэлементные схемы замещения, параметры которых определяются по выражениям (26)–(30).

3. Сформировать каскадную схему замещения системы «кабель — окружающее пространство» и рассчитать токи в ее ветвях.

4. Рассчитать комплексные мощности в элементах схемы и определить мощность в той или иной конструктивной зоне как сумму комплексных мощностей в элементах, аппроксимирующих эту зону.

Отметим, что, если оболочка выполнена из проводящего ферромагнитного материала, например стальная труба, а ее толщина существенно превосходит глубину проникновения волны, решение поставленной задачи значительно упрощается. Так как в случае ярко выраженного поверхностного эффекта в уравнении Бесселя (18) $x^2 \gg k^2$, то его решение можно представить в виде функций Ганкеля нулевого порядка ($k=0$) $(H_0^{(1)}(x), (H_0^{(2)}(x))$, производные которых являются функциями Ганкеля первого порядка: $H_0^{(1)\dagger}(x) = -H_1^{(1)}(x)$, $H_0^{(2)\dagger}(x) = -H_1^{(2)}(x)$.

Если поле в оболочке затухает достаточно быстро, то без ущерба для точности расчета ее внешний радиус может быть устремлен в бесконечность. При $x_1 \rightarrow \infty$ $H_0^{(2)}(x_1) \rightarrow 0$, $H_1^{(1)}(x_1) \rightarrow 0$ и при больших значениях аргумента существует отношение

$$\frac{H_0^{(2)}(x_2)}{H_1^{(2)}(x_2)} = -j.$$

С учетом этого выражения для параметров оболочки (21), (22), (23), (29) существенно упрощаются и принимают вид

$$Z_{31}^{(0)} = 0, \quad Z_{33}^{(0)} = 0, \quad Z_{32}^{(0)} = \frac{\sqrt{\omega\mu_0\gamma}}{2\pi R_2\gamma} e^{j45^\circ} = \frac{(1+j)}{\Delta\gamma R_2}, \quad (31)$$

где $\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_{fe} \gamma}}$ — глубина проникновения волны.

Результаты расчетов. Сравнительные расчеты активной мощности в оболочке кабеля трехфазного исполнения произведены как по методике, изложенной в настоящей статье, так и по методике, опубликованной в [6], где предполагается, что токи протекают по осям жил.

Расчеты производились применительно к газоизолированному кабелю напряжением 500 кВ (ГИЛ-500): $R_1 = 0,51$ м, $R_2 = 0,5$ м, $r_{ж} = 0,1$ м, значение R_0 варьировалось в пределах 0,15—0,38 м, магнитная проницаемость и проводимость оболочки трубы принимались равными $\mu = 100\mu_0$, $\gamma = 10^7$ 1/(Ом·м). При этом вначале по известным значениям параметров в схеме рис. 6 рассчитывались токи в ветвях, а затем определялись суммарные комплексные мощности в сопротивлениях, аппроксимирующих расчетные подобласти и, в частности, оболочку кабеля.

Зависимости активных потерь в оболочке от R_0 при $r_{ж} = 0,1$ м приведены на рис. 7 (цифрами на графике обозначены потери по гармоникам). Из этого рисунка видно, что при $R_0 = 0,2$ м суммарные потери активной мощности в оболочке кабеля на единицу его длины составят:

$$P_{об} = \begin{cases} \sim 118 \text{ Вт/м, по методике, изложенной в настоящей статье;} \\ \sim 132 \text{ Вт/м, по методике, приведенной в [6].} \end{cases}$$

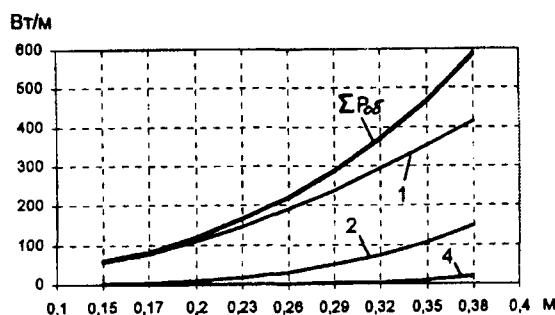


Рис. 7. Зависимости активных потерь в оболочке кабеля от радиуса симметричного расположения жил R_0 при $r_{ж} = 0,1$ м

Следует отметить, что при уменьшении $r_{ж}$ значение $P_{об}$, определенное по изложенной методике, приближается к значению, полученному в [6].

Результаты исследований показали, что в практических расчетах активных потерь в оболочках следует учитывать лишь первые четыре гармонические составляющие тока, причем основная доля потерь (около 80—95%) определяется первой гармонической. Мощность потерь в об-

олочке существенно зависит от отношения R_0/R_2 . Чем больше это отношение, тем больше выделяемая мощность, и наоборот, удаление жил от оболочки приводит к снижению потерь мощности. Однако при конструировании кабелей следует учитывать не только потери, но и требования к изоляционным расстояниям и внешним габаритам кабельных линий.

Выводы. 1. Предлагаемая математическая модель может быть с успехом применена для расчета потерь в оболочках кабелей трехфазного исполнения высокого напряжения с диэлектриком в виде элегаза и сплошными цилиндрическими оболочками.

2. После некоторой коррекции модель может быть применена и для кабельных линий трехфазного исполнения с комбинированной проволочной броней круглого сечения (броня состоит, например, из медных и стальных проволок) и с броней из проволок прямоугольного сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Фрадкин Б.М. Расчет продольных комплексных сопротивлений многопроводного экранированного кабеля с внешними проводниками. — Электричество, 1992, № 6.
- Колли Я.Н. Электромагнитное поле двухпроводной линии. — Электричество, 1992, № 11.
- Инкин А.И., Литвинов Б.В. Синтез каскадных схем замещения индукционных электрических машин на базе типовых Е-Н четырехполюсников. — Электротехника, 1977, № 1.
- Инкин А.И. Синтез Е-Н звеньев и цепных схем замещения электрических машин. — В кн.: Электрические беспозиционные машины переменного тока. — Новосибирск: НЭТИ, 1973.
- Инкин А.И., Бухгольц Ю.Г. Принципы синтезирования нелинейных каскадных схем замещения электрических машин. — Электричество, 1979, № 6.
- Войтович Р.А., Кадомская К.П. Продольные погонные параметры и потери в оболочках в кабелях трехфазного исполнения. — Научный вестник НГТУ № 1, 1995.

[18.11.97]

Авторы: Инкин Алексей Иванович окончил в 1959 г. электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (ныне Новосибирский государственный технический университет — НГТУ). В 1987 г. защитил в Московском энергетическом институте докторскую диссертацию на тему «Теория и электромагнитные расчеты электрических машин с составными активными объемами». Заведующий кафедрой теоретических основ электротехники НГТУ.

Рейхердт Андрей Александрович магистрант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НГТУ.

Трехмерная модель электромагнитных процессов в индукционном электромеханическом преобразователе энергии

СИДОРОВ О.Ю., САРАПУЛОВ Ф.Н.

Излагаются алгоритм и результаты численного решения трехмерных уравнений Максвелла при исследовании индукционного устройства. Учитывается влияние трансформаторной ЭДС и ЭДС движения на распределение магнитного поля внутри и вблизи моделируемого устройства, возможен учет нелинейных свойств магнитопровода. Решение полученных конечно-разностных аналогов трехмерных уравнений Максвелла предложено проводить методом Либмана с релаксацией. Проведено сопоставление опытных и расчетных данных о магнитной индукции линейного асинхронного двигателя.

Ключевые слова: индукционные устройства, электромагнитные процессы, трехмерные уравнения Максвелла, численное решение

Исследование поведения токопроводящей жидкости во внешнем магнитном поле требует решения ряда сопряженных неразрывно связанных трехмерных задач. К ним, например, относятся решение электромагнитных уравнений, моделирование процессов переноса импульса, тепла и массы. В общем случае постановка задачи является весьма сложной, поэтому обычно пользуются различными упрощениями. Например, решают частные задачи пониженной размерности с введением различных поправочных коэффициентов [1]. Однако как одномерные, так и двухмерные модели не могут в полной мере описать реальное устройство. Даже двухмерная модель [2] учитывает лишь одну из трех компонент векторного магнитного потенциала. Следствием упрощений является невозможность теоретически строго в рамках этих подходов рассчитать такие важные параметры и характеристики индукционных устройств, как индуктивное сопротивление фазы индуктора и поперечный краевой эффект во вторичном элементе линейного индукционного двигателя [1, 2], электромагнитные силы в индукционной канальной печи с несимметричным каналом [3, 4].

Разработка конструктивных методов трехмерного моделирования рассмотренного круга задач является актуальной в настоящее время и возможной при существующем уровне развития вычислительной техники.

Основные уравнения электромагнитного поля. Рассмотрим индукционный электромеханический преобразователь энергии. Предполагаем, что в токопроводящем вторичном элементе (ВЭ) отсутствуют токи смещения и свободные заряды, а скорость его перемещения значительно меньше

An algorithm for the numerical solution of three-dimensional Maxwell equations and results obtained when investigating an induction unit are presented. The influence of the transformer e.m.f. and the e.m.f. of motion on the magnetic field distribution inside and near the unit modelled is taken into account. Also, the nonlinear properties of the magnetic core can be taken into account. The solution of the obtained finite-difference analogues of three-dimensional Maxwell equations is performed using the Liebmann method with relaxation. Comparison is made between experimental and calculated results regarding the magnetic induction of a linear asynchronous engine.

Key words: induction devices, electromagnetic processes, three-dimensional Maxwell equations, numerical solution

скорости света [5]. В этом случае при синусоидальном изменении сторонней плотности тока \vec{J}_1 во времени и применении аппарата комплексных чисел уравнения Максвелла принимают следующий вид [1, 6]:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2; \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -j\omega \vec{B}; \quad (2)$$

$$\vec{J}_2 = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}; \quad (4)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0; \quad (5)$$

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}. \quad (6)$$

Здесь \vec{H} , \vec{E} — комплексные векторы амплитуд напряженности магнитного и электрического полей; \vec{J}_1 , \vec{J}_2 — комплексные векторы амплитуд плотностей стороннего и индуцированного токов; \vec{v} , \vec{B} — векторы скорости движения электропроводной среды и магнитной индукции соответственно; σ , μ — удельная электропроводность и магнитная проницаемость материала; ω — частота питающих первичную обмотку токов; j — мнимая единица; \vec{A} — векторный потенциал электромагнитного поля.

Решение уравнений (1)–(6) имеет вид:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J}_1 + \sigma (-j\omega \vec{A} - \text{grad} \varphi + \vec{v} \times \text{rot} \vec{A}), \quad (7)$$

где φ — электростатический потенциал [5].

Преобразуем левую часть уравнения (7):

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \frac{1}{\mu} \text{rot} (\text{rot} \vec{A}) + \text{grad} \left(\frac{1}{\mu} \right) \times \text{rot} \vec{A}. \quad (8)$$

Из векторного анализа известно, что [7]

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}. \quad (9)$$

Подставим выражения (8) и (9) в формулу (7):

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \operatorname{grad}\left(\frac{1}{\mu}\right) \times \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{J}_1 + \sigma(-j\omega \vec{A} + \vec{v} \times \operatorname{rot} \vec{A}) - \operatorname{grad}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{div} \vec{A} + \sigma \varphi\right). \quad (10)$$

Здесь полагается, что зависимость $\mu = f(x, y, z, \vec{B})$ известна в каждой точке моделируемой области, граничные условия заданы, а также справедлив метод эквивалентных синусоид [8].

Сгруппируем члены уравнения (11), содержащие $\operatorname{rot} \vec{A}$, учитывая распределительный закон векторного произведения [7]. Затем перенесем члены, содержащие векторный потенциал, в левую часть. Кроме того, наложим на \vec{A} и φ условие нормировки [6]

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{div} \vec{A} + \sigma \varphi = 0. \quad (11)$$

Тогда уравнение (10) с учетом (11) будет иметь вид

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + j\omega \vec{A} + \left\{ \operatorname{grad}\left(\frac{1}{\mu}\right) - \sigma \vec{v} \right\} \times \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{J}_1. \quad (12)$$

Последнее уравнение является решением системы уравнений (1)–(6) и пригодно для численного анализа.

Поскольку интегральная и дифференциальная формы уравнений Максвелла эквивалентны, то решение уравнений (1)–(6) автоматически обеспечивает выполнение граничных условий на границе различных сред для тангенциальных и нормальных компонент напряженности и индукции. Равенство нормальных компонент магнитной индукции заложено в уравнении (5), равенство тангенциальных составляющих напряженности электрических и магнитных полей — в соотношениях (1) и (2).

Конечно-разностное описание электромагнитных уравнений. Рассмотрим разностную аппроксимацию уравнения (12) в прямоугольной декартовой системе координат. Сделаем обозначения

$$\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}; \quad \vec{A} = A_x\vec{i} + A_y\vec{j} + A_z\vec{k}.$$

Перейдем к относительным единицам векторного потенциала $A_q = A_q/\mu_0$ ($q=x, y, z$; μ_0 — магнитная постоянная). Учтем при этом, что $\mu = \mu_r \mu_0$ (μ_r — относительная магнитная проницаемость). Тогда векторное уравнение (12) может быть записано в координатной форме:

$$-\frac{1}{\mu_r} \frac{\partial^2 \bar{A}_q}{\partial x^2} - \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial^2 \bar{A}_q}{\partial y^2} - \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial^2 \bar{A}_q}{\partial z^2} + j\sigma_q \omega \mu_0 \bar{A}_q - \lambda_q \frac{\partial \bar{A}_q}{\partial x} -$$

$$-\beta_q \frac{\partial \bar{A}_q}{\partial y} - \gamma_q \frac{\partial \bar{A}_q}{\partial z} = J_q - \lambda_q \frac{\partial \bar{A}_x}{\partial q} - \beta_q \frac{\partial \bar{A}_y}{\partial q} - \gamma_q \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial q}. \quad (14)$$

Здесь $q=x, y, z$;

$$\lambda_q = \begin{cases} 0; & q=x; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_r} \right) - \mu_0 \sigma_x u; & q=y, z. \end{cases}$$

$$\beta_q = \begin{cases} 0; & q=y; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_r} \right) - \mu_0 \sigma_y v; & q=x, z. \end{cases}$$

$$\gamma_q = \begin{cases} 0; & q=z; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \right) - \mu_0 \sigma_z w; & q=x, y. \end{cases}$$

Для описания производных в уравнении (14) воспользуемся трехточечной интерполяцией Лагранжа (см., например, [9]), которая удобна тем, что весовые многочлены соответствующих узлов (или множители Лагранжа) зависят только от шага разностной сетки, но не зависят от величин интерполируемой функции в узлах. Поместим узел векторного потенциала в центр клетки разностной сетки, как это показано на рис. 1 для оси X . Запишем уравнение (14) для x -компоненты векторного потенциала, опуская у векторного потенциала нижний индекс « x », а у относительной магнитной проницаемости индекс « r ».

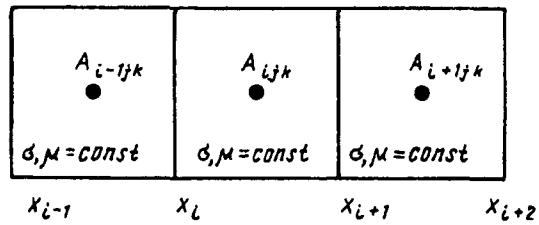


Рис. 1. Узлы разностной сетки вдоль координаты x . $\sigma_r = \text{const}$ в разных клетках могут быть различны

Вдоль оси X

$$\bar{A} = p_1 \bar{A}_{i-1jk} + p_2 \bar{A}_{ijk} + p_3 \bar{A}_{i+1jk};$$

$$\frac{1}{\mu_r} = p_1 \frac{1}{\mu_{i-1jk}} + p_2 \frac{1}{\mu_{ijk}} + p_3 \frac{1}{\mu_{i+1jk}};$$

$$p_1 = \frac{(x - \bar{x}_2)(x - \bar{x}_3)}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)(\bar{x}_1 - \bar{x}_3)}; \quad p_2 = \frac{(x - \bar{x}_1)(x - \bar{x}_3)}{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)(\bar{x}_2 - \bar{x}_3)};$$

$$p_3 = \frac{(x - \bar{x}_1)(x - \bar{x}_2)}{(\bar{x}_3 - \bar{x}_1)(\bar{x}_3 - \bar{x}_2)}.$$

Вдоль оси Y

$$\bar{A} = q_1 \bar{A}_{ij-1k} + q_2 \bar{A}_{ijk} + q_3 \bar{A}_{ij+1k};$$

$$\frac{1}{\mu_r} = q_1 \frac{1}{\mu_{ij-1k}} + q_2 \frac{1}{\mu_{ijk}} + q_3 \frac{1}{\mu_{ij+1k}};$$

$$q_1 = \frac{(y - \bar{y}_2)(y - \bar{y}_3)}{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)(\bar{y}_1 - \bar{y}_3)}; \quad q_2 = \frac{(y - \bar{y}_1)(y - \bar{y}_3)}{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)(\bar{y}_2 - \bar{y}_3)};$$

$$q_3 = \frac{(y - \bar{y}_1)(y - \bar{y}_2)}{(\bar{y}_3 - \bar{y}_1)(\bar{y}_3 - \bar{y}_2)}.$$

Вдоль оси Z

$$\begin{aligned} \bar{A} &= r_1 \bar{A}_{ijk-1} + r_2 \bar{A}_{ijk} + r_3 \bar{A}_{ijk+1}; \\ \frac{1}{\mu_r} &= r_1 \frac{1}{\mu_{ijk-1}} + r_2 \frac{1}{\mu_{ijk}} + r_3 \frac{1}{\mu_{ijk+1}}; \\ r_1 &= \frac{(z - \bar{z}_2)(z - \bar{z}_3)}{(\bar{z}_1 - \bar{z}_2)(\bar{z}_1 - \bar{z}_3)}; \quad r_2 = \frac{(z - \bar{z}_1)(z - \bar{z}_3)}{(\bar{z}_2 - \bar{z}_1)(\bar{z}_2 - \bar{z}_3)}; \\ r_3 &= \frac{(z - \bar{z}_1)(z - \bar{z}_2)}{(\bar{z}_3 - \bar{z}_1)(\bar{z}_3 - \bar{z}_2)}. \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= (x_i + x_{i-1})/2; \quad \bar{x}_2 = (x_{i+1} + x_i)/2; \quad \bar{x}_3 = (x_{i+2} + x_{i+1})/2; \\ \bar{y}_1 &= (y_j + y_{j-1})/2; \quad \bar{y}_2 = (y_{j+1} + y_j)/2; \quad \bar{y}_3 = (y_{j+2} + y_{j+1})/2; \\ \bar{z}_1 &= (z_k + z_{k-1})/2; \quad \bar{z}_2 = (z_{k+1} + z_k)/2; \quad \bar{z}_3 = (z_{k+2} + z_{k+1})/2. \end{aligned}$$

Используя последние выражения, можно переписать уравнение (14) для узла в клетке (ijk) следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{A}_{i-1jk} \left(-\frac{p_1''}{\mu_{ijk}} - \lambda_x p_1' \right) + \bar{A}_{ij-1k} \left(-\frac{q_1''}{\mu_{ijk}} - \beta_x q_1' \right) + \\ + \bar{A}_{ijk-1} \left(-\frac{r_1''}{\mu_{ijk}} - \gamma_x r_1' \right) + \bar{A}_{ijk} \times \\ \times \left\{ \frac{-1}{\mu_{ijk}} (p_2'' + q_2'' + r_2'') - \lambda_x p_2' - \beta_x q_2' - \gamma_x r_2' + j\omega \mu_0 \sigma_q \right\} + \\ \bar{A}_{i+1jk} \left(-\frac{p_3''}{\mu_{ijk}} - \lambda_x p_3' \right) + \bar{A}_{ij+1k} \left(-\frac{q_3''}{\mu_{ijk}} - \beta_x q_3' \right) + \\ + \bar{A}_{ijk+1} \left(-\frac{r_3''}{\mu_{ijk}} - \gamma_x r_3' \right) = F_x. \quad (15) \end{aligned}$$

В выражении (15) $F_x = J_{xijk} - \beta_x \frac{\partial \bar{A}_y}{\partial x} - \gamma_x \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial x}$; p_i' , p_i'' — первая и вторая производные от p_i по x ; q_i' , q_i'' — первая и вторая производные от q_i по y ; r_i' , r_i'' — первая и вторая производные от r_i по z . При рассмотрении других компонент векторного потенциала в левой части уравнения (15) меняются величины λ , β , γ , а правые части приобретают вид

$$F_y = J_{yijk} - \lambda_y \frac{\partial \bar{A}_x}{\partial y} - \gamma_y \frac{\partial \bar{A}_z}{\partial y};$$

$$F_z = J_{zijk} - \lambda_z \frac{\partial \bar{A}_x}{\partial z} - \beta_z \frac{\partial \bar{A}_y}{\partial z}.$$

Уравнение (15) является конечно-разностной аппроксимацией системы уравнений Максвелла (1)–(5) для x -компоненты векторного потенциала

в трехмерной декартовой системе координат и пригодно для численного решения на ЭВМ. Уравнения для других компонент получаются путем замены величин λ , β , γ , F .

Рассмотренная модель позволяет в полной мере учсть влияние концевого, поперечного и толщинного эффектов, так как является строго трехмерной и может воспроизвести практически точно все геометрические особенности объекта моделирования.

Рассмотрим процесс разбиения области. Поместим объект в прямоугольный параллелепипед и разобьем его на множество прямоугольных ячеек, размеры которых могут быть различны. В пределах одной ячейки магнитную проницаемость и удельную электропроводность будем считать неизменными. Внутри каждой ячейки на пересечении диагоналей элементарного параллелепипеда расположим узел для трех компонент векторного магнитного потенциала, удельной электропроводности, плотности первичного и индуцированного токов, а также магнитной проницаемости. Компоненты векторного потенциала связаны между собой с помощью уравнения (15). Причем в случае движущегося вторичного элемента уравнение для x -компоненты содержит значения y - и z -компонент (аналогично для других составляющих векторного потенциала), т.е. расчет одной составляющей векторного потенциала зависит от значений других его компонент.

Для решения этой задачи воспользуемся итерационным методом Либмана с введением параметра релаксации α [10]. В рамках этого метода следует выразить из уравнения (15) величину \bar{A}_{ijk} :

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ijk} &= \left\{ \frac{-1}{\mu_{ijk}} (p_2'' + q_2'' + r_2'') - \lambda_x p_2' - \beta_x q_2' - \gamma_x r_2' + j\omega \mu_0 \sigma_q \right\}^{-1} \times \\ &\times \left\{ F_{xijk} + \bar{A}_{i+1jk} \left(\frac{p_3''}{\mu_{ijk}} + \lambda_x p_3' \right) + \bar{A}_{ij+1k} \left(\frac{q_3''}{\mu_{ijk}} + \beta_x q_3' \right) + \right. \\ &+ \bar{A}_{ijk+1} \left(\frac{r_3''}{\mu_{ijk}} + \gamma_x r_3' \right) + \bar{A}_{i-1jk} \left(\frac{p_1''}{\mu_{ijk}} + \lambda_x p_1' \right) + \\ &+ \left. \bar{A}_{ij-1k} \left(\frac{q_1''}{\mu_{ijk}} + \beta_x q_1' \right) + \bar{A}_{ijk-1} \left(\frac{r_1''}{\mu_{ijk}} + \gamma_x r_1' \right) \right\}. \quad (16) \end{aligned}$$

Тогда $(n+1)$ -е приближение для векторного потенциала \bar{A}_{ijk}^{n+1} рассчитывается по формуле

$$\bar{A}_{ijk}^{n+1} = \bar{A}_{ijk}^n + \alpha (\bar{A}_{ijk} - \bar{A}_{ijk}^n). \quad (17)$$

Здесь \bar{A}_{ijk} , \bar{A}_{ijk}^n — величина, рассчитанная по уравнению (16), и n -е приближение для векторного потенциала соответственно; $0 < \alpha < 2$.

Вычисления по формуле (17) проводятся одновременно для трех компонент векторного потенциала для всех ячеек моделируемой области

(кроме граничных). Для определенности решения необходимо задать значения векторного потенциала на границе области моделирования (на границе параллелепипеда). Если все рассматриваемое устройство поместились внутри параллелепипеда, то можно использовать граничные условия Дирихле.

Известно [11], что итерационный процесс, определенный соотношением (17), сходится в том случае, если собственные числа итерационной матрицы находятся в пределах окружности единичного радиуса. Определить эти собственные числа до начала итераций практически невозможно. Поэтому сходимость или расходимость итерационного процесса определяется во время вычислений. Если итерационный процесс расходится (это можно контролировать по поведению максимальной или средней невязки в уравнении (15)), то следует либо изменять параметр релаксации, либо уменьшать шаг дробления моделируемой области [11].

Электромагнитные силы и магнитная индукция. Электромагнитные силы, действующие на токопроводящий немагнитный вторичный элемент, можно оценить с помощью выражения [1, 6, 12]

$$\vec{F} = \vec{J}_2 \times \vec{B}^* = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ B_x^* & B_y^* & B_z^* \end{vmatrix} = (J_{2y} B_z^* - J_{2z} B_y^*) \vec{i} + (J_{2z} B_x^* - J_{2x} B_z^*) \vec{j} + (J_{2x} B_y^* - J_{2y} B_x^*) \vec{k}.$$

Здесь \vec{J}_2 — плотность индуцированного во вторичном элементе тока; «*» — означает комплексное сопряжение; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — орты декартовой системы координат.

Компоненты магнитной индукции вычисляются на основе соотношения (6):

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}; \quad B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}; \quad B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}.$$

Производные от компонент векторного магнитного потенциала несложно рассчитать, используя ранее упомянутую трехточечную интерполяцию Лагранжа.

Плотность индуцированного тока рассчитывается из уравнения (2) с учетом выражения (7)

$$\vec{J}_2 = \sigma (-j\omega \vec{A} - \text{grad} \varphi + \vec{v} \times \vec{B}).$$

В результате получаем:

$$\begin{aligned} J_{2x} &= \sigma_x \left(-j\omega A_x - \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v B_z - w B_y \right); \\ J_{2y} &= \sigma_y \left(-j\omega A_y - \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w B_x - u B_z \right); \\ J_{2z} &= \sigma_z \left(-j\omega A_z - \frac{\partial \varphi}{\partial z} + u B_y - v B_x \right). \end{aligned}$$

Обсуждение результатов. Исследуем характеристики холостого хода линейного асинхронного двигателя (ЛАД) с кольцевой обмоткой и трехфазным питанием. Ширина индуктора ЛАД равна 0,18 м, высота — 0,132 м, длина — 0,364 м. Число разбиений по координатам X, Y, Z составило $39 \times 19 \times 22$ клеток соответственно. Точность вычислений векторного потенциала выбиралась равной 0,0001, а параметр релаксации колебался в пределах 1,2–1,3.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления теоретически оцененных и опытных данных огибающей нормальной составляющей индукции на расстоянии 2 мм от поверхности. На рис. 2,а показана огибающая в направлении бегущего поля по середине статора ЛАД, а на рис. 2,б — поперек статора. Можно отметить удовлетворительное качественное и количественное согласие модельных и экспериментальных данных.

Поместим над поверхностью рассмотренного ЛАД медную пластину и проследим изменение нормальной компоненты магнитной индукции в зависимости от скорости. Эти данные показаны

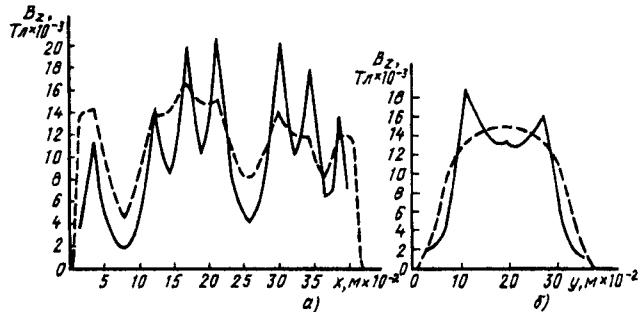


Рис. 2. Огибающие нормальной компоненты магнитной индукции для холостого хода линейной индукционной машины. Сплошные линии — эксперимент; штриховые — результаты вычислений: а — сечение вблизи середины индуктора в направлении бегущего магнитного поля; б — поперечное сечение

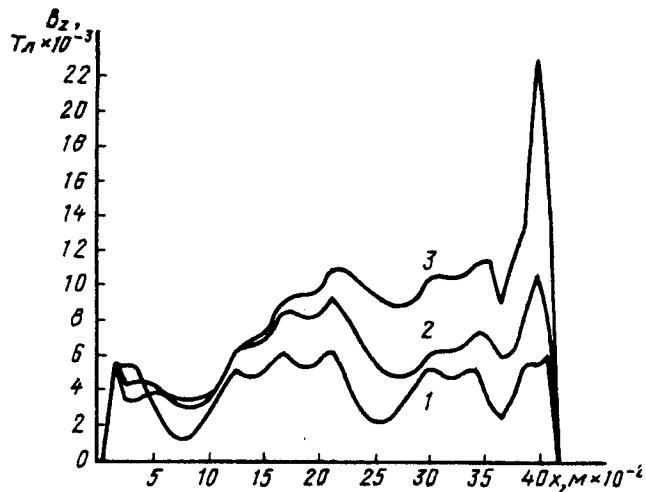


Рис. 3. Влияние скорости движения ВЭ на нормальную компоненту магнитной индукции во ВЭ: 1 — $u=0$; 2 — $u=7$ м/с; 3 — $u=15$ м/с; синхронная скорость 18,2 м/с

на рис. 3. Из него следует, что при увеличении скорости движения ВЭ происходит уменьшение изломов на огибающей нормальной компоненты. Кроме того, линии магнитной индукции смещаются в сторону движения ВЭ, что соответствует известному эффекту «вмороженности» магнитного поля (см., например, [12]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Сарапулов Ф.Н., Сидоров О.Ю. Расчет электромагнитных характеристик асинхронной машины с учетом насыщения магнитопровода. — Электричество, 1995, № 4.
3. Колесниченко А.Ф. Технологические МГД установки и процессы. — Киев: Наукова Думка, 1980.
4. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркулирующей металла в электропечах. — М.: Металлургия, 1991.
5. Левич В.Г. Курс теоретической физики. Т. 1. — М.: Наука, 1969.
6. Крумин Ю.К. Основы теории и расчета устройств с бегущим магнитным полем. — Рига: Зинатне, 1983.
7. Сахарников Н.А. Высшая математика. — Л.: Изд-во Ленинградск. ун-та, 1973.
8. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х томах. Учебник для вузов. Т. 2. — Л.: Энергоиздат, 1981.
9. Данилина Н.И., Дубровская Н.С., Кваша О.П., Смирнов Г.Л. Вычислительная математика. — М.: Высшая школа, 1985.
10. Мак-Кракен Д., Дори У. Численные методы и программирование на ФОРТРАН. — М.: Мир, 1977.
11. Насар С.А., Дел Сид Л. Тяговые и подъемные

усилия, развиваемые односторонним асинхронным двигателем, для высокоскоростного наземного транспорта. — В кн.: Наземный транспорт 80-х годов. — М.: Мир, 1975.

12. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973.

[11.06.97]

Авторы: Сидоров Олег Юрьевич окончил металлургический факультет Уральского политехнического института (УПИ, ныне Уральский государственный технический университет — УГТУ) в 1985 г. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Основы теории и расчета индукционных электромеханических преобразователей энергии для обработки металлических расплавов» в УГТУ. Заведующий кафедрой высшей и прикладной математики Нижнетагильского института Уральского государственного технического университета (НТИ УГТУ).

Сарапулов Федор Никитич окончил электротехнический факультет УПИ в 1962 г. В 1982 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Несимметричные индукционные двигатели с замкнутым и разомкнутым магнитопроводом» в УПИ. Заведующий кафедрой электротехники и электротехнологических систем УГТУ.

К ЧИТАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «Электричество»

Бесплатно получать оглавления нашего журнала можно через электронные сети. Эту услугу оказывает служба ИНФОМАГ, организованная в Московском физико-техническом институте. Все материалы службы ИНФОМАГ доступны в режиме ON-LINE через сервер РосНИИРОС по следующим URL:

<http://www.ripn.net>

<gopher://gopher.ripn.net>

Для получения материалов службы ИНФОМАГ по подписке через электронную почту следует направить письмо с командой

HELP по адресу ims@ripn.net

Полная информация о службе ИНФОМАГ может быть получена в ответ на команду HELP, направленную по адресу infomag@lgrant.mipt.msk.su

Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции

СЕРЕБРЯКОВ А.С.

Предлагается новый способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции, позволяющий значительно сократить время измерения. Особенность метода заключается в том, что кроме сопротивления изоляции измеряют его первую и вторую производные по времени. За установившееся значение сопротивления изоляции принимают удвоенное значение того сопротивления, при котором первая производная имеет максимум, а вторая производная равна нулю.

Ключевые слова: измерение сопротивления изоляции, установившееся значение, способ измерения, производные функции

В процессе эксплуатации электрооборудования происходит старение изоляции, свойства ее ухудшаются, электрическая прочность снижается, что может привести к электрическому пробою. Чтобы исключить внезапные пробои изоляции и поддержать необходимую степень надежности работы электрооборудования, состояние изоляции периодически контролируется и ухудшение ее свойств компенсируется системой планово-предупредительных ремонтов. При такой системе профилактические и ремонтные работы производятся по времени наработки.

Так, например, согласно Правилам ремонта электрических машин электроподвижного состава тяговые электродвигатели (ТЭД) электровозов после пробега каждого 350 тыс.км от начала эксплуатации обязаны пройти определенный вид ремонта. После пробега первых 350 тыс. км регламентирован текущий ремонт, после пробега 700 тыс. км — средний ремонт, после пробега 1050 тыс. км — вновь текущий ремонт и, наконец, после пробега 1400 тыс. км — капитальный ремонт. Текущий ремонт изоляции включает ее чистку, а иногда пропитку и сушку. Средний ремонт изоляции всегда включает ее чистку, пропитку и сушку, а капитальный ремонт — полную замену изоляции.

Поскольку объем работ при капитальном ремонте значительно больше, чем при среднем, то и стоимость капитального ремонта практически на порядок выше стоимости среднего ремонта.

Как показала практика, система поддержания надежности изоляции по пробегу не является оптимальной. Условия эксплуатации ТЭД не одинаковые, следовательно неодинаково происходит и старение изоляции и не всякий электродвигатель с пробегом 1400 тыс. км обязательно

A new method of measuring the steady-state value of insulation resistance is proposed, which enables the duration of measurements to be reduced considerably. The specific feature of the method is that, in addition to the insulation resistance, its first and second derivatives with respect to time are measured. As a steady-state value of the insulation resistance, the doubled value is taken of such a resistance, whose first derivative has a maximum and the second one equals zero.

Key words: insulation resistance, method of measuring, steady-state value, function, derivatives

нуждается в замене обмотки. Иногда оказывается достаточным более дешевый средний ремонт ТЭД, т.е. чистка, пропитка и сушка изоляции обмотки. Таким образом, если оценивать реальное состояние изоляции, то можно с меньшими затратами продлить ее срок службы без снижения надежности ее работы. Особенно актуальной такая постановка вопроса становится в современных условиях в связи с острым дефицитом меди и изоляционных материалов.

Для того чтобы перейти от системы обслуживания по пробегу к системе обслуживания по реальному техническому состоянию, нужны объективные оценки состояния изоляции. В качестве таких оценок, как показали исследования, можно использовать установившееся значение сквозного тока утечки или сопротивления изоляции, возвратное (восстанавливающееся) напряжение, напряжение саморазряда и коэффициент абсорбции [1]. В предлагаемой статье рассмотрена современная методика измерения первой из указанных выше оценок.

Возможно некоторые положения, приведенные в статье, будут несколько необычны для большинства специалистов. Однако на определенных этапах развития техники необходимо переосмысливать саму методологию определения нормы диагностируемых параметров и отклонений от нее с новых и непривычных для большинства специалистов позиций. Автор надеется, что предлагаемая концепция будет позитивно воспринята специалистами, работающими в этой области и найдет свое практическое применение.

Итак, одной из важных оценок состояния изоляции электрооборудования является величина сквозного тока утечки, которая определяет установившееся значение сопротивления изоляции. Измеряемое на практике одноминутное значение

сопротивления изоляции R_{60} не всегда является установившимся значением, так как часто переходный процесс заряда изоляции, особенно для электрических машин большой мощности, не успевает закончиться через одну минуту. В то же время, чтобы использовать результаты измерений сопротивления изоляции для целей диагностики, они должны быть приведены к одинаковым базовым условиям, к сопоставимому виду [2].

Следовательно, для объективной оценки требуется знать именно установившееся значение сопротивление изоляции. Чтобы измерить его с достаточной точностью, необходимо в этом случае значительно увеличить время измерения, что не всегда приемлемо на практике. Так, например, переходный процесс при приложении напряжения к изоляции мощных генераторов может длиться до одного часа и более [3]. Предлагаемый способ измерения позволяет значительно сократить время измерения установившегося значения сопротивления изоляции [4]. Рассмотрим основные положения этого способа.

При измерении сопротивления изоляции ток i , протекающий через изоляцию после приложения к ней постоянного напряжения U и после очень быстрого затухания емкостного тока, будет изменяться по закону

$$i = I_y + i_a = I_y + \sum_{k=1}^n I_{ak} \exp(-t/T_k).$$

Здесь I_y — установившееся значение сквозного тока утечки через изоляцию; i_a — ток абсорбции, состоящий из суммы n экспонент с максимальным значением I_{ak} и постоянными временем T_k ; t — текущее время.

Как показали исследования, проведенные учеными Российского государственного открытого технического университета путей сообщения (РГОТУПС) на Московском электромеханическом ремонтном заводе (МЭМРЗ), где было исследовано свыше 500 ТЭД типа НБ-406, постоянные времени для быстрых видов поляризации не превышают значения 0,5 с и все эти экспоненты, кроме одной, затухают за время $t_0 < 3$ с. Значения этих экспонент через 3 с составляют менее 0,25% своего начального значения. Таким образом, единственная экспонента, характеризующая медленную поляризацию или структурную поляризацию, называемая ниже током абсорбции, и определяет процесс изменения тока во времени. Следовательно, используя для анализа процесса поляризации двухслойную модель неоднородной изоляции, можно записать закон изменения тока во времени для $t > t_0$ следующим образом [5]:

$$i = I_y + i_a = I_y + I_a \exp(-t/T).$$

Здесь i_a — ток замедленной поляризации или ток абсорбции, создающий внутренний поглощенный заряд — заряд абсорбции; I_a — максимальное значение тока замедленной поляризации (тока абсорбции) в момент времени $t=0$; T — постоянная времени заряда изоляции, характеризующая скорость протекания процесса заряда изоляции током замедленной поляризации; t — текущее время ($t > t_0$).

Хотя приведенная выше формула справедлива только для диапазона $t > t_0$ и при $t < t_0$ она носит чисто расчетный характер, однако полезно все же проанализировать ее во всем диапазоне изменения t ради наглядного представления всего процесса в целом и выявления основных его закономерностей, что и сделано ниже.

Итак, согласно принятым выше допущениям, ток абсорбции i с течением времени уменьшается от максимального значения до нуля и значение сопротивления изоляции R , определяемое по закону Ома, увеличивается в соответствии с выражением

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U}{I_y + I_a \exp(-t/T)}. \quad (1)$$

По истечении длительного времени (при $t \rightarrow \infty$), когда ток абсорбции i_a спадет до нуля, установившееся значение сопротивления изоляции R_y будет определяться только установившимся значением тока I_y :

$$R_y = U/I_y.$$

Изменение сопротивления R во времени зависит от значения постоянной времени T и от соотношения максимального значения тока абсорбции I_a и сквозного тока утечки I_y .

Исследуем функцию $R=R(t)$, представленную формулой (1). Теоретическая область существования функции находится в интервале $-\infty < t < +\infty$, а реальная область существования функции лежит в интервале $0 < t < +\infty$. Анализ показывает, что функция не имеет минимума и максимума и возрастает на всем интервале. В теоретическом интервале функция возрастает от нуля до R_y , а в реальном интервале она возрастает от значения $R_0 = U/(I_y + I_a)$ до значения R_y . Темп нарастания сопротивления изоляции определяет первая производная сопротивления по времени:

$$\frac{dR}{dt} = R' = \frac{U I_a \exp(-t/T)}{T [I_y + I_a \exp(-t/T)]^2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что первая производная имеет максимум, соответствующий точке перегиба кривой $R=R(t)$. Чтобы найти точку перегиба, найдем выражение для второй про-

изводной сопротивления по времени и приравняем его нулю.

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = R'' = \frac{U I_a \exp(-t/T) [I_a^2 \exp(-2t/T) - I_y^2]}{T^2 [I_y + I_a \exp(-t/T)]^4} = 0. \quad (3)$$

Поскольку знаменатель выражения (3) и множитель $I_a \exp(-t/T)$ не равны нулю, то приравняем нулю выражение, стоящее в квадратных скобках числителя. В результате получим:

$$I_a^2 \exp(-2t/T) - I_y^2 = 0.$$

Обозначим время, при котором кривая проходит через точку перегиба через t_{π} . Тогда

$$t_{\pi} = -T \ln(I_y/I_a) = T \ln(I_a/I_y). \quad (4)$$

При $t < t_{\pi}$ $R > 0$ — кривая вогнутая, а при $t > t_{\pi}$ $R < 0$ — кривая выпуклая.

Анализируя выражение (4), можно заключить, что $t_{\pi} > 0$ только в том случае, когда $I_a > I_y$. Если $I_a = I_y$, то $t_{\pi} = 0$. Если же $I_a < I_y$, то $t_{\pi} < 0$, т.е. точка перегиба лежит в области отрицательных значений времени и при измерении сопротивления изоляции не наблюдается.

Подставив значение t_{π} из формулы (4) в выражение (1), получим вторую координату точки перегиба:

$$R_{\pi} = \frac{U}{I_y + I_a \exp(\ln I_y/I_a)} = \frac{U}{2I_y} = \frac{R_y}{2}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что сопротивление в точке перегиба, т.е. в момент максимума первой производной сопротивления по времени равно половине установившегося значения сопротивления изоляции. Отсюда

$$R_y = 2R_{\pi}.$$

Следовательно, установившееся значение сопротивления изоляции R_y можно определить как удвоенное значение того сопротивления изоляции R_{π} , которое соответствует точке перегиба. Точка перегиба определяется путем двойного дифференцирования зависимости $R = R(t)$ и нахождения момента, когда вторая производная становится равной нулю. Это позволяет значительно ускорить процесс измерения.

Если процесс измерения сопротивления изоляции аппаратурно реализуется на аналоговых элементах, то для получения второй производной необходимы два дифференциатора. Если же процесс измерения реализуется на цифровых элементах, то дифференцирование осуществляется с применением известных численных методов.

Зная координату точки перегиба t_{π} , можно определить не только R_y , но и отношение

$$I_a/I_y = \exp(t_{\pi}/T),$$

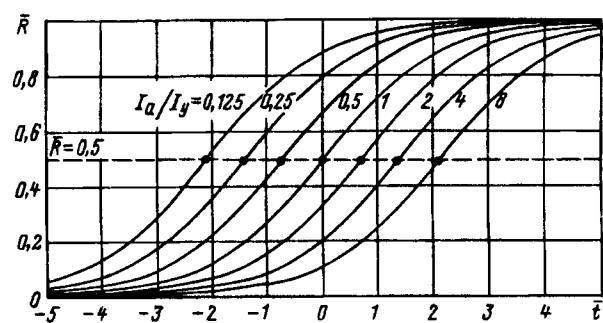


Рис. 1. Зависимости сопротивления изоляции от времени в относительных единицах при разных соотношениях I_a и I_y

которое является важным показателем для оценки состояния изоляции.

На рис. 1 приведены зависимости сопротивления изоляции от времени в относительных единицах при разных соотношениях I_a и I_y . Из рис. 1 видно, что в общем случае сопротивление изоляции R в соответствии с формулой (1) сначала увеличивается медленно, затем быстро и в конце снова медленно, т.е. кривая $R=f(t)$ всегда имеет точку перегиба. Однако при реальных измерениях она наблюдается только при $I_a > I_y$. При $I_a < I_y$ точка перегиба лежит в области отрицательных значений времени, т.е. не может наблюдаться при измерениях. На рис. 2 приведены зависимости первой и второй производных сопротивления от времени в относительных единицах при различных соотношениях I_a и I_y .

Известно, что правила устройств электроустановок требуют, чтобы для высоковольтной изо-

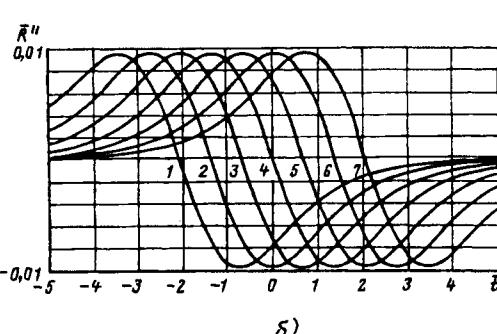
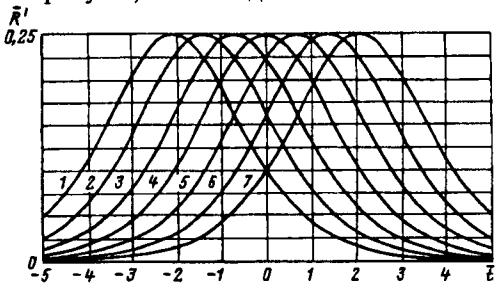


Рис. 2. Зависимости первой (а) и второй (б) производных сопротивления от времени в относительных единицах при различных соотношениях I_a и I_y : 1 — $I_a/I_y = 0,125$; 2 — $I_a/I_y = 0,25$; 3 — $I_a/I_y = 0,5$; 4 — $I_a/I_y = 1$; 5 — $I_a/I_y = 2$; 6 — $I_a/I_y = 4$; 7 — $I_a/I_y = 8$

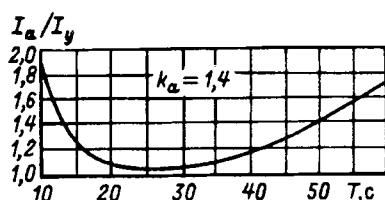


Рис. 3. Зависимость I_a/I_y от постоянной времени T при значении коэффициента абсорбции, равном 1,4

ляции коэффициент абсорбции, равный отношению однominутного значения сопротивления R_{60} к пятнадцатисекундному значению R_{15} , должен быть не менее чем 1,3. Анализ выражения для коэффициента абсорбции

$$k_a = \frac{I_y + I_a \exp(-15/T)}{I_y + I_a \exp(-60/T)} = \frac{1 + (I_a/I_y) \exp(-15/T)}{1 + (I_a/I_y) \exp(-60/T)}$$

показывает, что если взять $k_a > 1,4$ и определить значения I_a/I_y , при которых удовлетворяется это неравенство, то при значениях постоянной времени T , лежащих в интервале 10–60 с, как это показано на рис. 3, отношение I_a/I_y будет больше единицы.

Это значит, что при реальных значениях постоянной времени крупных электрических машин ($T > 12,5$ с) $I_a/I_y > 1$, т.е. величина I_a должна быть не менее I_y . Таким образом, у качественной и сухой изоляции точка перегиба практически всегда лежит в области реального времени, что и дает возможность использовать этот метод на практике.

Описанный способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции был применен на МЭМРЗ, где с разрешения Главного управления локомотивного хозяйства МПС при удовлетворительных оценках изоляции ТЭД при пробегах 1400 тыс. км и выше капитальный ремонт заменялся средним ремонтом. Состояние изоляции оценивалось комплексно по следующим параметрам: сопротивлению изоляции, обратному напряжению и напряжению саморазряда. Ни один из 189 двигателей, прошедших вместо капитального ремонта средний ремонт,

не отказал на линии до следующего ремонта, т.е. до пробега 1750 тыс. км и выше, что позволило сэкономить дефицитные обмоточные материалы, уделевшить ремонт и увеличить пробег двигателя до следующего капитального ремонта.

Особенно эффективен предлагаемый метод при автоматизированных измерениях на крупных электротехнических объектах с применением ЭВМ [6]. Такая автоматизированная система с применением IBM PC и аналого-цифровых преобразователей создана в Нижегородском филиале РГОТУПС для измерения параметров изоляции ТЭД электровозов переменного тока и внедрена в локомотивном депо Горький–Сортировочный [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глинка Т. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным напряжением. — Электричество, 1998, № 1.
- Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
- Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах. Возникновение и методы обнаружения дефектов. — М.: Энергоатомиздат, 1981.
- Пат. 2101716 РФ. Способ измерения установленного значения сопротивления изоляции / А.С. Серебряков. 10.01.1998. Бюл. № 1.
- Техника высоких напряжений / Под ред. Д.В. Разевича. — М.: Энергия, 1976.
- Серебряков А.С., Булычев Г.Ф. Экспериментальное определение структурных параметров двухслойной изоляции. В межвузовском сборнике научных трудов. — В кн.: Применение методов и средств технической диагностики при обслуживании электроподвижного состава. — М.: Изд. ВЗИИТ, 1994.
- Серебряков А.С., Никишин Е.В., Автасев М.А. Автоматизированное устройство контроля изоляции электрооборудования электровозов. — Локомотив, 1996, № 11.

{23.03.97}

Автор: Серебряков Александр Сергеевич окончил электротехнический факультет Горьковского политехнического института в 1961 г. В 1972 г. в Челябинском политехническом институте защитил кандидатскую диссертацию на тему «Агрегаты питания электрофильтров для очистки газов в промышленности». Профессор кафедры электротехники Нижегородского филиала Российского государственного открытого технического университета путей сообщения.

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие биографические сведения об авторах. В связи с этим просим всех авторов при направлении статьи в редакцию сообщить следующие сведения:

- Полные имена и отчества всех авторов
- Какой факультет, какого вуза и когда закончил
- Когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита
- Место настоящей работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

Диэлектрические свойства керамики на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в области релаксационной поляризации

КОСТЮКОВ Н.С., ЛУКИЧЕВ А.А.

Предпринята попытка применить теорию линейных колебаний для описания тепловой релаксационной поляризации в твердых диэлектриках. Использована упрощенная модель одномерного релаксатора с произвольным количеством положений равновесия. Исследована частотная зависимость поляризуемости, получены условия перехода от релаксационных колебаний к гармоническим. Произведена числовая оценка вклада релаксационной поляризации в высокоглиноземистой керамике.

Ключевые слова: твердые диэлектрики, керамика, диэлектрические свойства, тепловая релаксационная поляризация, теория линейных колебаний, исследования

В работе [1] был выполнен расчет диэлектрического спектра керамики на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с использованием теории вынужденных колебаний зарядов, связанных упругими связями. Расчетное значение диэлектрической проницаемости $\epsilon=8,24$ соответствует экспериментальному значению, полученному при комнатной температуре на частоте $4 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ для керамики из чистого Al_2O_3 . Очевидно, что на этой частоте диэлектрическая проницаемость определяется упругими видами поляризации (электронной и упругой ионной). При снижении частоты внешнего поля до 10^6 с^{-1} диэлектрическая проницаемость увеличивается до 9,4, а на частоте 10^2 с^{-1} — до 10,4. По всей видимости, увеличение проницаемости на этих частотах обусловлено релаксационной поляризацией.

При рассмотрении ионной релаксационной поляризации слабосвязанных ионов обычно используется статистическая модель Сканави—Дебая [2, 3], согласно которой слабосвязанный ион может скачками перемещаться внутри потенциальной ямы. В настоящей статье авторы пытаются описать процесс релаксационной поляризации, используя теорию вынужденных колебаний, по аналогии с тем, как это делалось для электронной и упругой ионной поляризации в [1]. При этом исходим из следующих посылок. Ион находится внутри некоторой области размером $2R$ (рис. 1), ограниченной высокими потенциальными барьерами. Вероятность преодоления барьера движущимся ионом пренебрежимо мала. Внутри области имеется n положений равновесия, разделенных невысокими потенциальными барьерами высотой U , протяженность таких областей может быть самой различной, в зависимости от характера структурного дефекта. Область в целом электрически нейтральна. Концентрация слабосвязанных ионов такова, что взаимодействием между ними можно пренебречь.

An attempt is made to apply the theory of linear oscillations for a describing a heat relaxation polarization in solid-state dielectrics. A simplified model of one dimensional relaxator with an arbitrary number of equilibrium positions has been used. The frequency dependence of a polarizability is investigated. Conditions of a transition from relaxation oscillations to harmonic ones are obtained. A numerical estimation of a relaxation polarization contribution in a high-alumina ceramics is carried out.

Ключевые слова: solid-state dielectric, high-alumina ceramics, dielectric properties, heat relaxation polarization, theory of linear oscillations, investigation

ризации, используя теорию вынужденных колебаний, по аналогии с тем, как это делалось для электронной и упругой ионной поляризации в [1]. При этом исходим из следующих посылок. Ион находится внутри некоторой области размером $2R$ (рис. 1), ограниченной высокими потенциальными барьерами. Вероятность преодоления барьера движущимся ионом пренебрежимо мала. Внутри области имеется n положений равновесия, разделенных невысокими потенциальными барьерами высотой U , протяженность таких областей может быть самой различной, в зависимости от характера структурного дефекта. Область в целом электрически нейтральна. Концентрация слабосвязанных ионов такова, что взаимодействием между ними можно пренебречь.

Рассмотрим слабосвязанный ион, находящийся в потенциальной яме, показанной на рис. 1. Под действием теплового движения происходит переброс иона в соседние положения равновесия на расстояния δ , 2δ , ..., R , при этом нарушается электронейтральность элементарного объема и возникает возвращающая сила F , обусловленная кулоновским взаимодействием [4]:

$$F = ax = \frac{q^2 x}{\pi \epsilon_0 \epsilon_\infty R^3}, \quad (1)$$

где a — коэффициент упругости; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; ϵ_∞ — диэлектрическая проницаемость, определяемая быстро устанавливающимися видами поляризации; q — заряд электрона; x — координата частицы.

При наложении на диэлектрик внешнего переменного электрического поля $E=E_0 e^{j\omega t}$ ионы будут колебаться с частотой, близкой к вынуж-

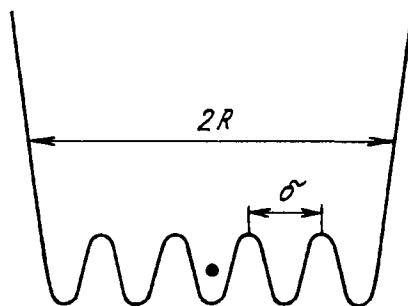


Рис. 1. Положение иона в потенциальной яме

дающей частоте ω . Движение иона, как и в случае упругих колебаний электронов [1], может быть описано уравнением для вынужденных колебаний с затуханием [5]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{q}{M} E_0 e^{j\omega t}, \quad (2)$$

где β — коэффициент затухания; ω_0 — собственная частота свободных колебаний частицы; M — ее масса.

По определению [5] частота собственных колебаний

$$\omega_0^2 = \frac{a}{M} = \frac{q^2}{\pi \epsilon_0 \epsilon_\infty R^3 M}. \quad (3)$$

Выражение для комплексной поляризуемости иона α^* , вытекающее из решения уравнения (2), будет следующим:

$$\begin{aligned} \alpha^* = \alpha' + j\alpha'' &= \frac{q^2}{M} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2} - \\ &- j \frac{2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где α' и α'' — действительная и мнимая части поляризуемости.

Положение максимального значения действительной части поляризуемости α'_{\max} можно получить, дифференцируя α' по переменной ω^2 :

$$\omega^2 = \omega_0^2 - 2\beta\omega_0, \quad (5)$$

откуда

$$\alpha'_{\max} = \frac{q}{M} \frac{1}{4\beta(\omega_0 - \beta)}. \quad (6)$$

Оговоримся, что упрощение $(\omega_0^2 - \omega^2) \approx 2\omega_0 \Delta\omega$, используемое в статье [1] для получения α'_{\max} , в данном случае неприменимо, поскольку значение β сравнимо со значением ω_0 . Условие существования максимума вытекает из (6):

$$\beta = \omega_0/2, \quad (7)$$

т.е. при $\beta \geq \omega_0/2$ на дисперсионной кривой исчезает максимум. Как видно из выражения (6), максимум действительной части поляризуемости обратно пропорционален собственной частоте и квадрату коэффициента затухания β , который, в свою очередь, экспоненциально зависит от температуры.

Коэффициент затухания определяется внутренним трением в диэлектрике, согласно Сканави

[2] он обратно пропорционален времени релаксации слабосвязанного иона τ :

$$\tau = \frac{e^{-\frac{U}{kT}}}{2\nu}, \quad (8)$$

здесь U — энергия активации слабосвязанного иона; k — постоянная Больцмана; T — температура; ν — собственная частота колебаний иона в положении равновесия. Отсюда получаем выражение для коэффициента затухания:

$$\beta = \frac{1}{2\tau} = \nu e^{-\frac{U}{kT}}. \quad (9)$$

От величины β зависит полуширина пика частотной зависимости мнимой части поляризуемости α'' и коэффициента диэлектрических потерь ϵ'' в области резонансных частот $\omega \approx \omega_0$. С другой стороны, согласно теории гармонических колебаний [3] переход от упругих резонансных колебаний к релаксационным происходит при условии

$$\beta \geq \omega_0. \quad (10)$$

Для вынужденных колебаний нет резкого перехода от гармонического режима к релаксационному. Движение частицы подчиняется внешней гармонической силе независимо от величины коэффициента затухания, но с ростом β кривая дисперсии становится все более пологой и возрастает отставание по фазе (в области частот $\omega < \omega_0$) от внешнего поля. Хиппель [5] считает, что основное препятствие для непрерывного перехода от поверхностной к атомной поляризации состоит в том, что первая относится к релаксационным, а вторая — к резонансным процессам. По мнению авторов, резкой границы между этими процессами нет, и одна и также частица может при различных условиях (температура, энергия активации) участвовать либо в резонансных, либо релаксационных колебаниях.

График температурной зависимости объемного сопротивления ρ для диэлектрических материалов $\lg(\rho) = f(1/T)$ состоит из одного или нескольких линейных участков, в пределах которых энергия активации остается постоянной, тогда как время релаксации τ (8) при тех же условиях, может изменяться в широких пределах. Соответственно будет изменяться и коэффициент затухания β (9). Зависимость $\lg(\rho) = f(1/T)$ для керамики из Al_2O_3 типа «Микролит» (рис. 2) имеет один излом при температуре 833К [6]. Как показывают вычисления, ниже температуры излома носители тока имеют энергию активации 0,53 эВ, выше — 1,15 эВ. Коэффициент затухания для носителей с энергией активации 0,53 эВ (на пер-

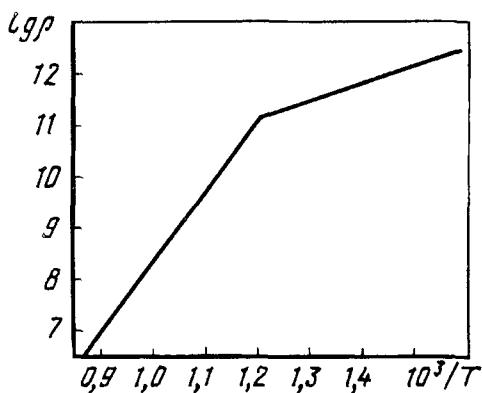


Рис. 2. Логарифмическая зависимость объемного удельного сопротивления высокоглиноземистой керамики типа «Микролит» от обратной температуры

вом участке) изменяется от $6,2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ до $3,8 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, для $U=1,15 \text{ эВ}$ (на втором участке) от $2,6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Точка перелома на зависимости $\lg(\rho)=f(1/T)$ свидетельствует об изменении носителей, участвующих в процессе проводимости. Выше точки перелома в процесс включаются носители, находящиеся на более глубоких энергетических уровнях или изменившие свое состояние под действием температуры.

Рассмотрим возможные значения энергии активации слабосвязанного иона в выражении (9). Очевидно, что энергия активации, вычисленная из температурной зависимости сквозной проводимости, характеризует потенциальные барьера, ограничивающие область с пониженными потенциальными барьерами (см. рис. 1) и значение U в формуле (9) ниже этой величины. По всей видимости, это высота барьера, разделяющая положения равновесия внутри зоны. Используя выражение (9), можно определить значения β в зависимости от температуры для реально возможных энергий активации. На рис. 3 построена расчетная зависимость $\lg(\beta)=f(1/T)$ для энергий активации от 0,1 до 2 эВ. Как

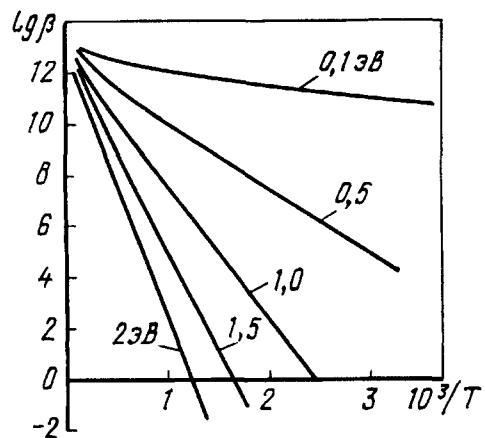


Рис. 3. Логарифмическая зависимость коэффициента затухания от обратной температуры для различных энергий активации

видно из графика, каждому значению ω_0 по условию (10) можно поставить в соответствие температуру перехода от резонансных колебаний к релаксационным.

На рис. 4 показана зависимость максимальной энергии линейного осциллятора от собственной

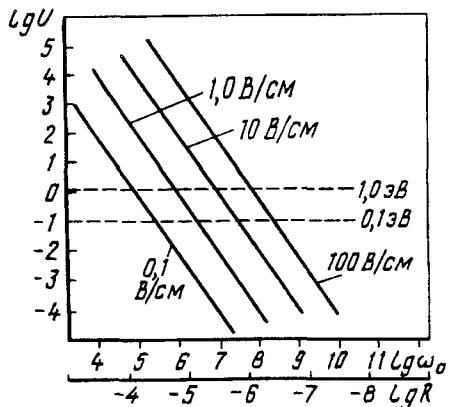


Рис. 4. Зависимость максимальной энергии линейного осциллятора от размера потенциальной ямы для различных напряженностей электрического поля

частоты ω_0 для различных напряженностей внешнего поля. На горизонтальной оси указаны радиусы потенциальных ям и соответствующие им частоты. Видимо, что расстояниям порядка атомной решетки соответствует поглощение в ИК диапазоне; расстояниям, сравнимым с размерами зерен композиционных материалов, соответствует поглощение в области ВЧ и СВЧ; расстояниям, соизмеримым с размерами диэлектрика, соответствует поглощение в области низких частот. Значения температуры, при которой резонансные колебаний переходят в релаксационные, зависит от радиуса R и величины потенциальных барьеров U внутри зоны. Резонансная частота убывает с увеличением радиуса зоны, одновременно снижается температура перехода к релаксации. Таким образом, технологические параметры керамики прямо связаны с ее диэлектрическими свойствами: увеличение размеров $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, недоспеченность и, как следствие, повышенная пористость способствуют увеличению размеров дефектов и росту потерь в области электро- и радиочастот.

Горизонтальными пунктирными линиями на графике ограничена область типовых значений U , от 0,1 до 1 эВ. Из графика следует, что энергия осциллятора превышает значение потенциальных барьеров только на низких частотах; это означает, что линейные колебания в «чистом» виде возможны только на этих частотах: на более высоких частотах можно говорить только о колебаниях среднестатистического иона.

Как показали экспериментальные исследования чисел переноса по методу Тубанта, слабосвя-

занными в «Микролите» являются ионы натрия, вклад остальных ионов в процесс электропроводности на переменном токе можно не учитывать [6]. Учитывая это обстоятельство, продолжим на область радиочастот расчет дизэлектрического спектра «Микролита», выполненный ранее в [1], для УФ, видимого и ИК диапазонов. Элементный химический состав «Микролита»: $\text{Na} = 7,56 \cdot 10^{25}$ яд/ м^3 ; $\text{Mg} = 2,81 \times 10^{25}$ яд/ м^3 ; $\text{Al} = 4,56 \cdot 10^{28}$ яд/ м^3 ; $\text{Si} = 1,96 \times 10^{25}$ яд/ м^3 ; $\text{Ca} = 1,96 \cdot 10^{25}$ яд/ м^3 ; $\text{O} = 6,86 \times 10^{28}$ яд/ м^3 . Оценим вклад слабосвязанных ионов натрия в дизэлектрическую проницаемость в области частот $\omega < \omega_0$.

Выделим упругие виды поляризации в суммах, по которым вычисления выполнялись ранее [1]:

$$\varepsilon = 1 + \frac{n_e \alpha'_e}{\varepsilon_0} + \frac{n_i \alpha'_i}{\varepsilon_0} + \frac{n_{\text{Na}} \alpha'_{\text{Na}}}{\varepsilon_0} = \varepsilon_\infty + \frac{n_{\text{Na}} \alpha'_{\text{Na}}}{\varepsilon_0}, \quad (11)$$

где n_e и n_i — концентрации ионов и ионных связей, участвующих в процессах электронной и упругой ионной поляризации соответственно; α'_e и α'_i — электронная и упругая ионная поляризуемости.

Принимая $\varepsilon_\infty = 8,24$; $n_{\text{Na}} = 7,56 \cdot 10^{25}$ яд/ м^3 ; $R = 10^{-9}$ м; $\varepsilon_0 = 8,89 \cdot 10^{-12}$ Ф/м², по формуле (11) получаем: $\varepsilon = 10,24$. Диэлектрическая проницаемость «Микролита», измеренная на частоте 1 МГц по стандартной методике, равна $9,9 \div 10$.

Выводы. 1. Анализ колебательных процессов в высокоглиноземистой керамике показывает, что резкой границы между резонансной и релаксационной поляризацией нет, что дает возможность рассматривать поляризационные процессы в дизэлектрике с единых теоретических позиций в широком интервале частот, от УФ до НЧ.

2. Выполненный по единой методике расчет

дизэлектрического спектра «Микролита» (99,6% Al_2O_3) дал удовлетворительное совпадение с экспериментальными результатами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Щербакова Е.В. Некоторые аспекты влияния нейтронного облучения на оптические и дизэлектрические свойства керамических материалов в видимой, УФ и их областях: Автoref. дис... канд. физ.-мат. наук. Благовещенск, 1997.
- Сканави Г.И. Физика дизэлектриков. Область слабых полей. — М.; Л.: ГИТТЛ, 1949.
- Хиппель А.Р. Дизэлектрики и волны. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960.
- Костюков Н.С., Лукичев А.А. Релаксационная поляризация в твердых дизэлектриках. — Вестник АмурНЦ, сер. 1. Физика, химия, астрономия, 1997, вып. 1.
- Яворский Б.И., Детлаф А.А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1977.
- Костюков Н.С. Действие излучения на керамические электроизоляционные материалы: Дис. доктора техн. наук. М., 1972.

[23.02.98]

Авторы: Костюков Николай Сергеевич в 1949 г. окончил физико-математический факультет Воронежского государственного университета. В 1972 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Действие излучения на керамические электроизоляционные материалы» в Томском политехническом институте. Заведующий лабораторией композиционных материалов и керамики Амурского комплексного научно-исследовательского института Дальневосточного отделения ДВО РАН Благовещенск.

Лукичев Александр Александрович окончил физико-технический факультет Уральского политехнического института в 1981 г. Старший научный сотрудник лаборатории химического анализа Амурского комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала (Б. Черкасский пер., 2/10, тел. 924-24-80).

Дискуссии

Оптимизация магнитного режима трехфазных асинхронных двигателей малой мощности

СМИРНОВ Ю.В.

Специфические особенности трехфазных асинхронных двигателей малой мощности (ТАДММ), к которым можно условно отнести двигатели мощностью до 1 кВт, вызывают необходимость выделить их в обособленную группу [1]. Серийные ТАДММ, спроектированные на основе общей теории асинхронных двигателей и обладающие такими же соотношениями базовых размеров, что и двигатели средней мощности, имеют при большой удельной материалоемкости низкую удельную электромагнитную силу, а также неэффективное использование активных материалов. Это вызвано тем, что с уменьшением диаметра ротора существенно сокращается пространство как для размещения обмоток, так и для прохождения продольной составляющей магнитного потока, а с другой стороны, уменьшается магнитное сопротивление на пути поперечной составляющей магнитного потока, не участвующей в создании врачающего момента. Кроме того, по мере снижения мощности двигателя уменьшается диаметр провода обмотки статора, а следовательно, резко увеличивается активное сопротивление обмотки, которое существенно превышает индуктивное сопротивление расстояния.

Вышеуказанные особенности серийных ТАДММ приводят к неоптимальному распределению электромагнитных нагрузок между статором и ротором, при котором чрезмерно велика мощность потерь в обмотках статора по сравнению с мощностью потерь в стали и обмотках ротора. Поэтому актуальной представляется разработка специализированной серии ТАДММ с оптимальной «геометрией», обеспечивающей перераспределение электромагнитных нагрузок между статором и ротором и позволяющей повысить эффективность использования активных материалов. Однако можно существенно улучшить характеристики и серийных ТАДММ, выбрав оптимальный магнитный режим.

Особенности ТАДММ сходны с таковыми для трансформаторов малой мощности (ТММ), теория которых полностью сформировалась, а конструкции и режимы работы в отличие от ТАДММ оптимизированы. В [2] доказано, что при оптимальном магнитном режиме ТММ одновременно близки к минимальным значениям ток первичной обмотки, суммарные потери мощности и превышение температуры обмоток. У ТММ для

обеспечения оптимального магнитного режима ток намагничивания при холостом ходе принимается близким по значению номинальному первичному току, а при наименьших габаритах ТММ и превышает его. При оптимизации магнитного режима ТММ по методике [2] задаются числом витков первичной обмотки и, определив при каком-либо критерии оптимизации значение магнитной индукции, а следовательно, оптимальное значение напряжения, приходящееся на виток, пересчитывают затем число витков первичной обмотки на заданное напряжение питания. Такой подход позволяет, имея прототип с известным числом витков первичной обмотки, найти при выбранном критерии оптимизации магнитную индукцию и, соответственно, число витков, определяющие оптимальный магнитный режим. При этом оптимальное значение магнитной индукции ТММ легко находится экспериментально путем варьирования проводимого напряжения при постоянной мощности нагрузки.

По сравнению с ТММ оптимизация магнитного режима ТАДММ является более трудной и многозначной задачей из-за более сложной структуры магнитной цепи, включающей воздушный зазор и зубцово-пазовые зоны, а также более сложного пути прохождения магнитного потока по магнитопроводу, изменяющегося в зависимости от нагрузки [1]. Однако методика [2] применима и при оптимизации магнитного режима ТАДММ. В предлагаемой статье показана возможность оптимизации магнитного режима ТАДММ, позволяющая повысить мощность двигателей и увеличить значения пускового и максимального врачающих моментов.

Большинство ТАДММ предназначено для работы в заданном режиме и, как правило, при постоянной нагрузке, близкой к номинальной, а режим холостого хода либо отсутствует, либо кратковременен. Магнитный режим таких ТАДММ и предполагается оптимизировать. Таким образом, кроме серийных ТАДММ с каталогными данными, предлагается создать модификацию оптимизированных ТАДММ, предназначенных для работы в номинальном режиме.

У ТАДММ в отличие от ТММ магнитная цепь включает существенный воздушный зазор, определяющий основную часть магнитного сопротивления на пути продольной составляющей магнит-

ного потока. В то же время у серийных ТАДММ ток холостого хода меньше номинального тока. Поэтому по аналогии с ТММ для оптимизации магнитного режима ТАДММ следует повысить электромагнитную и тепловую нагрузки двигателей в режиме холостого хода за счет снижения числа витков обмотки статора при соответствующем увеличении диаметра провода. Это позволяет повысить номинальный ток и номинальную ЭДС обмотки статора, т.е. увеличить номинальную мощность двигателя, а также уменьшить активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазных обмоток.

Ресурс повышения магнитной индукции в воздушном зазоре ТАДММ у каждого двигателя определяется зависимостями намагничивающей мощности Q_μ и мощности потерь в стали ΔP_c от фазного напряжения обмотки статора U_1 . На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости $Q_\mu(U_1)$ (а) и $\Delta P_c(U_1)$ (б) для двигателей АИР56А4УЗ, 120 Вт, 1350 об/мин (1), АИР56В4УЗ, 180 Вт, 1350 об/мин (2) и АИР56А2УЗ, 180 Вт, 2730 об/мин (3). Из графиков следует, что магнитные режимы двигателей существенно различны, причем наименьшую электромагнитную нагрузку имеет двигатель АИР56А4УЗ, а наибольшую — двигатель АИР56В4УЗ. Небольшое увеличение суммарной мощности потерь при оптимальном магнитном режиме ТАДММ приемлемо, поскольку номинальное превышение температуры обмоток статора серийных двигателей существенно ниже допустимого значения.

Модернизация серийных ТАДММ при оптимизации магнитного режима заключается только в уменьшении числа витков обмотки статора и не представляет трудностей. При оптимизации магнитного режима конкретного ТАДММ за прототип принимаем серийный двигатель с известными значениями числа витков фазной обмотки статора w_{1n} , активного сопротивления фазной обмотки статора R_{1n} и номинального фазного тока обмотки статора I_{1n} . У модернизированного двигателя с

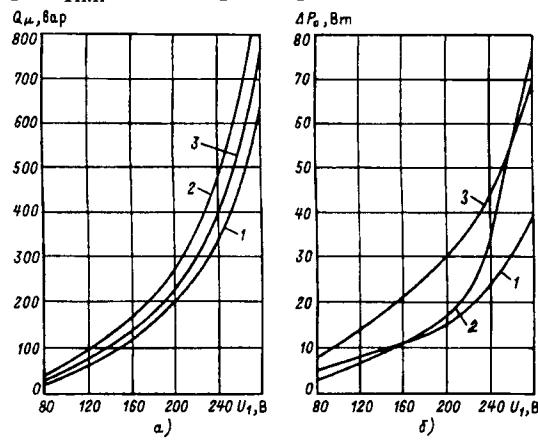


Рис. 1

оптимальным магнитным режимом соответственно число витков фазной обмотки статора w_1 , активное сопротивление фазной обмотки статора R_1 и номинальный фазный ток обмотки статора I_{1n} .

При одинаковых значениях коэффициента заполнения пазов статора и номинальной плотности тока в обмотках статора для относительных значений величин, определяющих электромагнитный режим оптимизированных двигателей, имеем:

$$\frac{R_1}{R_{1n}} = \left(\frac{w_1}{w_{1n}} \right)^2; \quad (1)$$

$$I_{1n}/I_{1n.p} = w_{1n}/w_1; \quad (2)$$

$$\Delta U_a/\Delta U_{1ap} = I_{1n} R_1 / I_{1n.p} R_{1n} = \frac{w_1}{w_{1n}}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{1n}/\Delta P_{1n.p} = I_{1n}^2 R_1 / I_{1n.p}^2 R_{1n} = 1, \quad (4)$$

где ΔU_{1a} , ΔP_{1n} — активное падение напряжения и мощность потерь в обмотках статора при номинальном режиме оптимизированного двигателя; $\Delta U_{1a.p}$ и $\Delta P_{1n.p}$ — те же величины прототипа.

Таким образом, при оптимизации магнитного режима ТАДММ мощность потерь в обмотках статора, составляющая основную долю суммарных потерь мощности, не изменяется, а активное сопротивление обмоток статора и падение напряжения в обмотках уменьшаются. Аналогично отношению (1) уменьшается и индуктивное сопротивление рассеяния обмоток статора.

На рис. 2 показаны векторные диаграммы номинальных режимов прототипа и оптимизированного двигателя с учетом графиков рис. 1 и соотношений (1)–(4). Непосредственно из векторных диаграмм рис. 2 для оптимизированного двигателя и прототипа имеем:

$$\begin{cases} E_{1n} \sin \beta = U_1 \cos \varphi_1 - I_{1n} R_1; \\ E_{1n} \cos \beta = U_1 \sin \varphi_1 - I_{1n} X_1; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_{1n.p} \sin \beta_p = U_1 \cos \varphi_{1p} - I_{1n.p} R_{1n}; \\ E_{1n.p} \cos \beta_p = U_1 \sin \varphi_{1p} - I_{1n.p} X_{1n}; \end{cases} \quad (6)$$

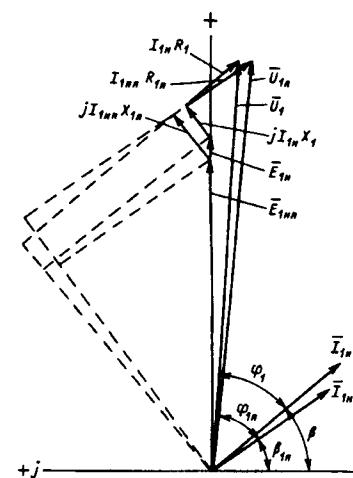


Рис. 2

где U_1 — фазное напряжение питающей сети; E_{1n} , X_1 , φ_1 , β — соответственно ЭДС обмотки статора, индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора, угол между векторами фазной ЭДС и фазного тока и угол между векторами фазного тока и продольной составляющей магнитного потока в номинальном режиме оптимизированного двигателя; $E_{1n,p}$, X_{1n} , φ_{1n} и β_p — те же величины при номинальном режиме прототипа.

Учтя, что $\varphi_1 \approx \varphi_{1n}$ и $R_1/X_1 \approx R_{1n}/X_{1n}$, а также приняв во внимание (3), из (5) и (6) получим:

$$\frac{E_{1n}}{E_{1n,p}} = \sqrt{\frac{\left(\cos \varphi_1 - \frac{w_1}{w_{1n}} \frac{I_{1n,p} R_1}{U_1}\right)^2 +}{\left(\cos \varphi_1 - I_{1n,p} R_1 / U_1\right)^2 +}} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{\left(\sin \varphi_1 - \frac{w_1}{w_{1n}} \frac{I_{1n,p} R_{1n} \cdot X_1}{U_1 R_1}\right)^2 +}{\left(\sin \varphi_1 - \frac{I_{1n,p} R_{1n}}{U_1} \frac{X_1}{R_1}\right)^2}. \quad (7)$$

Относительное значение номинальной мощности оптимизированного двигателя равно:

$$\frac{P_n}{P_{n,p}} \approx \frac{I_{1n}}{I_{1n,p}} \frac{E_{1n}}{E_{1n,p}} \frac{\sin \beta}{\sin \beta_p}. \quad (8)$$

С учетом (2), (3), (5) и (6) из (8) найдем:

$$\frac{P_n}{P_{n,p}} \approx \frac{\frac{w_{1n}}{w_1} \cos \varphi_1 - \frac{w_1}{w_{1n}} \frac{I_{1n,p} R_{1n}}{U_1}}{\cos \varphi_1 - \frac{I_{1n,p} R_{1n}}{U_1}}. \quad (9)$$

У модернизированного двигателя повышается жесткость механической характеристики на ее рабочем участке, поэтому относительное значение номинального врачающего момента $M_n/M_{n,p}$ несколько выше, чем $P_n/P_{n,p}$. Получить выражения для относительных значений пускового и максимального врачающих моментов модернизированного двигателя затруднительно, однако можно утверждать, что эти значения превышают величину $\left(\frac{E_{1n}}{E_{1n,p}}\right)^2$.

При оптимизации магнитного режима ТАДММ в качестве критерия оптимизации можно принять минимум суммарной мощности потерь в двигателе. При этом оптимальный магнитный режим двигателя совпадает с оптимальным тепловым режимом. Проведенные исследования показали, что у серийных ТАДММ минимум суммарной мощности потерь соответствует 20–40% номинальной нагрузки, т.е. магнитный режим серийных ТАДММ далеко не оптимален.

Используя методику, предложенную в [2] для ТММ, были экспериментально получены рабочие режимы различных ТАДММ при нескольких повышенных значениях фазного напряжения обмотки статора и варьировании нагрузки от холостого хода до значения $1,2M_n$. В отличие от

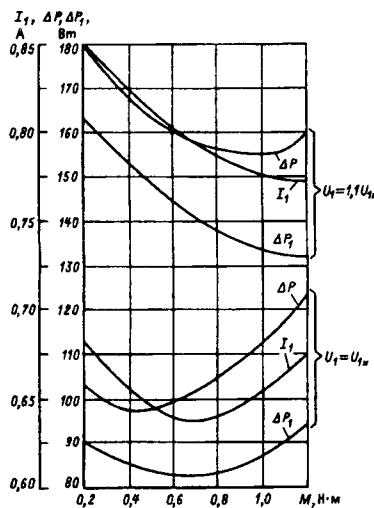


Рис. 3

ТММ у ТАДММ минимум суммарной мощности потерь ΔP имеет место при меньшей нагрузке по сравнению с минимумом фазного тока статора, который в свою очередь совпадает с минимумом мощности потерь в обмотках статора ΔP_1 . По мере повышения фазного напряжения

U_1 указанные минимумы перемещаются в зону увеличения нагрузки. При этом с учетом зависимостей режима холостого хода (рис. 1) и выражения (4) можно найти уровень напряжения U_1 , имитирующий оптимальный магнитный режим двигателя.

На рис. 3 показаны зависимости $\Delta P(M)$, $I_f(M)$ и $\Delta P_1(M)$ для серийного двигателя АИР56А4УЗ при $U_1 = U_{1n}$ и $U_1 = 1,1U_{1n}$. В соответствии с графиками при $w_1/w_{1n} \approx 0,91$ номинальный врачающий момент модернизированного двигателя на 28% превышает номинальный врачающий момент серийного двигателя. При этом, как следует из рис. 1, б, мощность потерь в стали возрастает на 7 Вт. Мощность же потерь в обмотках статора остается неизменной и равной 83 Вт.

Для рассматриваемого двигателя после модернизации ожидается увеличение пускового и максимального врачающих моментов примерно в 1,5 раза. При модернизации ТАДММ с большей электромагнитной нагрузкой достигаемые показатели будут несколько ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Ю.В. Определение характеристик трехфазных асинхронных двигателей малой мощности. — Электричество, 1996, № 8.

2. Смирнов Ю.В. Оптимальный магнитный режим трансформаторов малой мощности. — Изв. вузов. Электромеханика, 1979, № 9.

Автор: Смирнов Юрий Васильевич окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института по специальности «Автоматизированный электропривод» в 1956 г. В 1963 г. защитил кандидатскую диссертацию в Ленинградском электротехническом институте по теме «Применение регуляторов напряжения переменного тока и неуправляемых выпрямителей в системах электропривода постоянного тока». Доцент Московского государственного индустриального института.

Создание экономичных асинхронных двигателей малой мощности

ЛОПУХИНА Е.М., СЕМЕНЧУКОВ Г.А., ЗАХАРЕНКО А.Б.

Данная статья написана как отклик на помещенную выше статью Ю.В. Смирнова «Оптимизация магнитного режима трехфазных асинхронных двигателей малой мощности» и затрагивает актуальную проблему создания энергосберегающих двигателей в одностороннем плане оптимизации магнитного режима.

Рассмотрим этот вопрос в двух аспектах: системный подход к проектированию двигателей малой мощности, включая и энергосберегающие модификации;

конкретные материалы статьи Ю.В. Смирнова, решающие, по мнению автора, эту задачу.

Массовый объем производства и широкое применение асинхронных двигателей, особенно малой мощности, стали причиной того, что серии асинхронных двигателей превратились в очень сложную систему — инфраструктуру, с которой связаны все отрасли хозяйства как в качестве потребителей, так и поставщиков. Асинхронный двигатель как объект проектирования входит в упорядоченную иерархию объектов и выступает как часть системы более высокого уровня — хозяйства страны в целом [1–5].

В то же время серия асинхронных двигателей выступает как система высшего уровня по отношению, например, к различным исполнениям и модификациям машины. Асинхронный двигатель включает такие подсистемы, как электромагнитная, механико-конструктивная, тепловентиляционная и др., которые могут быть подвергнуты дальнейшему дроблению.

В связи с этим в процессе проектирования можно выделить этапы внешнего проектирования, когда объект рассматривается как часть системы более высокого ранга, и этапы внутреннего проектирования, когда объект рассматривается как совокупность компонентов. В настоящее время центр тяжести работ по проектированию новых серий асинхронных двигателей сместился от решения научных проблем по увязке электромагнитных, механических и тепловых нагрузок с геометрией машины к системным проблемам применения новых материалов, технологии и организации производства, максимального удовлетворения требований потребителей по эксплуатации.

При решении этой задачи чрезвычайно важна полнота учета всех целей и возможных последствий выполняемой разработки, а также всех

доступных ресурсов и средств достижения целей и информационных связей между целями и средствами. Для обеспечения полноты охвата целей и средств их достижения применяется специальный прием — построение дерева целей и дерева средств [4]. Построение дерева целей связано с разделением их на несколько иерархических уровней, начиная с некоторой глобальной единой цели (верхнего уровня) и заканчивая элементарными целями, как правило, легко поддающимися численной оценке (нижним уровнем). Каждый более высокий уровень — обобщение для предыдущего. Вместе с тем, каждый уровень интегрирует практически все цели, которые можно рассматривать как критерии при выборе оптимальных вариантов.

Задача проектирования, в том числе и асинхронных двигателей, всегда многокритериальная [6]. При системном подходе все критерии оптимальности, которые надо учитывать, группируются на каком-то одном иерархическом уровне дерева целей. Наиболее достоверно могут быть определены численные значения для элементарных критерииев самого нижнего уровня. Среди этих критерииев многие противоречат друг другу, и это делает задачу выбора оптимального варианта неопределенной. Попытки объединения различных критерииев с целью сведения задачи к однокритериальной означает перенос неопределенности из области принятия решения в область формирования критерииев. Какой подход предпочтеть — это диалектический вопрос, решаемый в каждом случае по-своему в зависимости от многих факторов, среди которых немалую роль играет и квалификация лица, принимающего решение, и требуемая быстрота его принятия. Наилучшим образом удается сочетать критерии оптимальности у двигателей специального назначения, проектируемых для конкретного привода, например, для компрессора холодильника или для стиральной машины. В этом случае комплекс требуемых свойств является наиболее определенным, зависящим от требований приводимого механизма.

Двигатели общего назначения, к которым относится серия АИ [1], предназначены для работы с различными механизмами, требования которых могут значительно отличаться. В результате многие показатели принимаются усредненными. При проектировании приходится ориентироваться на

национальные стандарты и публикации МЭК. Двигатели работают при номинальной мощности только как исключение, коэффициент нагрузки колеблется в пределах 0,6–1,1 в зависимости от принятой шкалы номинальных мощностей. Особенность асинхронных двигателей малой мощности — более высокий предел коэффициента нагрузки. У двигателей средней и большой мощности он не должен превышать единицы. Возможность превышения верхнего предела коэффициента нагрузки для двигателей малой мощности обоснована в работах К.А. Алиханяна.

Задача максимального приспособления двигателей общего назначения к требованиям конкретного привода решается на пути разработки большого количества модификаций. Это требует большой гибкости как технологических, так и конструкторских решений, а также проектных процедур. Эта проблема решается на базе современных САПР и АСУТПП. Наиболее продвинулись в решении этой задачи при создании новой серии асинхронных двигателей РА на Ярославском электромеханическом заводе [7].

В настоящее время большое внимание уделяется снижению энергопотребления асинхронных двигателей. Для машин общего применения эта задача решается за счет регулирования напряжения (например, с помощью ШИМ) до значения, обеспечивающего минимум потерь на текущей нагрузке [8–10]. Для наилучшего использования этого перспективного подхода к экономии электроэнергии целесообразна разработка асинхронных двигателей, имеющих максимальный КПД при наибольшем допустимом коэффициенте нагрузки. Это единственное, в чем Ю.В. Смирнов прав в своей статье. Однако он полностью забывает о таких важных критериях, как кратности максимального и пускового моментов, нагрев, надежность, вибрационные показатели и др.

Ряд значений показателей, приведенных в обсуждаемой статье, представляется ошибочным, что заставляет усомниться в достоверности выводов автора.

Наши расчеты, проведенные для двигателя АИР56А4, а также экспериментальные данные завода-изготовителя (рис. 1) совершенно расходятся с данными Ю.В. Смирнова. Мощность потерь и ток статора при номинальном напряжении по мере перехода от холостого хода к номинальной нагрузке все время возрастают (рис. 1), никакого их минимума не наблюдается. Мощность потерь и ток двигателя, рассчитанные нами по программе АКДЗ [4, 11] с учетом нагрева машин на ПЭВМ, значительно ниже, чем у Ю.В. Смирнова. По его данным, КПД двигателя при номинальной нагрузке составляет 53,8%, что

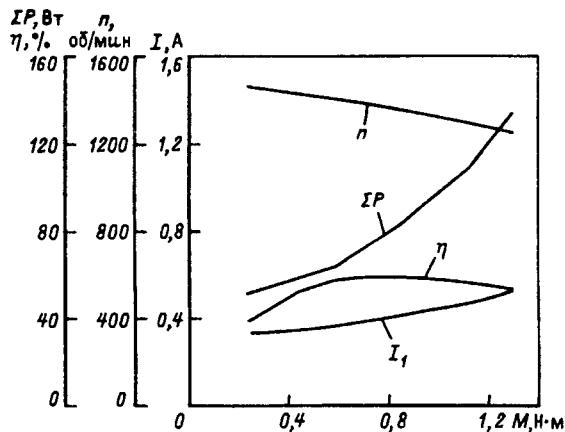


Рис. 1. Экспериментальные электромеханические характеристики двигателя АИР56А4 по данным завода-изготовителя ($U_{\Phi}=220$ В)

значительно ниже паспортного значения 63%. Наши расчетные (57,8%) и экспериментальные (59,6%) значения находятся в пределах допускаемых ГОСТ отклонений.

Утверждения Ю.В. Смирнова в тексте статьи резко расходятся с его же данными на рисунках. Например, он утверждает, что потери в обмотках статора при номинальном напряжении и при повышенном на 10% одинаковы (соответственно при номинальном моменте в первом случае и при повышенном на 28% моменте во втором случае) и составляют 83 Вт. По данным рис. 3 статьи Ю.В. Смирнова, это справедливо только в первом случае, при повышенном же напряжении мощность потерь в обмотке статора больше 130 Вт при любых нагрузках.

Не выдерживает критики утверждение Ю.В. Смирнова, что при увеличении напряжения на 10% следует ожидать увеличения пускового и максимального моментов в 1,5 раза. Известно, что с достаточной точностью момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения и, следовательно, может возрасти на 21%. Таким образом, при увеличении номинального момента на 28%, как предлагает Ю.В. Смирнов, снижаются кратности максимального и пускового моментов до $k_M=1,37$ и $k_n=1,5$ по сравнению с требованиями ГОСТ ($k_M=2,2$ и $k_n=2,3$). К неточностям обсуждаемой статьи относится и утверждение, что суммарная мощность потерь при повышенной на 28% нагрузке при номинальном ($U_{\Phi}=220$ В) и повышенном на 10% ($U_{\Phi}=242$ В) напряжениях равны соответственно $\Sigma P=120$ и 155 Вт. По нашим же расчетам наблюдается обратный результат $\Sigma P_{(U=220 \text{ В})}=128$ Вт и $\Sigma P_{(U=242 \text{ В})}=121$ Вт (рис. 2 и 3), т.е. меньшие потери имеют место при большем напряжении. Поскольку мы не проверяем других напряжений, вопрос об оптимальности этого режима не может быть решен окончательно.

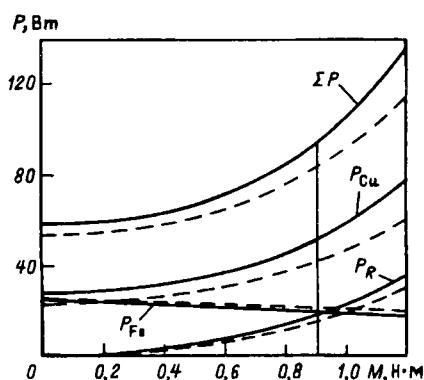


Рис. 2. Зависимость потерь мощности от вращающего момента на валу ($U_{\phi}=220$ В): — нагретое состояние ($t=75^{\circ}\text{C}$); - - - - - холодное состояние ($t=20^{\circ}\text{C}$)

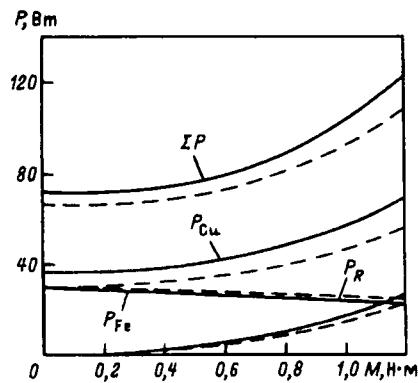


Рис. 3. Зависимость потерь мощности от вращающего момента на валу ($U_{\phi}=242$ В): — нагретое состояние ($t=75^{\circ}\text{C}$); - - - - - холодное состояние ($t=20^{\circ}\text{C}$)

Остается также открытым вопрос о допустимой перегрузке двигателя, поскольку она сопровождается увеличением потерь и превышением допустимой температуры обмоток машины. По данным завода-изготовителя, двигатели АИР56А4 весьма напряжены в тепловом отношении. Экспериментальное превышение температуры обмотки статора при номинальной нагрузке и номинальном напряжении составляет $65-70^{\circ}\text{K}$ при мощности потерь $85-90$ Вт. Это близко к предельно допустимым значениям с учетом принятого запаса, обеспечивающего повышенную надежность. Допустимую перегрузку лучше определять по данным К.А. Алиханяна [5].

Ю.В. Смирнов ошибочно утверждает, что машины малой мощности проектируются так же, как и машины средней мощности, — без учета их особенностей, игнорируя обширную и содержательную литературу по этому вопросу [3, 5, 6-16].

Таким образом, только более глубокий подход с использованием автоматизированных методов оптимизации позволяет полностью решить задачу создания энергосберегающих асинхронных двигателей малой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радин В.И., Лондин Й., Розенкопф В.Д. и др. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Под ред. В.И. Радина. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Геминтери В.И., Нахамкин А.И., Радина Е.В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин малой мощности. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Тазов Г.В., Хрущев В.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. Уч. пособие для вузов. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. — М.: Изд.-во МЭИ, ч. I, 1997; ч. II, 1998.
5. Алиханян К.А. Вопросы проектирования серий асинхронных электродвигателей малой мощности: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Л., 1976.
6. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Многоуровневая математическая модель и перспективы развития САПР асинхронных двигателей общего назначения. — Электротехника, 1988, № 9.
7. Макаров Л.Н., Ахунов Т.А., Попов В.И. Создание новой российской серии асинхронных машин. — Электричество, 1995, № 11.
8. Радин В.И., Радина Е.В. Снижение потерь электроэнергии в асинхронных двигателях. — Электротехника, 1982, № 6.
9. Радина Е.В. Алгоритм регулирования напряжения асинхронных двигателей. — Электротехника, 1983, № 5.
10. Радина Е.В. Снижение потерь электрической энергии в асинхронных двигателях приводов с вентиляторной нагрузкой. — Электротехника, 1983, № 10.
11. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных двигателей с применением ЭВМ. — М.: Высшая школа, 1980.
12. Блавдзевич Ю.Г. О выборе критерия оптимальности и лимитеров при проектировании асинхронных микродвигателей. — Проблемы технической электродинамики, Киев, 1970, вып. 22.
13. Надежность и качество электрических машин малой мощности / Под ред. В.В. Хрущева. — М.: Энергия, 1971.
14. Дадиванян Р.И. Анализ магнитной цепи асинхронного двигателя. — Электротехника, 1976, № 10.
15. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. — М.: Энергия, 1968.
16. Лопухина Е.М., Бернатович В.И. Учет влияния конструктивно-технологических факторов в поисковых оптимизационных расчетах асинхронных двигателей малой мощности. — Сб. трудов МЭИ, 1983, № 699.

Авторы: Лопухина Елена Моисеевна окончила электромеханический факультет Московского гидроэнергетического института (МЭИ) в 1941 г. В 1947 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Теоретические и экспериментальные исследования асинхронных исполнительных двигателей с полым ротором». Доцент кафедры электромеханики МЭИ.

Семенчуков Геннадий Алексеевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1962 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Анализ оптимальных соотношений в однофазных асинхронных двигателях». Доцент кафедры электромеханики МЭИ.

Захаренко Андрей Борисович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1995 г. В 1998 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными элементами методом передаточных функций». Научный сотрудник ЗАО Инкар.

Заметки и письма

Дешифраторный суперключ для инженерного проектирования линейных электрических цепей

ПЯТИН Ю.М.

Общим случаем многоузловой электрической цепи является схема, в которой все узлы соединены ветвями. Наименьшее число уравнений, описывающих такую цепь, даёт метод узловых напряжений. В этом случае система уравнений имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} +a_{11}x_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1n}x_n = b_1; \\ -a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \dots - a_{2n}x_n = b_2; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ -a_{n1}x_1 - a_{n2}x_2 - \dots + a_{nn}x_n = b_n, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где x — узловое напряжение; $a_{\alpha\beta}$ — проводимость ветви; $a_{\alpha\alpha}$ — узловая проводимость; b_α — алгебраическая сумма токов. Если ветвь $\alpha\beta$ отсутствует, то $a_{\alpha\beta}=0$.

Корни этой системы выражаются формулой Крамера:

$$x_\alpha = D_\alpha/D, \quad (2)$$

которая является лишь первым этапом решения, достигаемого только после разложения определителей D_α и D сначала на адьюнкты, а затем на полиномы P_α и P . Общее число адьюнктов в формуле Крамера равно n^2 . Определитель системы D выражается здесь формулой

$$D = a_{10}A_{11} + a_{20}A_{21} + \dots + a_{n0}A_n. \quad (3)$$

Тогда формула (2) принимает вид:

$$x_\alpha = (b_1 A_{1\alpha} + b_2 A_{2\alpha} + \dots + b_n A_{n\alpha}) / \\ / (a_{10} A_{11} + a_{20} A_{21} + \dots + a_{n0} A_{n1}). \quad (4)$$

Органическим недостатком этой формулы является множество заведомо сокращающихся отрицательных членов в адъюнктах ее знаменателя. Процесс их скращения весьма трудоемок, ибо числа остающихся $N_{\text{ост}}$ и сокращающихся $N_{\text{сокр}}$ членов выражаются формулами:

$$N_{\text{oct}} = (n+1)^{n-1}; \quad N_{\text{cokp}} = 2[n^n - (n+1)^{n-1}], \quad (8)$$

где n — порядок системы.

Число $N_{\text{сокр}}$ очень быстро растет с увеличением числа уравнений и достигает величины 262 уже при $n=4$. Здесь уместно отметить одну важную особенность остающихся членов: их неотъемлемым признаком является сомножитель a_{α_0} .

Невозможность сократить отрицательные члены приводит к тому, что знаменатель формулы Крамера можно представить в виде разности: $D=A-B$. Но в этом случае формула Крамера пригодна только для поверочных расчетов, когда значения всех параметров объекта уже известны, и совершенно непригодна для целей анализа свойств объекта, так как максимум значения корня должен наступать здесь при $D=0$. Но в этом случае система уравнений (1) становится несовместной и решения не имеет. Отсюда следует, что для решения проблемы анализа свойств физического объекта и его оптимизации по критериям качества необходима разработка метода, позволяющего получать выражение знаменателя D в виде, изначально свободном от отрицательных членов.

Дешифраторный метод. Этот метод позволяет сразу, минуя процесс разложения определителя, получать ответ, не решая систему уравнений в виде, изначально свободном от отрицательных членов. В [1] показано, что произведение элементов главной диагонали определителя системы содержит в зашифрованном виде информацию о корнях системы. Для расшифровки там предложены дешифраторный ключ и специальный оператор, названный гамма-оператором. А в [2] найден способ получения дешифраторных ключей, изначально свободных от отрицательных членов.

Получение дешифраторного ключа. У системы, состоящей из n уравнений, основной дешифраторный ключ K_{1n} имеет такую же структуру, как и определитель D_{n-1} , порядок которого на единицу меньше. Поэтому дешифраторный ключ K_{1n} выражается формулой определителя D_{n-1} , в которой все индексы увеличены на единицу. Для того чтобы ключ K_{1n} изначально был

свободен от отрицательных членов, необходимо и достаточно заранее освободить от них определитель D_{n-1} . Для нахождения изначально свободного от отрицательных членов ключа $K_{1(n+1)}$ следующего порядка достаточно найти с помощью ключа K_{1n} определитель D_n и увеличить на единицу все его индексы. Начинать таблицу ключей следует с определителя второго порядка, имеющего лишь одну пару сокращающихся членов.

Оператор гамма. Запись символа γ над коэффициентом $a_{\alpha\beta}$ означает операцию

$$\gamma \quad a_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} + a_{\alpha 0}. \quad (6)$$

Правила простановки символа оператора даны в разделе Решение системы уравнений.

Таблица основных ключей. На практике часто приходится решать системы уравнений не выше пятого порядка. Для этого достаточно иметь выражения первых четырех дешифраторных ключей, приведенных в таблице. Ключи более высокого порядка находят по способу, изложенному выше. Для придания формулам ключей необходимой компактности и четкости здесь принята запись в индексах: $a_{\alpha\beta} \Rightarrow a_{\alpha\beta}$. Тогда

$$K_{12} = 21; \quad K_{13} = 21(31+32) + 31 \cdot 23;$$

$$K_{14} = 21[(31+32)(41+42+43) + 34(41+42)] + \\ + 31[23(41+42+43) + 24 \cdot 43] + 41[24(31+32+34) + 23 \cdot 34];$$

$$K_{15} = 21B_1 + 31B_2 + 41B_3 + 51B_4,$$

$$\text{где } B_1 = (31+32)[(41+42+43)(51+52+53+54) + \\ + 45(51+52+53)] + (41+42)[34(51+52+53+54) + \\ + 35 \cdot 54] + (51+52)[35(41+42+43+45) + 34 \cdot 45]; \\ B_2 = 23[(41+42+43)(51+52+53+54) + 45(51+52+53)] + 43[24(51+52+53+54) + 25 \cdot 54] + 53[25(41+42+43+45) + 24 \cdot 45]; \\ B_3 = 34[(23+24)(51+52+53+54) + 25(53+54) + \\ + 24[(31+32)(51+52+53+54) + 35(51+52)] + \\ + 54[35(23+24+25) + 25(31+32)]];$$

$$B_4 = 35[(23+25)(41+42+43+45) + 24(43+45)] + \\ + 45[34(23+24+25) + 24(31+32)] + 25[(31+32)(41+42+43+45) + 34(41+42)].$$

Дополнительные ключи. Систему из n уравнений обслуживают n ключей — основной ключ K_{1n} и $n-1$ дополнительных. Дополнительный ключ K_{an} получают из основного путем замены в выражении ключа K_{1n} индекса 1 на α и индекса α на 1.

Решение системы уравнений. Сочетание ключа

и гамма-оператора позволяет сразу записывать выражения искомых корней в законченном виде, свободном от сокращающихся членов и поэтому пригодном для анализа свойств объекта и его оптимизации по критериям качества.

Искомые корни выражаются здесь формулой

$$x_\alpha = (b_1 P_{1\alpha} + b_2 P_{2\alpha} + \dots + b_n P_{n\alpha}) / \\ / (a_{10} P_{11} + a_{20} P_{21} + \dots + a_{n0} P_{n1}), \quad (7)$$

где $P_{\alpha\beta}$ — полином, образующийся в результате разложения адьюнкты $A_{\alpha\beta}$ и последующего сокращения ее отрицательных членов.

Поэтому формула (7) аналогична по структуре формуле (4), но отличается от нее тем, что является готовым решением системы линейных уравнений, а формула (4) служит лишь промежуточным этапом весьма трудоемкого процесса преобразования обоих определителей. Выражение $P_{\alpha\beta}$ находят из формулы ключа K_{an} , первый индекс которого такой же как первый индекс у $P_{\alpha\beta}$. Каждый ключ обслуживает группу многочленов $P_{\alpha\beta}$ с одинаковым первым индексом. Поэтому алгебраические выражения всех $P_{\alpha\beta}$ одинаковы и различаются только местом простановки символов оператора γ , которые нужно ставить над тем коэффициентом $a_{\alpha\beta}$, у которого второй индекс совпадает со вторым индексом $P_{\alpha\beta}$. Простановка символа γ означает, что

$$\gamma \quad a_{\alpha\beta} = a_{\alpha\beta} + a_{\alpha 0}.$$

Пример. Пусть дана система третьего порядка:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{13}x_n = b_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{23}x_n = b_2;$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \dots + a_{33}x_n = b_3.$$

Требуется найти выражения всех корней, не решая систему.

Ответ. Искомые корни выражаются формулами:

$$x_1 = (b_1 P_{11} + b_2 P_{21} + b_3 P_{31}) / P;$$

$$x_2 = (b_1 P_{12} + b_2 P_{22} + b_3 P_{32}) / P;$$

$$x_3 = (b_1 P_{13} + b_2 P_{23} + b_3 P_{33}) / P.$$

где

$$P = a_{10} P_{11} + a_{20} P_{21} + a_{30} P_{31}.$$

Выражение основного ключа K_{13} берем из таблицы ключей, а дополнительные ключи K_{23} и K_{33} получаем заменой в K_{13} индексов: для ключа K_{23} заменяем в K_{13} индекс 1 на 2 и индекс 2 на 1, а для ключа K_{33} заменяем в K_{13} индекс 1 на 3 индекс 3 на 1. Запись ведем в индексах:

$$K_{13} = 21(31+32) + 31 \cdot 23;$$

$$K_{23} = 12(32+31) + 32 \cdot 13;$$

$$K_{33} = 23(13+12) + 13 \cdot 21.$$

Ключ K_{13} обслуживает группу P_{11} , P_{12} , P_{13} , первый индекс которых совпадает с первым индексом ключа. Соответственно ключ K_{23} обслуживает группу P_{21} , P_{22} , P_{23} , а ключ K_{33} — группу P_{31} , P_{32} , P_{33} . Во всех группах символ оператора γ ставится над тем коэффициентом $a_{\alpha\beta}$, у которого второй индекс равен второму индексу $P_{\alpha\beta}$. Отсюда получаем выражения всех полиномов $P_{\alpha\beta}$:

$$P_{11} = \overset{\gamma}{21}(31+32) + \overset{\gamma}{31} \cdot 23;$$

$$P_{21} = \overset{\gamma}{12}(31+32) + \overset{\gamma}{32} \cdot 13;$$

$$P_{31} = \overset{\gamma}{23}(12+13) + \overset{\gamma}{13} \cdot 21;$$

$$P_{12} = \overset{\gamma}{21}(31+32) + \overset{\gamma}{31} \cdot 23;$$

$$P_{22} = \overset{\gamma}{12}(31+32) + \overset{\gamma}{32} \cdot 13;$$

$$P_{32} = \overset{\gamma}{23}(12+13) + \overset{\gamma}{13} \cdot 21;$$

$$P_{13} = \overset{\gamma}{21}(31+32) + \overset{\gamma}{31} \cdot 23;$$

$$P_{23} = \overset{\gamma}{12}(31+32) + \overset{\gamma}{32} \cdot 13;$$

$$P_{33} = \overset{\gamma}{23}(12+13) + \overset{\gamma}{13} \cdot 21,$$

где $\overset{\gamma}{\alpha\beta} = \alpha\beta + \alpha 0$.

Суперключ. Если приходится часто решать системы высоких порядков, то хранить в памяти компьютера всю таблицу ключей становится затруднительно из-за слишком большого ее объема. В этом случае следует хранить только ключ высшего порядка K_{1m} , т.е. суперключ, преобразуя его в ключ K_{1n} требуемого порядка путем исключения в формуле суперключа элементов двух видов: первого вида — коэффициентов $a_{\alpha\beta}$, у которых один из индексов больше n , и второго вида — членов, содержащих меньше n сомножителей.

Процесс преобразования суперключа удобно проследить на примере преобразования ключа пятого порядка K_{15} в ключ третьего порядка K_{13} . Из таблицы ключей имеем: $K_{15} = 21B_1 + 31B_2 + 41B_3 + 51B_4$ (запись в индексах, исключаемые члены подчеркиваем). Здесь

$$\begin{aligned} B_1 &= (31+32)[(41+42+43)(51+52+53+54) + \\ &+ \underline{45}(51+52+53)] + (41+42)[34(51+52+53+54) + \\ &+ \underline{35} \cdot 54] + (51+52)[35(41+42+45) + \underline{34} \cdot 45] = \\ &= 31+32. \end{aligned}$$

Следовательно, здесь $21B_1 + 21(31+32)$. Таким же способом находим, что $31B_2 = 31 \cdot 23$. Члены $\underline{41}B_3$ и $\underline{51}B_4$ можно исключить заранее как элементы второго вида (у которых число сомножителей меньше n). Отсюда получаем $K_{13} = 21(31+32) + 31 \cdot 23$. Следовательно, выражение ключа K_{13} третьего порядка, полученное из ключа пятого порядка, совпадает с выражением этого ключа, найденного другим способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пятин Ю.М. О дешифраторном методе анализа электрических цепей. — Электричество, 1994, № 12.
- Пятин Ю.М. Дешифраторный метод расчета токов в линейных цепях. — Электричество, 1996, № 5.

Автор: Пятин Юрий Михайлович окончил в 1932 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ). В 1960 г. в ЛПИ защитил докторскую диссертацию по теме «Общая теория логометров». Скончался в марте 1999 г.

Хроника

Памяти Георгия Николаевича Петрова (1899–1977)

5 мая с.г. исполнилось 100 лет со дня рождения Георгия Николаевича Петрова. Его по праву можно назвать выдающимся ученым-электромехаником XX в.

Георгий Николаевич Петров в 1924 г. окончил электротехнический факультет Московского высшего технического училища, уже работая в научно-исследовательском институте ГЭЗИ (ныне Всероссийский электротехнический институт — ВЭИ).

Первые научные работы, выполненные Г.Н. Петровым в 1923–1925 гг. под руководством акад. К.И. Шенфера, посвящены исследованию электромагнитных процессов в асинхронных машинах на основе аналитической теории геометрических мест. Им впервые аналитически получены Г-образные схемы замещения для многофазной и однофазной асинхронных машин и соответствующие им круговые диаграммы, на основе которых построена современная теория этих машин. Показано, что параметры Г-образной схемы связаны простыми соотношениями с проводимостями обмотки статора в режимах холостого хода, короткого замыкания и бесконечно большой частоты вращения.

Развивая эти исследования применительно к многофазному коллекторному шунтовому двигателю, Г.Н. Петров обосновывает Г-образную схему замещения и круговую диаграмму тока и для этого двигателя.

Начиная с 1926 г., Г.Н. Петров в своих исследованиях уделяет все большее внимание вопросам трансформаторостроения. В эти годы производство



силовых трансформаторов, начавшееся в Москве, Ленинграде и Харькове, стало выделяться в самостоятельную область электропромышленности и сосредотачивалось на Московском электрозваводе. Возникла задача перехода от выпуска отдельных трансформаторов мощностью до 5000–6000 кВ·А при рабочем напряжении 6 кВ к разработке и производству серий трансформаторов как распределительных с рабочим напряжением 6 и 35 кВ, так и для работы на станциях и в сети мощностью до 20000–40000 кВ·А при рабочем напряжении 110 и 220 кВ.

Решение этих конкретных производственных задач требовало дальнейшего развития теории трансформаторов.

К первой группе работ в этом направлении, проведенных Г.Н. Петровым в 1926–1932 гг., относятся вопросы теории проектирования трансформаторов. Им создается строгая теория проектирования, основанная на математическом анализе оптимальных условий и опубликованная в таких трудах, как «Определение основных размеров трансформаторов» (1926 г.),

«Распределение потерь и стоимости в активном материале трансформатора» (1928 г.), «Технико-экономическое обоснование расчета трансформаторов» (1931 г.), а также в трудах, посвященных сравнению трехфазных и однофазных трансформаторов, исследованию трехобмоточных трансформаторов и параллельной работы многообмоточных трансформаторов, расчету нагрева обмоток трансформаторов. Все эти работы, расширяющие и углубляющие общую теорию, использовались в практике проектирования новых серий трансформаторов при активном участии самого Г.Н. Петрова.

В 1928–1934 гг. Г.Н. Петров разрабатывает проблему развития трансформаторостроения в перспективном плане — повышение рабочего напряжения до 110 и 220 кВ и мощности до 40000–50000 кВ·А в единице. Эти исследования нашли свое отражение в таких трудах, как «Успехи мощного трансформаторостроения в СССР» (1932 г.), «Технико-экономические проблемы высоковольтного трансформаторостроения в СССР» (1933 г.) и «Силовые трансформаторы на напряжение 380 кВ и научно-технические проблемы, связанные с их построением» (1932 г.). Предложения Г.Н. Петрова получили одобрение Всесоюзной конференции по составлению Ген-плана электрификации СССР в мае 1932 г.

Вторая группа работ Г.Н. Петрова в области трансформаторостроения относится к исследованию магнитного рассеяния обмоток. Рост мощностей и напряжений силовых трансформаторов, усложнение

взаимного расположения частей обмоток привели к необходимости теоретического исследования поля рассеяния обмоток, с которым связано большинство процессов, происходящих в трансформаторе. Обобщенная теория рассеяния, разработанная Г.Н. Петровым в 1932—1935 гг., позволила решить эту задачу для произвольно расположенной пары обмоток с использованием теории средних геометрических расстояний при допущении бесконечно тонких обмоток.

К третьей группе работ Г.Н. Петрова можно отнести исследования, проведенные на основе разработанной им теории рассеяния и относящиеся к анализу электродинамических усилий в обмотках трансформатора при аварийных режимах.

Опубликованные в 1934—1935 гг. работы Г.Н. Петрова дали основание для точного расчета механических усилий в обмотках трансформатора и для разработки конструкции крепления обмоток, обеспечивающей их прочность при КЗ.

За разработку методики расчета механических усилий в обмотках преобразовательных трансформаторов и конструкций обмоток, обеспечивающих их механическую прочность, Г.Н. Петров совместно с работниками Московского электрозвавода был удостоен Государственной премии СССР.

К четвертой группе работ Г.Н. Петрова можно отнести исследования, посвященные намагничиванию трансформаторов, — главным образом анализ намагничивающих токов при различных схемах соединения обмоток и различных конструкциях магнитных систем. Эти работы позволили создать метод определения высших гармонических токов намагничивания трансформатора и основного потока, а также определить влияние этих токов на работу

высоковольтной сети.

В пятую группу работ входят исследования перенапряжений в трансформаторах, что привело к разработке новых норм испытания изоляции трансформаторов.

Отдельные работы Г.Н. Петрова в 1931—1936 гг. относятся также к развитию теории автотрансформаторов, специальных трансформаторов и к исследованиям нагрева и охлаждения трансформаторов.

В 1934 г. вышла книга Г.Н. Петрова, в которой впервые с исключительной полнотой и на основе глубокого теоретического исследования рассматривается ряд вопросов теории трансформаторов: рабочий процесс двух- и многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов, работа трансформаторов в условиях несимметричных режимов, магнитная цепь и обмотки, магнитное рассеяние и добавочные потери, процесс КЗ и перенапряжения. Эта книга, предназначенная для студентов вузов и инженеров, получила всеобщее признание, стала настольной книгой специалистов, работающих в области трансформаторостроения, и дала теоретическое основание для развития советского трансформаторостроения в предвоенные годы.

Совместно с С.С. Окунем Г.Н. Петров проводит исследования компенсированных трансформаторов тока. В результате был разработан новый тип трансформатора тока для напряжения 0,5—10 кВ с оригинальной компенсацией, получившей название «компенсация МЭИ». Эти трансформаторы тока выпускаются в массовых количествах, имеют малую массу и высокую динамическую прочность. За эту работу Г.Н. Петров вместе с С.С. Окунем и работниками завода был вторично удостоен Государственной премии СССР.

В 40-е годы и позже

Г.Н. Петров наряду с решением вопросов теории электрических машин продолжает уделять внимание дальнейшему развитию теории трансформаторов. Потребности советской энергетики в увеличении напряжений трансформаторов до 330, 500 и 750 кВ и увеличение мощности трансформаторов в единице до 250—630 МВ·А и более ставили новые теоретические задачи.

К периоду 1941—1975 гг. относится около 30 трудов Г.Н. Петрова по дальнейшему развитию теории трансформаторов: исследование установившихся и переходных процессов в силовых многообмоточных трансформаторах и трансформаторах больших мощностей и классов напряжения до 500 и 750 кВ, разработка уточненных методов расчета рассеяния и электродинамических сил в трансформаторах, теория расщепленных обмоток трансформаторов, бесконтактное регулирование напряжения трансформаторов. К этому периоду относятся также отдельные труды Г.Н. Петрова по использованию в трансформаторах современных марок электротехнической стали, по нагрузочной способности трансформаторов и др.

В 1948 г. Г.Н. Петров снова возвращается к аналитическому исследованию геометрического места асинхронной многофазной машины. Теперь его интересует имеющий большое теоретическое и практическое значение вопрос о влиянии насыщения на диаграмму тока и рабочие характеристики асинхронных машин. Успешное решение этого вопроса оказалось возможным благодаря использованию остроумного расчетного приема: представлению зависимости индуктивного сопротивления КЗ от тока в виде функции скольжения. Это позволило получить Г-образную схему замещения с учетом насыщения, в которой сопротив-

ление одной ветви остается неизменным, а сопротивление другой зависит только от скольжения.

Заметный вклад в расчет характеристик электрических машин с учетом насыщения внесен работами Г.Н. Петрова в 1944—1945 гг. Автору удалось выразить в аналитической форме размагничивающее действие поперечной реакции якоря в машинах постоянного тока. Им предложен аналитический метод построения угловых характеристик синхронных машин с учетом насыщения, позволяющий более правильно оценить статическую устойчивость машин при параллельной работе с электрической системой.

Г.Н. Петров участвовал в работе многих комиссий Министерства электропромышленности и всегда стремился к тому, чтобы его научная деятельность отвечала потребностям развития электромеханики. Так, его исследования в 1943—1944 гг., посвященные одной из актуальных проблем электромашиностроения — выбору рациональной геометрии электрических машин переменного тока, немало способствовали правильному выбору оптимальных параметров новых серий электрических машин в специфических условиях военного и послевоенного времени.

В последующие годы Г.Н. Петров возглавил работы по реализации его идеи — созданию новой схемы генерирования электрической энергии, в которой вместо обычного генератора и повышающего трансформатора используется высоковольтный генератор, рассчитанный на непосредственное присоединение к сети 110—220 кВ. Впервые эта прогрессивная идея, отражающая тенденции развития современной техники, сформулирована в одной из его работ, где отмечается, что схема генерирования электроэнергии высокого

напряжения с помощью синхронного генератора и повышающего трансформатора, предложенная в конце прошлого века М.О. Доливо-Добровольским, в значительной мере определялась технологическими возможностями того времени. Применительно к этой схеме, оставшейся на многие годы доминирующей, совершенствовались и оптимизировались конструкция, параметры и технология двух ее главных элементов — генератора и трансформатора. Между тем при современном уровне развития техники имеется реальная возможность создания высоковольтного генератора.

Реализация этой идеи была начата применительно к гидрогенераторам. Результаты деятельности Г.Н. Петрова по созданию первого в мире высоковольтного гидрогенератора на напряжение 110 кВ, спроектированного и изготовленного заводом УЭТМ, отражены в специальном выпуске «Трудов МЭИ». Создание высоковольтного гидрогенератора потребовало решения ряда сложных задач. В результате удалось показать, что внедрение высоковольтных гидрогенераторов позволит во многих случаях уменьшить потери при преобразовании энергии, снизить стоимость основного и вспомогательного электрооборудования электростанции и ее сопротивления, а в отдельных случаях откроет единственные и принципиально новые возможности для возведения электростанций.

В течение многих лет Г.Н. Петров, будучи профессором кафедры, заместителем директора Московского энергетического института, деканом электромеханического факультета и заведующим кафедрой электрических машин, а также выполняя ряд поручений Министерства высшего и среднего специального образования, вел

большую работу по становлению и развитию советской системы высшего технического образования. Эта работа нашла отражение не только в стенах Московского энергетического института, но и в других технических вузах страны; ей посвящены такие труды ученого: «К вопросу об организации учебного процесса втуза» (1934 г.); «Актуальные вопросы научно-исследовательской работы в вузах» (1939 г.); «Об организационных формах научно-исследовательской работы» (1945 г.); «Научно-методическая работа кафедры» (1949 г.); «Ведущая роль лекций в учебном процессе» (1951 г.); «Создание полноценного учебника — одна из важнейших задач высшей школы» (1955 г.).

Эти труды Г.Н. Петрова вместе с его практической деятельностью по организации и руководству учебным процессом и научно-исследовательской работой на кафедре, факультете и в институте оказали серьезное влияние на организацию и постановку учебного процесса во многих технических вузах.

Огромная работа была проведена Г.Н. Петровым по созданию учебников для электротехнических и энергетических вузов. В 1940 г. вышла первая часть учебника по курсу электрических машин, подготовленная к изданию под редакцией и при решающем участии Г.Н. Петрова, а в 1947 г. — вторая часть учебника, написанная Г.Н. Петровым без соавторов.

Появление этого учебника было большим событием. В нем Г.Н. Петрову удалось отразить основные достижения в области теории и практики электрических машин, накопившиеся к тому времени во всем мире. Несмотря на то, что вторая часть курса электрических машин вышла с перерывом после первой в семь лет, обе части представляют собой

единое целое, и изложение материала второй части полностью вытекает из первой.

Впервые был создан учебник, охватывающий всю программу курса электрических машин на электротехнических факультетах вузов. Был принят новый порядок изложения отдельных разделов курса. Вместо традиционного порядка, в котором курс начинался с машин постоянного тока, в учебнике была принята следующая последовательность изложения: введение в курс, трансформаторы, общие вопросы теории машин переменного тока, асинхронные машины, синхронные машины, коллекторные машины. Такой порядок с точки зрения логического развития курса наиболее целесообразен, так как все разделы удается изложить исходя из представления об общности электромагнитных процессов в любых электрических машинах — как в электромеханических преобразователях, так и в трансформаторах. Во втором и третьем изданиях учебника была сохранена та же последовательность изложения.

Преимущества предложенной Г.Н. Петровым последовательности подтверждены практикой преподавания курса. Вместе с тем во втором издании материал учебника подвергся переработке как в связи с развитием электромашиностроения, так и по причине пополнения теории электрических машин новыми исследованиями, позволяющими обобщенно рассматривать электромагнитные процессы в электрических машинах и трансформаторах разных типов и конструкций. Приведены также необходимые сведения по испытаниям отдельных электрических машин и краткие схемы их расчета.

По учебникам Г.Н. Петрова изучали и изучают электрические машины многие поколения инженеров; они получили мировое признание. Большую

известность приобрел знаменитый трехтомник Г.Н. Петрова, первая часть которого выдержала три издания, вторая и третья части — по два издания. Его перу принадлежат более 120 статей и многие изобретения.

Он воспитал большое число ученых, кандидатов и докторов наук.

С 1938 по 1976 гг. Г.Н. Петров заведовал кафедрой электрических машин (ныне электромеханики) в Московском энергетическом институте. Он был деканом электромеханического факультета, в течение 12 лет — заместителем директора по научной работе, директором МЭИ во время Великой Отечественной войны, избирался депутатом районного Совета депутатов трудящихся, депутатом Моссовета.

Научный коллектив двух кафедр МЭИ под руководством Г.Н. Петрова разработал уникальный высоковольтный гидрогенератор мощностью 14,5 МВт и напряжением 121 кВ, который был изготовлен заводом «Уралэлектротяжмаш» и успешно испытан на Сходненской ГЭС вблизи Москвы. Проблема создания высоковольтных генераторов остается актуальной и по сей день, вызывая большой интерес у ведущих электротехнических фирм мира.

Под его руководством была создана серия магнитополупроводниковых стабилизаторов напряжения, выпуск и совершенствование которых продолжаются и сейчас.

В 1964 г. Георгий Николаевич был избран членом-корреспондентом АН СССР. Ему были присвоены звания заслуженного деятеля науки и техники РСФСР и почетного доктора наук ряда зарубежных университетов. В течение многих лет он был председателем научно-методического Совета Минвуза СССР, главным редак-

тором журналов «Электричество» и «Электротехника», председательствовал на международных конференциях, принимал участие в разработке новых серий электрических машин и трансформаторов. Г.Н. Петров был патриархом отечественного машиностроения, имел непрекаемый авторитет в решении ключевых вопросов теории и практики электромеханики.

За долгие годы руководства кафедрой Георгий Николаевич сумел собрать и сплотить большой коллектив ведущих специалистов страны, которые, по существу, сформировали отечественную школу электромеханики. В далеко не полном их перечне следует назвать профессоров Ю.С. Чечета, П.С. Сергеева, Ф.А. Горяинова, П.М. Тихомирова, Б.Ф. Токарева, М.Ф. Юферова, М.В. Антонова, И.П. Копылова, А.В. Иванова-Смоленского и многих других. Коллективом кафедры, «птенцами гнезда Петрова», были написаны основные учебники по электромеханике, получившие широкую известность не только в нашей стране, но и за рубежом.

Под руководством Г.Н. Петрова была сформирована лабораторная и учебно-методическая основа электромеханической специальности в стране, принятая затем и многими зарубежными вузами. Плодотворный творческий труд Георгия Николаевича был отмечен двумя орденами Ленина, орденами Трудового Красного Знамени, Красной Звезды, «Знак Почета» и многими медалями.

Георгий Николаевич был широко образованным, высококультурным, обаятельным человеком, умевшим плодотворно руководить коллективом с величайшими тактом и вниманием. Он навсегда остался в нашей памяти как крупный ученый, беззаветно служивший Родине.

Кафедра электромеханики МЭИ, редколлегия журнала «Электричество»

Александр Степанович Шаталов

(К 85-летию со дня рождения)



Доктору технических наук, профессору Александру Степановичу Шаталову, известному ученному-электротехнику, старейшему члену редколлегии журнала «Электричество», в мае исполняется 85 лет.

Поздравляя Александра Степановича с юбилеем, особо отметим его искреннюю преданность профессии и нашему журналу.

Александр Степанович работал электромонтером, учился в Северо-Кавказском электромонтажном техникуме, работал техником-проектантом ВЭО в Ростове-на-Дону. Затем был студентом, аспирантом, преподавателем курсов элек-

тических машин и электроприводов в Новочеркасском индустриальном институте.

Впервые Александр Степанович опубликовал статью в журнале «Электричество» в январе 1941 г. Война оторвала его от родного института, но не ослабила тяги к электротехнике. За тридцать пять лет службы в армии он прибавил к своей «гражданской» степени кандидата наук степень доктора наук, получил звание профессора, стал лауреатом Государственной премии и заслуженным деятелем науки и техники. Сотрудничество с журналом «Электричество» в качестве автора Александр Степанович продолжил сразу после окончания войны, очередная его статья опубликована в прошлом году.

Среди многих книг Александра Степановича упомянем его первую монографию по функциональным сопротивлениям (1952), «Структурные методы в теории управления и автоматике» (1962), «Техническая кибернетика» (1967), «Динамические системы и сигналы» (1997). Основная деятельность А.С.Шаталова проходила в военной инженерной академии, где он руководил лабораторией, кафедрой, факультетом. После выхода в запас в звании генерал-майора Александр Степанович продолжал преподавать электротехнические и кибернетические дисциплины, а в последнее время является преподавателем и научным консультантом НТО «Антей».

Активному долголетию Александра Степановича во многом содействовала его супруга Галина Сергеевна — известный врач и учений. На фотографии, поместить которую в нашем журнале мы сочли приятной обязанностью, — Галина Сергеевна и Александр Степанович в день 60-летия свадьбы.

Издательство «Знак»

приглашает авторов учебников, научных монографий, учебных пособий, научно-популярных книг к сотрудничеству.

Мы рассмотрим Ваши предложения по изданию книг на гонорарной основе. Направляйте аннотации книг (одна страница) по адресу: 103012 Москва, Б. Черкасский пер., Издательство «Знак». Тел. 924-24-80.

Игорь Владимирович Якимец

(К 60-летию со дня рождения)

Исполнилось 60 лет со дня рождения Игоря Владимировича Якимца, известного ученого в области электроэнергетики, доктора технических наук. Игорь Владимирович работает в институте «Энергосетьпроект», где заведует лабораторией технических средств управления энергосистемами.

В научных кругах И.В. Якимец известен как один из ведущих специалистов в области исследования и разработки нового электроэнергетического оборудования.

В 1993 г. он защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте.

В период 1965–1975 гг. И.В. Якимцом были разработаны системы тиристорного самовозбуждения мощных генераторов без применения вольтодобавочных трансформаторов, решен ряд сложных научно-технических вопросов, связанных с использованием логических элементов в системах передачи постоянного тока.

Разработки, проводимые юбиляром с 1975 г. в области использования криоэнергетического оборудования в различных отраслях народного хозяй-



ства, привели к созданию основ теории электротехнических устройств с переключателями магнитного потока на базе управляемых сверхпроводниковых экранов и легли в основу разработки нового класса трансформаторов и токоограничителей с параметрической регулировкой выходного напряжения и тока.

Научную работу И.В. Якимец совмещает с педагогической деятельностью. В 70-х годах он читал курс теоретических основ электротехники в Московском институте нефтяной и газовой промышленности им. акад. И.М. Губкина. На протяжении многих лет Игорь

Владимирович осуществляет руководство подготовкой научных кадров высшей квалификации, является научным руководителем и консультантом большого числа аспирантов.

Результаты работ И.В. Якимца изложены в более чем 100 печатных трудах — монографии, научных статьях и авторских свидетельствах.

В настоящее время И.В. Якимец наряду с разработкой и исследованием устройств нетрадиционной энергетики — сверхпроводниковых накопителей для повышения динамической устойчивости энергосистем — занимается разработкой средств контроля, а также управления состоянием и режимом работы крупных электроэнергетических объединений, проблемой создания микропроцессорных устройств для выявления и ликвидации многомашинных асинхронных режимов в электроэнергетических системах.

Коллеги и друзья Игоря Владимировича желают ему здоровья и надеются, что его дальнейшая плодотворная научная деятельность послужит развитию отечественной электроэнергетики.

Исаак Аронович Зборовский

(К 70-летию со дня рождения)

Исполнилось 70 лет Исааку Ароновичу Зборовскому, ведущему специалисту ОАО «Уралэлектротяжмаш». Почти 50 лет И.А. Зборовский занимается производственной, преподавательской и научно-исследовательской работой в области электромашиностроения, силовой электроники и трансформаторостроения.

После окончания в 1952 г. Ленинградского политехнического института по специальности «Электрические машины» он был направлен на Баранчинский электромашиностроительный завод, где прошел путь от мастера цеха, инженера-испытателя, до заведующего лабораторией электрических машин.

При его непосредственном участии разрабатывались серии асинхронных и синхронных машин до 1000 кВт.

В 1957 г. И.А. Зборовский получил приглашение перейти на кафедру теоретической электротехники Уральского политехнического института, где работал сначала ассистентом, затем доцентом. В это время им выполнены исследования в области динамики вентильных систем. Большая часть результатов этой работы опубликована в «Электричестве» и получила широкое признание. В 1963 г. он успешно защитил кандидат-



скую диссертацию по переходным процессам синхронных двигателей с полупроводниково-ими преобразователями в цепях возбуждения.

С 1971 г. по настоящее время Исаак Аронович работает на заводе «Уралэлектротяжмаш» ведущим специалистом в области теоретической разработки наиболее сложных проблем преобразовательно-трансформаторных систем.

С его непосредственным участием разработана серия мощных тиристорных преобразователей для прокатного производства Нижне-Тагильского металлургического завода, отличающихся повышенной надежностью. Проведены теоретические исследования компенсированных преобразователей с

уравнительными токами. Выполнено научное обобщение для схем «две обратные звезды», получившее международное признание. Сделан глубокий теоретический анализ процессов в тиристорно-механических системах регулирования напряжения трансформаторов, позволяющий повысить надежность их работы.

В последнее время в связи с развитием силовой электроники И.А. Зборовским проведена исследовательская работа по трансформаторам для преобразователей частоты (в том числе для железнодорожного транспорта), управляемых по принципу широтно-импульсной модуляции. Результаты этой работы использованы в производстве и нашли отражение на страницах научных журналов.

В списке научных трудов И.А. Зборовского более 100 публикаций и 36 изобретений.

Коллеги Исаака Ароновича отмечают его глубокие теоретические знания в смежных областях трансформаторно-преобразовательной техники, высокую научную принципиальность, а также присущие ему тщательность и глубину проработки проблемных вопросов. Они желают юбиляру здоровья и успехов в научной работе.

Зосим Григорьевич Каганов

Скончался профессор, доктор технических наук Зосим Григорьевич Каганов. Он родился в декабре 1911 г. В 1931 г. окончил Киевский техникум связи, а в 1937 г. — Ивановский энергетический институт. После окончания института работал инженером-электриком ТЭЦ Сегежского ЦБК в Карелии. В 1940 г. поступил в аспирантуру Ивановского энергетического института. С 1942 по 1946 гг. был в рядах Красной Армии.

После окончания войны Зосим Григорьевич продолжил работу над кандидатской диссертацией, посвященной волновым явлениям в электрических машинах, и защитил ее в 1948 г. Затем в течение 10 лет работал доцентом Ивановского политехнического института.

С 1959 г. З.Г. Каганов — старший научный сотрудник Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения АН СССР, с 1961 г. — заведующий лабораторией в Транспортно-энергетическом институте СО АН СССР, где под его непосредственным руководством были организованы две новые лаборатории — высоковольтных устройств и волновых процессов в электрических машинах.

В 1963 г. З.Г. Каганов за-



щитил докторскую диссертацию, в 1969 г. ему было присвоено звание профессора.

З.Г. Каганов в 1971 г. был приглашен в Уфимский авиационный институт, где работал в должности заведующего, а с 1984 г. — профессором кафедры теоретических основ электротехники до 1988 г.

Основные направления научных исследований З.Г. Каганова — волновые явления в электрических цепях с распределенными параметрами и неразрушающие методы контроля изоляции. Наиболее значимые труды З.Г. Каганова изданы в центральных издательствах, его работы неоднократно экспонировались на различных выставках, в том числе на ВДНХ СССР.

В течение ряда лет З.Г. Каганов был ответственным редактором межвузовского научного сборника «Сложные электромагнитные поля и электрические цепи», издаваемого в Уфимском авиационном институте. Он избирался членом президиума Научно-методического Совета по ТОЭ и электрофизике Минвуза СССР и заместителем председателя Научно-методической комиссии по ТОЭ, входящей в этот Совет, членом Ученого совета института и специализированного Совета по защите кандидатских диссертаций.

Много внимания З.Г. Каганов уделял воспитанию молодых ученых и педагогических кадров. Под его руководством подготовлено более 15 кандидатов наук. Он опубликовал более 145 научных трудов, в их числе монографии, авторские свидетельства и учебные пособия. Монография «Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы» вышла в 1990 г. Последняя статья З.Г. Каганова опубликована в сборнике «Управляемые электрические цепи и электромагнитные поля» в 1997 г.

Зосим Григорьевич был человеком многостороннего таланта и высокой эрудиции. Память о нем сохранится навсегда.

Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10

924-24-80, 928-88-69; факс 315-0698

101000 Москва, Главный почтамт, а/я № 648

Художественный редактор Т.А. Дворецкова

Сдано в набор 11.03.99. Подписано в печать 1.04.99. Формат 60×80¹/8.
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 107

ЗАО «Знак», 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10
Отпечатано в типографии МЭИ
111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 13

В период с 21 по 24 сентября 1999 г. в рамках совместного проекта «Провинция Куменлааксо, Финляндия — Санкт-Петербург» в г. Котка в Политехническом институте «Куменлааксо Политехник» пройдет международная выставка-семинар ***«Ресурсосбережение, малая и нетрадиционная энергетика, экология».***

Мероприятия проводят:

со стороны Санкт-Петербурга — АОЗТ «Униреп-Сервис», ранее проводившее в Финляндии научно-технические выставки и семинары в Турку, Иматре, Коуволе, совместно с ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» и Отделом электроэнергетических проблем РАН;

со стороны Финляндии — «Куменлааксо Политехник», а также фирмы «Котка-Хамид Лтд», «Котка Энержи», «Хамина Энержи».

Тематика семинара:

ветро- и гидроэнергетика малой мощности;

использование солнечной энергии;

малые энергетические установки;

ресурсосберегающие технологии;

экологические разработки.

В выставке-семинаре предполагают принять участие такие предприятия, как ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», АЗОТ «ИНСЭТ», ООО «ЭСП», Научно-инженерный центр «Керамические тепловые двигатели», Физико-технологический институт, АОЗТ «КАТЭК», АО «Стройматериалы», АО «СтирлингэкоМаш», Отдел (институт) электроэнергетических проблем РАН (ОЭЭП РАН) и другие.

Председатель оргкомитета семинара — Данилевич Я.Б. — директор ОЭЭП РАН, действительный член (академик) РАН, д.т.н., профессор.

По вопросам участия и посещения мероприятия можно обратиться:

А. Варшавский (АОЗТ «Униреп-Сервис») 812-311 45 70;

Н. Минаев (ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор») 812-238 81 99;

Я. Данилевич (ОЭЭП РАН) 812-298 20 09.

Если Вы работаете в области энергетики или электротехники,
позвольтеся о том,
чтобы Ваши предприятия, лаборатория, кафедра
не опоздали с подпиской на

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

- старейший отечественный теоретический и научно-практический журнал, орган Российской Академии наук, Федерации энергетических и электротехнических обществ;
- выходит ежемесячно, предназначен для высококвалифицированных специалистов в области энергетики и электротехники;
- публикует теоретические и научно-практические работы отечественных и зарубежных ученых и инженеров, освещает работу российских и международных конференций, рецензирует учебники и монографии по тематике журнала, помещает материалы по истории электротехники, статьи о выдающихся отечественных и зарубежных ученых;
- журнал поступает во все промышленно развитые страны мира.

Условия подписки в России и странах СНГ указаны
в Объединенном каталоге Государственного комитета РФ
по связи и информатизации «Подписка-99»

Зарубежные читатели могут подписаться на наш журнал
по адресам фирм, указанным в № 1, 2/99

В Москве подписку от зарубежных читателей на «Электричество»
и его английскую версию «Electrical Technology Russia»
принимает ЗАО «МК-Периодика»
(117049, Б. Якиманка, 39, тел. 238-4967, факс 238-4634)