

ISSN 0013-5380

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1999

9

## 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.

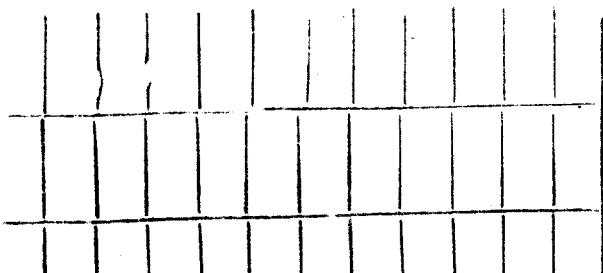
### Секция электрических машин

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, Шакарян Ю.Г. (Научно-исследовательский институт электроэнергетики).

Научный редактор — Евсеев Б.Н.

### и автоматических процессов

Московский энергетический институт (Московский энергетический технический университет «Антея»).  
Н.



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

9  
СЕНТЯБРЬ  
1999

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

## Содержание

Джангиров В.А., Абрамович Б.Н., Иванов О.В., Поплищук В.В. Проблемы и перспективы развития энергетики России и государств Содружества . . . . .	2
Ковалев И.Н., Осипов М.А. Об экономически целесообразных плотностях тока в линиях электропередачи энергосистем . . . . .	6
Скопинцев В.А. Оценка неповреждаемости энергосистемы по статистическим данным о технологических нарушениях . . . . .	11
Беспалов В.Я., Новокшенов В.С., Игликов А.С. Аналитическое исследование и выбор параметров однофазных асинхронных микродвигателей . . . . .	19
Попов В.И. Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин. Часть II . . . . .	28
Терехов В.М., Владимирова Е.С. Некоторые аспекты применения фаззи-управления в электроприводах	34
Стрункий М.Г. О расчете емкости некоторых видов пластин . . . . .	39
Передельский Г.И. О свойстве четырехполюсников с повторяющимися ячейками, одинаковыми по схеме и включению . . . . .	45
Белоусов Ф.А., Канискин В.А., Сажин Б.И., Созонов В.Н. Влияние переменного электрического поля на увлажнение полизиленовой кабельной изоляции . . . . .	51
Ермуратский П.В. Фазовая погрешность измерительных трансформаторных преобразователей . . . . .	54
Соколик Л.И. Динамическая модель электромагнитного измерительного трансформатора с учетом гистерезиса и некоторые прикладные следствия . . . . .	57
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</b>	
Ларionов В.П. Молниезащита. Часть III . . . . .	61
<b>ХРОНИКА</b>	
Владимир Михайлович Терехов (К 70-летию со дня рождения) . . . . .	69
Елена Александровна Конюхова (К 60-летию со дня рождения) . . . . .	70
Вячеслав Алексеевич Кузнецов (К 60-летию со дня рождения) . . . . .	71
Георгий Васильевич Зевеке (Некролог) . . . . .	72

## CONTENTS

V.A. Dzhangirov, B.N. Abramovich, O.V. Ivanov and V.V. Polishchuk, The Problems and Prospects of Electric Power Engineering Development of Russia and the Commonwealth Countries . . . . .	2
I.N. Kovalev and M.A. Osipov, On Economically Expedient Values of Current Densities in the Transmission Lines of Power System . . . . .	6
V.A. Skopintsev, Estimating Electrical Power System Unfaultability by Statistical Data on Technological Violations . . . . .	11
V.Ya. Bespalov, V.S. Novokshenov and A.S. Iglakov, Analytical Study and Selection of the Parameters of Single-Phase Induction Micromotors . . . . .	19
V.I. Popov, New Desings of Three-Phase Fractional-Slot Windings of Electrical Machines. Part II . . . . .	28
V.A. Terekhov and Ye.S. Vladimirova, Some Aspects of the Application of Fuzzy-Control . . . . .	34
M.G. Strunskii, On Calculation of Capacitance of Some Kinds of Plates . . . . .	39
G.I. Peredel'skii, On a Property of Two-Port Networks with Recurrent Cells of the Same Scheme and Same Connection . . . . .	45
F.A. Belousov, V.A. Kaniskin, B.I. Sazhin and V.N. Sazonov, The Influence of an Alternating Electric Field on Moistening Polyethylene Cable Insulation . . . . .	51
P.V. Yermuratskii, Phase Error of Instrument Transformer Converters . . . . .	54
L.I. Sokolik, A Dynamic Model of a Measuring Electromagnetic Transformer Allowing for the Hysteresis, and Some Practical Consequences . . . . .	57
<b>METHODICAL MATERIALS</b>	
V.P. Larionov, Protection Agains Lightning. Part III . . . . .	61
<b>CHRONICLE</b>	
Vladimir Mikhaylovich Terekhov (to Mark the 70th Anniversary) . . . . .	69
Elena Aleksandrovna Konyukhova (to Mark the 60th Anniversary) . . . . .	70
Vyacheslav Alekseyevich Kuznetsov (to Mark the 60th Anniversary) . . . . .	71
Georgii Vasil'yevich Zeveke (Notice Obituary) . . . . .	72

# Проблемы и перспективы развития энергетики России и государств Содружества

ДЖАНГИРОВ В.А., АБРАМОВИЧ Б.Н., ИВАНОВ О.В., ПОЛИЩУК В.В.

В рамках II Петербургского экономического форума (17–18 июня 1998 г.) прошли заседания секции «Проблемы энергетической отрасли». В работе секции принимали участие представители Электроэнергетического совета СНГ, России, Украины, Армении, правительства С.Петербурга, российских регионов, ведущих научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, а также представители Франции и Финляндии.

На совещании было отмечено, что энергетические системы СНГ расположены на территории общей площадью более 10 млн км<sup>2</sup>, что не имеет аналогов в мире. Формирование этого уникального объединения энергосистем осуществлялось на протяжении нескольких десятилетий.

К моменту образования СНГ суммарная установленная мощность их электростанций превышала 330 млн кВт. Производство электрической энергии в начале 90-х годов достигло 1720 млрд кВт·ч в год. Потребление электроэнергии на душу населения составляло более 5700 кВт·ч. В эксплуатации находилось около 1 млн км линий электропередачи напряжением 35 кВ и выше, в том числе около 220 тыс. км системообразующих сетей номинальным напряжением 220÷1150 кВ.

В дальнейшем в связи с перестройкой экономики и спадом промышленного производства в государствах Содружества электропотребление снижалось. Наибольшее снижение имело место в промышленности, а также в строительстве и на транспорте. В то же время наблюдалось увеличение потребления электроэнергии в коммунально-бытовом секторе. Суммарное производство электроэнергии в целом по государствам Содружества в 1997 г. стабилизировалось и составило около 1200 млрд кВт·ч.

В настоящее время в электроэнергетике государств Содружества сложилась парадоксальная ситуация. При наличии достаточных генерирующих мощностей и топливно-энергетических ресурсов народнохозяйственный комплекс и население не имеют надежного и бесперебойного электроснабжения. Имеющие место перерывы и ограничения подачи электрической энергии на промышленные предприятия, в сельскую инфраструктуру, населению приводят к колоссальным экономическим потерям и росту социальной напряженности.

Отсутствие экономических критериев реализации взаимовыгодных обменов электроэнергией и мощностью, действенных механизмов стимулиро-

вания использования магистральных линий электропередачи, а также снижение надежности и качества электроснабжения в государствах Содружества привели к разделению некогда единой энергосистемы на несколько изолированно работающих энергообъединений, энергосистем и энергогузлов. Не востребован один из ключевых факторов эффективности функционирования отрасли — параллельная работа энергосистем.

Эти же негативные явления способствовали и отделению от объединения СНГ энергосистем стран Восточной Европы, что исключило потенциальную возможность экспорта электроэнергии в европейские страны.

Несмотря на усложнившиеся межгосударственные взаимоотношения и ситуацию, которая сложилась в электроэнергетике, у государств Содружества есть все необходимые предпосылки и условия для развития взаимовыгодного долгосрочного взаимодействия в области электроэнергетики. Это сотрудничество может эффективно осуществляться на основе развития рынков топлива, электрической энергии, оборудования, проектных, строительных и ремонтных услуг и капитала, что позволит органам управления и субъектам хозяйствования в энергетике обеспечить эффективное и надежное энергоснабжение народного хозяйства и населения стран Содружества.

В качестве основного элемента межгосударственного рынка электрической энергии и мощности, по нашему мнению, должны выступать программы стратегического развития, обеспечивающие решение следующих вопросов:

восстановление параллельной работы энергосистем государств Содружества;

совместное освоение и использование топливно-энергетических ресурсов;

сооружение и модернизация межсистемных энергетических объектов;

взаимные поставки и транзит электроэнергии и мощности;

оперативно-диспетчерская координация и обеспечение надежной и взаимовыгодной совместной работы объединенных энергосистем государств Содружества;

кооперация по поставкам оборудования;

разработка нормативно-правовой и информационной базы, обеспечивающей организацию и функционирование рынка электрической энергии и мощности;

формирование и реализация согласованной та-

рифной политики на поставки и транзит электрической энергии и мощности.

Развитие взаимовыгодных отношений должно основываться на равноправных интересах и сбалансированных взаимных компромиссах. Главной стратегической задачей должно стать надежное обеспечение электроэнергией экономики и населения СНГ на новой рыночной основе с использованием всех преимуществ параллельной работы, главным из которых является эффективное использование имеющихся генерирующих мощностей и электрических сетей в рамках ОЭС СНГ.

Энергетика большинства государств Содружества последние годы работает практически с несколько снижающейся нагрузкой. Фактическое отсутствие роста потребления электроэнергии в сочетании с экономическими трудностями определяет недостаточно жесткие требования к вводу новых генерирующих мощностей. Однако, как показывает анализ, уже через 5–7 лет потребление электроэнергии практически во всех странах СНГ может достичь или даже превысить уровень 1990 г. К этому периоду значительная часть действующего сейчас оборудования полностью выработает свой ресурс, поэтому уже сейчас особую актуальность приобретает задача обеспечения финансирования развития электроэнергетики.

В 1995 г. в России было выработано 860 млрд кВт·ч электроэнергии, что составляет менее 80% уровня 1990 г. В связи с падением нагрузки на энергосистему образовались крупные неиспользуемые резервы мощности. В 1995 г. максимум нагрузки составил 136 млн кВт. Число часов использования крупных высокоэффективных энергоблоков теплоэлектростанций 300, 500, 800, 1200 МВт снизилось до 2000–4000 ч в год. Это привело к росту удельных расходов топлива на отпущеный киловатт-час. По отрасли в целом в 1995 г. он составил 345,6 г/(кВт·ч). Возросли потери электроэнергии в электрических сетях. В 1995 г. в целом по ЕЭС России они составили 10,3%, в системообразующих сетях РАО «ЕЭС России» — 4,9%.

На технико-экономические показатели влияет износ оборудования, его техническое состояние, несвоевременное и не в полном объеме ремонтно-профилактическое обслуживание. Имеющееся ухудшение в большой степени связано с недостатком финансирования из-за неплатежей потребителей.

За последние годы в России существенно ухудшилась возрастная структура оборудования электростанций. Резко снизился ввод новых мощностей на всех типах электростанций. Если в период с 1986 по 1990 гг. в сумме было введено 37,3 млн кВт, то в 1991–1995 гг. — всего 7,4 млн кВт, т.е. почти в 5 раз меньше (информация Центрального диспетчерского управления ЕЭС России). Если на начало 1991 г. доля устаревшего (проработавшего более 30 лет) оборудования всех типов электро-

станций составляла 12,5% их суммарной установленной мощности, то на начало 1996 г. она составила 25%. В то же время темпы демонтажа устаревшего оборудования существенно снизились. В 1995 г. демонтировано 0,81 млн кВт мощности электростанций при плане 1,35 млн кВт, а за 5 лет с 1991 по 1995 гг. — 4 млн кВт, что составило 48% необходимого объема демонтажа.

Износ основных фондов линий электропередачи РАО «ЕЭС России» превышает 25%, подстанций 45%; 25% трансформаторов и около 30% выключателей 330 и 500 кВ эксплуатируются свыше 20 лет. Эксплуатация устаревшего оборудования приводит к росту аварийности, снижает надежность электроснабжения потребителей, безопасность энергообъектов и живучесть энергетических систем.

Реконструкция и модернизация устаревшего оборудования сдерживаются ограниченностью средств. Тем не менее, в России в 2000 г. предполагается демонтировать 8,8 млн кВт и ввести 22,8 млн кВт генерирующих мощностей. Предполагается дальнейшее развитие межсистемных и системообразующих связей.

Такие же негативные явления практически имеют место в электроэнергетике всех государств СНГ.

По имеющимся прогнозам и оценкам снижение уровня производства электроэнергии от 1990 г. будет иметь место еще длительное время. К 2000 г. уровень электропотребления сравняется или приблизится к уровню 1990 г. лишь в девяти АОэнерго: Красноярской, Хакасской, Амурской, Калмыцкой, Дагестанской, Белгородской, Астраханской, Липецкой и Ульяновской энергосистемах. Еще через 5 лет 21 энергосистема выйдет по производству электроэнергии на уровень 1990 г. Это необходимо учитывать в программах технического перевооружения и реконструкции, обеспечить консервацию устаревшего оборудования, в том числе с выводом его из баланса.

Основа развития ЕЭС заложена в «Энергетической стратегии России», разработанной в 1994 г. Уровни электропотребления по России рассматриваются в широком диапазоне: в 2010 г. по оптимистичному варианту — 1299 млрд кВт·ч, по минимальному — 1000 млрд кВт·ч. По «расчетному» варианту (1127 млрд кВт·ч) предполагается до 2010 г. демонтировать 34,7 млн кВт и ввести 69,0 млн кВт генерирующих мощностей. Предполагается и дальнейшее развитие межсистемных и системообразующих связей.

Серьезное внимание будет уделено развитию системы противоаварийной автоматики. Нужна концепция на отключение потребителей и воздействия на действующие электростанции. Требуется внимательное рассмотрение развития оптико-волоконной связи в качестве передающей среды системы управления и противоаварийной автоматики.

В настоящее время надежность электроснабжения потребителей в большой степени определяется надежностью распределительных воздушных линий (ВЛ) напряжением 6(10) кВ. Общая протяженность таких линий в Российской Федерации составляет 1200 тыс. км. Ежегодно аварийно отключается до 10% воздушных линий 6(10) кВ, находящихся в эксплуатации. Анализ аварий таких линий показывает, что их основными причинами являются экстремальные климатические воздействия, неудовлетворительное качество строительства и эксплуатации ВЛ. Наиболее распространеными видами повреждений являются междуфазные короткие замыкания, обрывы проводов, однофазные замыкания на землю. Частые повреждения происходят из-за сближения и схлестывания проводов при ветровых и гололедных нагрузках. Среднее время восстановления одного отказа составляет более 3 ч, а затраты на восстановление, включая ущерб от недоотпуска электрической энергии, в среднем составляют 3 тыс. руб.

Анализ научно-технических достижений в области передачи и распределения электрической энергии показывает, что одним из весьма эффективных способов повышения надежности и электробезопасности ВЛ 6(10) кВ является строительство воздушных линий с изолированными проводами.

Применение изолированных проводов при строительстве и реконструкции ВЛ 6(10) кВ приводит к уменьшению частоты отказов в среднем в 2,4 раза, позволяет снизить ущерб от перерыва электроснабжения и необходимости проведения восстановительных работ.

Российские энергетики первыми поддержали курс на сохранение единой энергетической системы России через акционирование и приватизацию. В соответствии с Указами Президента Российской Федерации в электроэнергетике России в 1992—1993 гг. были осуществлены важнейшие преобразования: было образовано РАО «ЕЭС России» и 70 территориальных акционерных обществ энергетики и электрификации. В электроэнергетике в результате акционирования создано 101 АО, в том числе 71 АО по производству и транспортировке электроэнергии, 25 АО электростанций, 4 АО по строительству электростанций и энергетических объектов, а также РАО «ЕЭС России», которое координирует работу единой энергосистемы страны и обеспечивает взаимодействие с региональными объединениями. Организация РАО «ЕЭС России» позволила предотвратить в свое время распродажу и перепрофилирование единого строительного комплекса электроэнергетики, состоящего из 209 АО по строительству, машиностроению и стройиндустрии. Деление на АОэнерго было произведено исходя из антимонопольного характера преобразований, учета особенностей энергетики страны и принятого территориального деления. Из 71 территориального АОэнерго 51 яв-

ляются энергодефицитными и лишь 20 энергогибыточными.

В результате была сохранена единая энергетическая система России, единое управление ею, основные кадры, весь ее потенциал. Несмотря на трудности переходного периода была выполнена главная задача — обеспечение надежного и устойчивого энергоснабжения и энергетической безопасности страны. Прошедшая реформирование Единая энергетическая система страны доказала свою жизнеспособность и соответствие требованиям рыночной экономики.

В Европе активная интеграционная политика осуществляется в форме расширения действующего объединения энергетических систем — UCPTE. Подключены к сетям UCPTE объединившиеся в CENTREL энергосистемы Венгрии, Польши, Чехии и Словакии, намечается присоединение к UCPTE энергосистем Болгарии, Румынии и Турции. Европейским сообществом выделяются средства для выполнения работ по подключению к UCPTE энергосистем Литвы, Латвии и Эстонии. Подобным образом обсуждаются и различные варианты выхода UCPTE на энергосистемы Азербайджана, Армении и Грузии через сети Турции и балканских государств.

В то же время такое важное направление интеграции как организация параллельной работы между ОЭС СНГ и UCPTE не получила достаточного внимания несмотря на то, что на границе стран СНГ и Центральной Европы существуют 10 линий электропередачи, которые обеспечивали экспорт на Запад до 40 млрд кВт·ч электроэнергии ежегодно и могут позволить государствам Содружества и сейчас получать значительную прибыль от экспорта электрической энергии.

Российская энергетика внесла весомый вклад в реализацию антиинфляционной политики правительства. За период с 1990 по сентябрь 1996 г. рост цен на продукцию составил лишь 83% роста цен на промышленную продукцию. Однако тарифы на электроэнергию в России не отражают в полной мере затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии. В 1995 г. в России тарифы были ниже в 4,4 раза, чем в Италии, и ниже в 2 раза, чем в США. Поэтому чрезвычайно актуальным является установление экономически обоснованных тарифов на электроэнергию.

Энергетическая составляющая затрат в ведущих отраслях промышленности России составляет 20—40%. Для многих предприятий действующие энергетические тарифы являются непосильными и приводят их к банкротству. Поэтому в условиях кризиса неплатежей и дефицита оборотных средств предприятий уровень оплаты потребителями не превышает 75% полученной ими электрической и тепловой энергии, в том числе деньгами не более 15%. Сегодня практически на нет сведены договоры энергетиков с потребителями

электрической и тепловой энергии. Поставщик электроэнергии не может отключить должника, что ставит энергетику в неравное положение с другими отраслями.

Анализ материалов позволяет сделать вывод о том, что истоки проблем, мешающих эффективной деятельности Единой энергетической системы, находятся за пределами отрасли. Решение многих проблем развития электроэнергетики тормозится отсутствием законодательных актов по разграничению предметов ведения и полномочий между Российской Федерацией и ее субъектами. Их отсутствие является причиной постоянного возникновения конфликтных и спорных ситуаций, столкновения федеральных и региональных интересов с интересами АО «Энерго» и предприятий межрегионально-сырьевой базы.

В настоящее время ведется работа по созданию Федерального оптового рынка энергии и мощности (ФОРЭМ), который должен объединить интересы энергосистем и потребителей.

С учетом результатов обсуждения проблем и перспектив развития энергетики России и стран СНГ на II Петербургском экономическом форуме и изложенных материалов представляется целесообразным считать следующее.

1. Электрическую энергию следует рассматривать как интегрированный продукт ТЭК, поставка которой в страны СНГ и дальнего зарубежья может принести России большую экономическую выгоду, чем поставка первичных энергоносителей. Существующие энергосистемы стран СНГ технически позволяют увеличить экспорт электрической энергии.

2. На современном этапе государства СНГ обладают достаточным потенциалом в области электроэнергетики, позволяющим обеспечить надежное электроснабжение населения и отраслей экономики, способствовать подъему всей экономики.

3. Одной из основных задач СНГ должно стать формирование межгосударственного рынка электрической энергии и мощности на основе восстановления параллельной работы энергосистем отдельных стран. Ключевым звеном обеспечения параллельной работы должно стать создание Центра оперативно-технологической координации.

4. Необходимо разработать правую и нормативную базы концепции сотрудничества в отраслях ТЭК и стратегии развития электроэнергетики государств СНГ на период до 2010 г. в соответствии с решением Совета глав правительств СНГ от 03.11.95 и решениями Электроэнергетического Совета СНГ. При этом основное внимание сосредоточить на:

обеспечении эффективной ценовой политики; совершенствовании контрактно-договорной базы межгосударственных отношений, включая систему гарантий платежей, принятую в международной практике;

создании стабильной законодательно-правовой среды, привлекательной для экономических интересов зарубежных инвесторов на приемлемых для государств СНГ условиях;

урегулировании валютно-финансовых проблем в долгосрочном плане между кредиторами и должниками;

обеспечении эффективной защиты внешнеэкономических интересов государств Содружества путем создания согласованного валютного и таможенного контроля, а также разумной налоговой политики.

5. Учитывая, что износ основных фондов энергетической отрасли составляет 25–45%, необходимо разработать общую для стран Содружества программу реконструкции и замены устаревшего и выводимого из эксплуатации энергетического оборудования.

6. С целью надежного электроснабжения стран Содружества создать единую систему управления энергоресурсами и противоаварийной автоматики в энергетических сетях этих стран.

7. Сформировать постоянно действующий профессиональный научный координационный совет ТЭК государств Содружества в рамках Петербургского экономического форума.

[18.05.99]

**Авторы:** *Джсангиров Владимир Андреевич* окончил электроэнергетический факультет Киевского политехнического института в 1957 г. В 1982 г. в Институте экономических исследований Дальневосточного центра АН СССР (г. Хабаровск) защитил кандидатскую диссертацию по вопросу перспектив развития электроэнергетики. Председатель Исполнительного комитета Электроэнергетического Совета СНГ.

*Абрамович Борис Николаевич* окончил Ленинградский горный институт (ЛГИ) по специальности «Горная электромеханика» в 1961 г. В 1986 г. во ВНИИ электромашиностроения (г. Ленинград) защитил докторскую диссертацию на тему «Создание систем возбуждения для крупных синхронных двигателей (теория, расчет, применение)». Профессор кафедры электротехники и электроснабжения горных предприятий С.Петербургского государственного горного института (СПГГИ).

*Иванов Олег Всеволодович* в 1952 г. окончил ЛГИ по специальности «Горная электромеханика». В 1962 г. в Московском горном институте защитил кандидатскую диссертацию на тему «Регулирование напряжения в рудничных сетях с помощью последовательных конденсаторов». Заведующий кафедрой электротехники и электроснабжения горных предприятий СПГГИ.

*Полищук Вадим Васильевич* окончил СПГГИ по специальности «Горные машины и оборудование» в 1993 г. В 1996 г. в СПГГИ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Регулирование режима напряжения в распределительных сетях 6(10) кВ горных предприятий». Ассистент кафедры электротехники и электроснабжения горных предприятий СПГГИ.

# Об экономически целесообразных плотностях тока в линиях электропередачи энергосистем

КОВАЛЕВ И.Н., ОСИПОВ М.А.

Рассмотрены алгоритмы определения экономического сечения для сетей напряжением выше 1000 В исходя из критерия минимума приведенных затрат. Предложены корректировки данного метода. Проведен анализ состояния энергосистем по загрузке линий электропередачи на сегодняшний день. Рассмотрена программная реализация и практическая эффективность предложенных алгоритмов.

**Ключевые слова:** линии электропередачи, экономичное сечение проводов, минимум приведенных затрат, расчет

При выборе сечений проводов линий электропередачи определяющее влияние оказывает соотношение между ценами на цветные металлы и электроэнергию:

$$\gamma = A/\beta, \quad (1)$$

где  $A$  — цена единицы объема материала провода, руб./( $\text{мм}^2 \cdot \text{км}$ );  $\beta$  — стоимость электроэнергии, руб./( $\text{kВт} \cdot \text{ч}$ ).

До середины семидесятых годов первичные энергоносители были сравнительно дешевы ( $\beta \ll A$ ), поэтому сечения проводов в сетях напряжением до 1000 В рассчитывались по допустимому нагреву, т.е. по минимуму расхода проводникового материала. Сети более высоких напряжений имели гораздо большую длину и более заполненные графики нагрузок. Это обуславливало значительные потери электроэнергии в них, поэтому выбор сечений проводов проводили по экономической плотности тока. Формулу для ее оценки получил в начале века английский экономист Кельвин [1], и со временем рассматриваемая задача стала классической [2]:

$$J_3 = \sqrt{\frac{AE}{\beta \rho \tau}} = \sqrt{\gamma \frac{E}{\rho \tau}}, \quad (2)$$

где  $E$  — суммарный коэффициент приведения капиталовложений к одному году, включая амортизационный коэффициент;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала провода ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$ );  $\tau$  — время максимальных потерь, ч.

Математический механизм получения (2) не зависит от вида экономики. В плановой экономике это выражение отвечает минимуму приведенных затрат (окупаемость дополнительных капитальных затрат за нормативный срок  $T_n$  в рыночной — аналогичной окупаемости, но и

Algorithms for determining cost-efficient cross sections of the conductors of electrical networks rated at 1 kV or higher, which are based on the criterion of minimum expenditures, are considered. Improvements for this method are proposed. An analysis of the current state of electrical power systems with respect to the load on transmission lines is made. Software for practical implementation of the algorithms proposed and their efficiency are considered.

**Key words:** transmission lines, conductors, cost-efficient cross section, minimum expenditures, analysis

за некоторый расчетный период  $T$  с учетом процента на капитал (см. далее).

В условиях существовавших до середины 70-х годов устойчивых цен на топливо и цветные металлы, отношение  $A/\beta$  предопределяло для сетей высоких напряжений значительно большие сечения проводов по сравнению с предельно допустимыми по условию нагрева при одной и той же максимальной токовой нагрузке. Можно полагать, что устойчивый рост цен в течение последних двух десятков лет на первичные энергоносители и несомненное сохранение этой тенденции в будущем существенно расширяет область применения экономических методов выбора сечений проводов, распространяя их в большинстве случаев и на сети напряжением до 1000 В, хотя до настоящего времени никаких изменений в соответствующих нормативных документах не произошло.

Проблема определения сечения проводов стала весьма актуальна на современном этапе в связи с трансформацией экономики страны в рыночную, предполагающей пересмотр как методов расчета, так и двух рассмотренных ранее определяющих ценовых показателя. Существенный вклад в ее решение внесла недавно проведенная дискуссия [3], хотя многие вопросы остались открытыми.

Известно, что в проектной практике для определения оптимального сечения проводов в сетях выше 1000 В используются нормируемые значения (2) в зависимости от вида линий (величина  $A$ ), материала провода (величины  $A$  и  $\rho$ ), числа часов использования максимума  $T_n$  (величина  $\tau$ ). Стоимость потерь электроэнергии  $\beta$  при этом берется усредненной. В связи с отмеченными обстоятельствами данная проблема требует дополнительного анализа по крайней ме-

ре в трех аспектах. Во-первых, необходимо проанализировать методику экономической оптимизации, поскольку общепринятый критерий минимума приведенных затрат нуждается в корректировке с учетом современной рыночной ситуации. Во-вторых, в связи с переходом на свободные цены на первичные энергоносители и цветные металлы, привычная зона экономических решений, определяемая плотностью тока (2), еще более удалилась от технически допустимых границ (допустимый нагрев, допустимые уровни напряжения). В-третьих, стратегия реконструкции линий электропередачи в энергосистемах во многом зависит от текущего их состояния и от экономически целесообразного значения плотности тока в расчете на долговременную ценовую конъюнктуру.

**Методика расчета.** Значение  $J_3$  в соответствии с (2) получено в результате известной операции минимизации приведенных затрат [1, 3], которые применялись в качестве главного критерия экономической эффективности капитальных вложений в период плановой экономики страны и применяются в ряде случаев до сих пор. При этом коэффициент приведения в (2) определяется как

$$E = E_h + E_a + E_{ob}, \quad (3)$$

где  $E_h$  — нормативный коэффициент;  $E_a$  и  $E_{ob}$  — коэффициенты отчислений на амортизацию и обслуживание.

Определяющий экономический смысл приналежал нормативному коэффициенту  $E_h$ , который представлял собой обратную величину нормативного срока окупаемости дополнительных капиталовложений  $T_h$  (принимался в СССР в централизованном порядке на уровне 7–8 лет):

$$E_h = 1/T_h. \quad (4)$$

В условиях рыночной экономики при оценке эффективности вариантов долгосрочных инвестиций часто используется критерий их окупаемости за срок, зависящий от субъективных интересов и возможностей инвесторов и расчетной процентной ставки на капитал  $r$  [4, 5]. Покажем, что такой подход формально полностью соответствует решению (2), но при несколько иной смысловой трактовке коэффициента  $E$ .

С ростом сечения провода  $F$  при длине линии  $L$  пропорционально растут капиталовложения  $K=FLA$ , но снижаются годовые потери электроэнергии  $\Delta C_w = \beta \Delta W(F)$ . В данный момент не будем учитывать то, что с увеличением сечения меняются решения по параметрам опор линий электропередачи и, возможно, изоляторов. Это может быть учтено впоследствии, при уже из-

вестных решениях «непрерывной» задачи (например, методом экономических интервалов).

Очевидно, что экономически оптимальным решением будет такое сечение провода  $F_3$ , при котором прирост капиталовложений  $\Delta K = \Delta FLA$  вследствие прироста сечения  $\Delta F$  будет окупаться за некоторый расчетный срок  $T$  за счет соответствующего снижения ежегодных эксплуатационных затрат:

$$\Delta C = \Delta C_w - \Delta K (E_a + E_{ob}) \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta C &= \beta I^2 \rho L \tau \left( \frac{1}{F} - \frac{1}{F + \Delta F} \right) - \Delta K (E_a + E_{ob}) \approx \\ &\approx \beta I^2 \rho L \tau \frac{\Delta F}{F^2} - \Delta K (E_a + E_{ob}). \end{aligned} \quad (6)$$

Окупаемость дополнительных капиталовложений за желательный срок  $T$ , назначаемый инвестором (энергокомпанией), обеспечивается приравниванием их потоку будущих дополнительных годовых доходов (6), приведенных по стоимости к моменту инвестиций, т.е. дисконтированных. Операция дисконтирования предполагает некоторую расчетную годовую процентную ставку  $r$ , обеспечивающую прибыльность заемных средств, которую далее будем измерять в отн. ед. Равенство дополнительных капиталовложений и (6) приводят к следующему условию оптимального решения:

$$\begin{aligned} \Delta K &= \Delta L \Delta F = \beta I^2 \rho L \tau \frac{\Delta F}{F^2} \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+r)^i} - \\ &- \Delta K (E_a + E_{ob}) \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+r)^i}. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя формулу для суммы  $T$  членов убывающей геометрической прогрессии, получим следующее выражение для суммы членов ряда:

$$T_o = \sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+r)^i} = \frac{1}{r} \left[ 1 - \frac{1}{(1+r)^T} \right]. \quad (8)$$

Здесь сделано упрощающее предположение о неизменном по годам снижении потерь. Реально нужно ориентироваться на некоторое их среднее значение, либо создавать определенный «запас прочности» инвестиций по срокам их окупаемости, пренебрегая ростом нагрузки.

По своему физическому смыслу  $T_o$  — это срок окупаемости дополнительных капиталовложений без учета дисконтирования. В этом легко убедиться, если вынести  $\sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+r)^i}$  за скобки в выражении (7) и учесть (5) и (6):

$$T_o = \frac{\Delta K}{\Delta C}. \quad (8a)$$

Очевидно, что всегда  $T_o < T$ . В случае, если задается нормативный срок окупаемости  $T = T_n$  (в настоящее время это практикуется для объектов государственного значения), то в зависимости от процентной ставки  $r$  по формуле (8) определяется соответствующий бездисконтный нормативный срок окупаемости  $T_{on} < T_n$ . Последний затем и участвует в расчете приведенных затрат.

Если для отдельных объектов необщесистемного назначения выбирается другой срок окупаемости  $T$ , то соответственно ему по формуле (8) рассчитывается и другой бездисконтный срок  $T_o$ .

После деления на  $L$  и  $\Delta F$  и некоторых преобразований формула (7) приобретает вид

$$\Delta K \left( \frac{1}{T_o} + E_a + E_{ob} \right) = \beta \frac{I^2}{F^2} \rho h. \quad (9)$$

Отсюда искомое сечение  $F$  может быть найдено или непосредственно, или посредством промежуточного введения в формулу величины экономической плотности тока  $j_e$ , откуда и определяется ее значение:

$$j_e = \sqrt{\gamma \frac{E'}{\rho r}}. \quad (10)$$

Полученная формула (10) в целом соответствует используемой в настоящее время формуле (2). Различие между ними в том, что в формуле (10) в суммарный коэффициент  $E'$  входит не нормативный коэффициент (4), а коэффициент приведения, по значению обратный бездисконтуому сроку окупаемости:

$$E_n = \frac{1}{T_o}, \quad (11)$$

определеному согласно (8) в соответствии с принятым решением по реальному сроку окупаемости  $T$  и процентной ставке  $r$ .

Аналогия с общепринятым поиском оптимального сечения просматривается и в равенстве (9). Последнее является собой равенство производных от приведенных капиталовложений и стоимости годовых потерь электроэнергии, получаемое при минимизации приведенных затрат.

Таким образом, в рыночных условиях стратегия энергокомпаний по выбору сечений проводов в линиях электропередачи должна сводиться к предварительному определению следующих экономических показателей:

удельной стоимости металла  $A$  с учетом долговременной перспективы;

аналогичной стоимости электроэнергии  $\beta$ ;

допустимого срока окупаемости капиталовложений  $T$ , устраивающего энергокомпанию;

расчетной процентной ставки  $r$ .

После этого рассчитывается суммарный коэффициент приведения  $E'$  с помощью формул (8) и (11).

Следует заметить, что имеет практический смысл использовать в расчетах не максимальное (расчетное) значение токовой нагрузки и соответствующее значение  $\tau$ , а среднее значение тока  $I_c$  и соответствующее суммарное время работы линии году  $T_\Sigma$  [6], что повышает точность результатов.

**Ценовые соотношения.** Используемые в настоящее время значения плотностей тока были нормированы на основе прежних соотношений цен. Энергетический кризис восьмидесятых годов привел к новым соотношениям [7]. С этих пор стоимость электроэнергии повысилась в несколько раз. Есть все основания предполагать, что и в будущем значение  $\gamma$  (1) будет уменьшаться. Даже если ориентироваться на уменьшение данного соотношения в 2 раза, то и тогда нормируемую плотность тока нужно уменьшить, по крайней мере, в 1,5 раза.

Вместе с тем, выражение (2) не учитывает динамики роста нагрузок, а при реконструкции и расширении основных сетей энергосистем на первом месте стоит не рентабельность, а долгосрочная эффективность долгосрочных капитальных вложений. Рассматриваемый далее материал дает дополнительные основания для корректировки методов выбора сечений проводов. Что касается конкретных значений плотности тока  $j_e$ , то для полых проводов можно ориентироваться на значения 0,5–0,6 А/мм<sup>2</sup>.

**Современное состояние энергосистем по плотности тока в линиях электропередачи.** По трем различным энергосистемам был проведен статистический анализ плотностей тока в воздушных линиях электропередачи напряжением 110–330 кВ и отступлений от оптимального состояния в части дополнительных потерь и дополнительного расхода металла в расчете на современный уровень цен. На рис. 1 даны соответствующие упорядоченные диаграммы плотностей тока  $J_i$ , для наглядности расположенные в порядке возрастания.

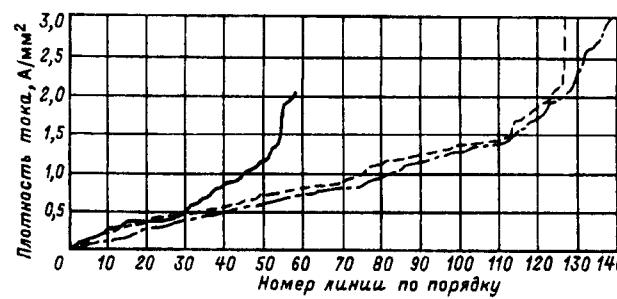


Рис. 1. Распределение плотностей тока по линиям электропередачи трех реальных энергосистем

Общим для этих трех энергосистем, расположенных в различных регионах страны, является:

чрезвычайно большой разброс плотностей тока, различающихся в десятки раз;

достаточно близкие средние значения плотностей тока, в общем соответствующие действующим нормативным значениям  $J_3$ , но превышающие значения, соответствующие нынешнему уровню цен и, тем более, перспективному.

Разброс плотностей тока по линиям влечет уже сам по себе фактическое неоптимальное состояние электрических сетей энергосистем. Конечно, в ряде случаев сечения вынужденно завышены по техническим условиям, например, по условиям механической прочности или возникновения короны. Но чаще всего отклонения от оптимальных решений носят случайный характер. Попытаемся дать им количественную оценку в части отступления от точки оптимума. Анализ показывает, что перерасход металла в одном месте не компенсируется «недорасходом» в другом, но имеет место своеобразное сложение ущербов.

**Анализ последствий неоптимального состояния энергосистем по значениям плотностей тока.** Примем следующую упрощенную схему оценки соответствующего ущерба.

Суммарные потери электроэнергии в  $N$  линиях

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i = \sum_{i=1}^N I_i^2 \rho \frac{l_i}{F_i} = \rho \sum_{i=1}^N I_i j_i l_i. \quad (12)$$

Если предположить, что значения сомножителей в (12) некоррелированы между собой и таких сомножителей достаточно много, то (12) можно записать в виде

$$\Delta P_{\Sigma} \approx \rho N j_{\text{ср}} l_{\text{ср}}. \quad (13)$$

Если далее предположить, что средняя плотность тока равна ее оптимальному значению  $J_{\text{ср}} = J_3$ , то

$$\Delta P_{\Sigma} \approx \rho N j_3 l_{\text{ср}}, \quad (14)$$

и потери согласно этой модели оказываются одинаковыми как при постоянной плотности тока по линиям, так и при ее разбросе.

Остается выяснить, не ведет ли разброс значений  $j_i$  к перерасходу металла. Суммарный расход металла

$$V = g \sum_{i=1}^N F_i l_i = g \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{J_i} l_i, \quad (15)$$

где  $g$  — вес единичного объема металла провода.

Делая прежнее предположение о некоррелированности значений токов, длин и плотностей

тока, получим

$$V = g N j_{\text{ср}} l_{\text{ср}} \left( \frac{1}{j} \right)_{\text{ср}}. \quad (16)$$

Расход же металла при постоянной плотности  $j_3$

$$V_3 = g N \frac{I_{\text{ср}} l_{\text{ср}}}{j_3}. \quad (17)$$

Даже если  $J_{\text{ср}} = J_3$ , расход металла по (16) превышает расход, определенный по (17). Этот вывод следует из того, что среднегеометрическое значение всегда меньше среднеарифметического. Оценим перерасход металла следующим образом:

$$v = \frac{V}{V_3} = \left( \frac{1}{j} \right)_{\text{ср}} j_{\text{эк}}. \quad (18)$$

Для оценки среднего значения величины в скобках нужно задаться какой-то функциональной зависимостью для диаграмм рис. 1. Будем их аппроксимировать, например, законом равномерной плотности, когда выстроенные «по росту»  $N$  плотностей  $j_i$  представляют собой линейную упорядоченную диаграмму:

$$j = j_{\text{min}} + \frac{\Delta j}{N} n = j_{\text{min}} + an. \quad (19)$$

После интегрирования (19)

$$\left( \frac{1}{j} \right)_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \int_0^N \frac{dn}{j_{\text{min}} + an} = \frac{1}{Na} [\ln j_{\text{max}} - \ln j_{\text{min}}] = \\ = \frac{1}{Na} \ln K_j = \frac{1}{j_{\text{max}} - j_{\text{min}}} \ln K_j = \frac{\ln K_j}{\Delta j}, \quad (20)$$

где  $K_j = J_{\text{max}}/J_{\text{min}}$  — диапазон разброса плотностей тока в энергосистеме.

При  $j_{\text{эк}} = j_{\text{ср}}$  формула перерасхода металла примет вид

$$v = \frac{j_{\text{min}} + j_{\text{max}}}{2} \frac{\ln K_j}{j_{\text{max}} - j_{\text{min}}} = \frac{(K_j + 1)}{2(K_j - 1)} \ln K_j. \quad (21)$$

На рис. 2 показана зависимость перерасхода металла от параметра разброса  $K_j$ . Отсюда следует, что при разбросе значений  $j$  в несколько десятков раз, что соответствует реальной ситуации в энергосистемах (рис. 1), перерасход металла достигает 100% и более. При этом понятие «перерасход» предполагает то, что при рациональном распределении металла по линиям в

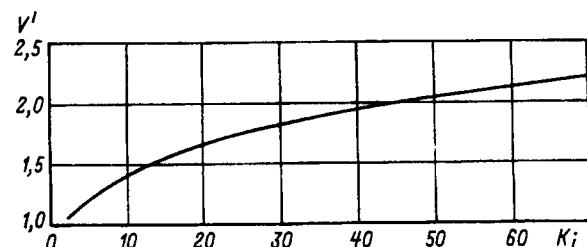


Рис. 2. Зависимость перерасхода металла в линиях энергосистемы от разброса плотностей тока при линейной диаграмме их распределения

соответствии с постоянной плотностью тока при том же уровне потерь электроэнергии потребовалось бы значительно меньше металла. Вопрос можно трактовать и иначе. При рациональном распределении имеющегося металла удалось бы значительно уменьшить потери электроэнергии.

Принято линейную модель распределения плотностей тока по линиям энергосистем не имеет смысла совершенствовать, поскольку она не имеет расчетного характера, а только сугубо показательный (найти текущий расход металла довольно просто напрямую, равно как и выяснить соответствующий его перерасход по сравнению с вариантом  $j = \text{const}$ ).

**Период окупаемости дополнительных капиталовложений при снижении нормируемого значения экономической плотности тока.** Обоснованное ранее снижение плотности тока ведет к увеличению расхода цветных металлов, а значит — к росту капитальных вложений на  $\Delta K$ . Их эффективность не вызывает сомнений, поскольку экономический механизм получения оптимальных сечений, рассмотренный ранее, обеспечивает окупаемость «последней порции» металла за нормативный срок с учетом дисконтирования потока ежегодных дополнительных поступлений от снижения потерь. Срок же окупаемости  $\Delta K$  будет задома ниже, чем нормативный, поэтому формально нет необходимости заниматься проверкой экономической эффективности усиления линий электропередачи. Однако при современных ограниченных инвестиционных возможностях все-таки представляет практический интерес оценка соответствующего периода окупаемости. Пусть экономическая плотность тока в связи с изменением ценового соотношения (1) уменьшилась со значения  $j_1$  до  $j_2$ . При этом цены на металл и электроэнергию стали равными  $A_2$  и  $\beta_2$  (вместо  $A_1$  и  $\beta_1$ ). Искомый бездисконтный срок окупаемости с учетом (6)

$$T_o' = \frac{\Delta K}{\Delta C} = \frac{(F_2 - F_1)A_2}{\beta_2 \tau \rho I^2 \left( \frac{1}{F_1} - \frac{1}{F_2} \right) - (F_2 - F_1)(E_a + E_{ob})} = \\ = \frac{1}{E' \frac{j_1}{j_2} - (E_a + E_{ob})}, \quad (22)$$

отсюда следует, что  $T_o' < T_o \frac{j_2}{j_1}$ .

Таким образом, при уменьшении плотности тока, например в 2 раза, соответствующие дополнительные капитальные вложения окупаются бездисконтно, по крайней мере, в 2 раза быстрее, чем заданный исходный срок окупаемости  $T$ . Имеется в виду рациональная стратегия реконструкции, когда прежде всего усиливаются перегруженные линии (правая часть диаграмм рис. 1).

**Выводы.** 1. В связи с устойчивым повышением цен на электроэнергию требуют пересмотр нормативные значения экономических плотностей тока в сторону их снижения.

2. Методика определения экономической плотности тока в условиях рынка предполагает внесение корректиров в известный метод приведенных затрат и их минимизации. Так, в зависимости от расчетной процентной ставки на капитал и необходимого срока окупаемости капиталовложений подлежит определению бездисконтный срок окупаемости этих вложений, который и участвует в приведенных затратах вместо срока  $T$  (или  $T_h$ ).

3. Анализ текущего состояния энергосистем по загрузке линий электропередач выявил весьма большой разброс плотностей тока по отдельным линиям (несколько десятков раз). Это определяет существенный экономический ущерб, что свидетельствует либо о большом перерасходе металла, либо о дополнительных потерях электроэнергии, которых можно было бы избежать при рациональном распределении металла, использованного в линиях электропередач.

4. Переход на новые нормируемые плотности тока, соответствующие современным соотношениям цен на цветные металлы и электроэнергию, позволит существенно уменьшить потери электроэнергии в линиях электропередачи при окупаемости дополнительных капитальных вложений за 2–3 года.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнорринг Г.М., Харчев М.К. Цеховые электрические сети. Вопросы построения и выполнения. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1952.
2. Электрические системы. Т. 2. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1971.
3. Дискуссия по статье Л.М. Зельцбурга «Парадоксы проблемы экономической плотности тока и ее решение». — Промышленная энергетика, 1995, № 5.
4. Кочевич Е. Финансовая математика: Теория и практика финансово-банковских расчетов. — М.: Финансы и статистика, 1994.
5. Бирман Г., Шмидт С. Экономический анализ инвестиционных проектов. — М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997.
6. Каляев Г.М. Основы анализа нагрузок и расчета электрических сетей промышленных предприятий.
7. Энергетика мира: переводы докладов XIII конгресса МИРЭК / Под ред. Б. Лебедева, П. Матко. — М.: Энергатомиздат, 1989.

[03.07.98]

*Авторы: Ковалев Игорь Николаевич окончил Ростовский-на-Дону институт инженеров железнодорожного транспорта (ныне Ростовский-на-Дону государственный университет путей сообщения — РГУПС) в 1963 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методы расчетов оптимальной компенсации переменных реактивных нагрузок в электрических сетях» в Новочеркасском политехническом институте. Доцент кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» РГУПС.*

*Осипов Михаил Александрович окончил РГУПС в 1992 г. Сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники» РГУПС.*

# Оценка неповреждаемости энергосистемы по статистическим данным о технологических нарушениях

СКОПИНЦЕВ В.А.

На основе установленных свойств энергосистемы в целом и потока повреждений предлагаются показатели неповреждаемости и методика их определения по данным ежемесячной отчетности и технологических нарушениях. Приводятся примеры расчетов по данным АО «Кузбассэнерго» и АО «Новгородэнерго». Показатели неповреждаемости могут быть использованы на уровне управления энергосистемой для принятия решений по совершенствованию организации эксплуатации и обоснованию направлений развития энергосистемы.

**Ключевые слова:** энергосистема, технологические нарушения, управление, эксплуатация

Анализ аварийности в энергосистемах является одной из основных задач расследования и учета технологических нарушений [1]. При этом под аварийностью понимается одна из характеристик работы системы, определяемая числом технологических нарушений и их последствиями за определенный период эксплуатации.

Согласно существующей практике эксплуатации энергосистемы ежемесячно представляют сведения о числе технологических нарушений за истекший месяц. Анализ статистических данных часто сводится к определению абсолютных или относительных изменений по сравнению с предыдущим периодом эксплуатации или к вычислению искусственно составленного коэффициента аварийности, например, приведенного в [2]. Однако отмеченные показатели не дают приемлемую для практического использования оценку аварийности в энергосистемах.

Применение методов теории надежности [3, 4] для анализа аварийности в энергосистеме, как единому комплексу, имеет определенные трудности. Указанные методы ориентированы на оценку надежности серийного оборудования и типовых конструкций и сооружений. При известных характеристиках надежности элементов системы эти методы позволяют оценить надежность технологической связи между теми или иными узлами (частями) системы. Однако причинами технологических нарушений являются не только неполадки в оборудовании, но и опасные внешние воздействия на элементы системы и ошибки человека при управлении технологическими процессами в энергосистеме (рис. 1). Необходимость учета поведения человека и влияние

*On the basis of the established properties of an electrical power system as a whole and flow of faults indices of an unfaultability and methods of their determination by the monthly accounting data on technological violations are proposed. Examples of calculations according to the data of AO «Kuzbassenergo» and AO «Novgorodenergo» are given. The unfaultability indices can be used at the level of the electrical power system control for taking decisions concerning the improvement of organization of exploitation and a substantiation of directions of the electrical power system development.*

**Ключевые слова:** electrical power system, technological violations, control, exploitation

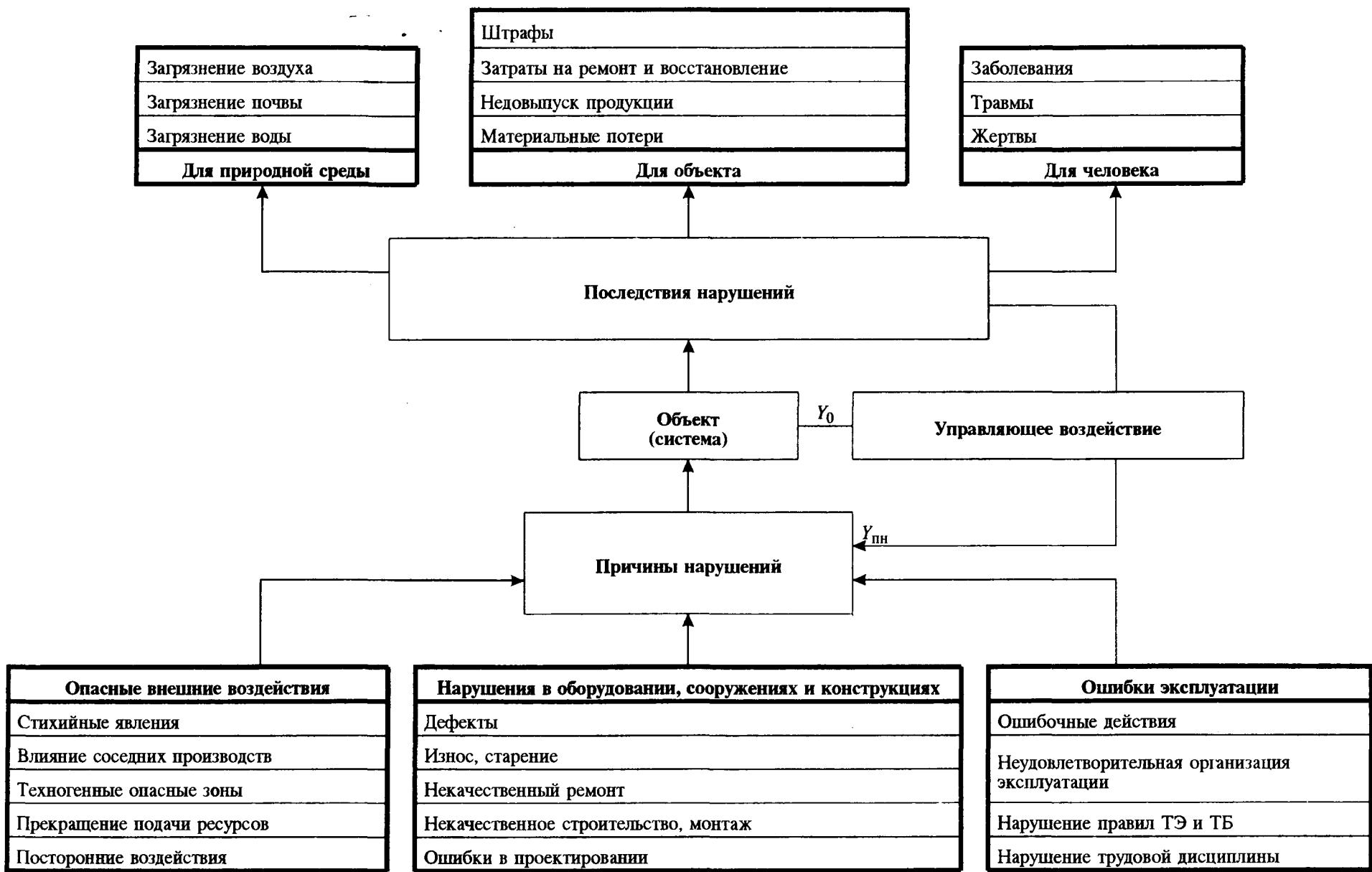
внешней среды существенно ограничивают применение теории надежности для целей анализа аварийности в энергосистеме.

Учитывая потребность в обобщенных оценках аварийности в энергосистеме, далее предлагается подход к определению показателей неповреждаемости по данным ежемесячной статистической отчетности энергосистемы о технологических нарушениях на электростанциях и в сетях по форме «16 энерго». Указанные показатели рекомендуются для периодического контроля их изменения во времени для выявления негативных тенденций и принятия решений на соответствующие управляющие воздействия на устранение или ослабление причин технологических нарушений или на отдельные элементы системы (рис. 1). В последнем случае имеется в виду замена или реконструкция энергетического оборудования, установка систем диагностики или локализации нарушений и другое.

**Свойства энергосистемы.** При оценке работы технической системы важным этапом исследования является выявление свойств и особенностей объекта наблюдения. Это необходимо для обоснования использования тех или иных показателей и методов их определения.

На уровне рассмотрения работы энергосистемы в целом следует выделить следующие ее свойства, обусловленные объединением на совместную работу большого числа разнотипного оборудования и других элементов системы.

**Уникальность.** Каждая энергосистема характеризуется своими размерами: числом и установленной мощностью электростанций, числом электроподстанций, длиной линий электропереноски



дачи равных уровней напряжения и др. Имеются различия и в структуре энергосистем: наличие и доля тех или иных типов электростанций, наличие тепловых сетей и др. В результате этого каждая энергосистема представляет собой уникальный объект исследования, что накладывает ограничение на использование рекомендуемых в [4] методов оценки показателей надежности. Кроме того, появляются трудности в сопоставлении разных энергосистем по аварийности, что вынуждает искать способы приведения показателей к одноковому для всех систем эквиваленту.

**Неоднородность элементов.** В составе энергосистемы содержится большое число разных типов и вида оборудования (теплотехнического, гидротехнического, электротехнического и др.), конструкций и сооружений с разными производственными характеристиками, сроками эксплуатации и показателями надежности работы. Очевидно, что уровень аварийности всей энергосистемы в целом во многом определяется менее надежными ее элементами.

**Непрерывность развития, обновления и совершенствования.** Указанное свойство обеспечивается постоянным проведением плановых и внеплановых ремонтов, выводом из эксплуатации отработавших свой ресурс элементов и вводом новых элементов, внедрением прогрессивных технологических и технических решений и др. При этом энергосистема не прекращает выполнять свои производственные функции. Отмеченные обстоятельства делают понятия «ремонтопригодности» и «долговечности» (а также соответствующие им показатели надежности) неопределенными для оценки аварийности энергосистемы в целом.

**Адаптивность к воздействиям.** В энергосистеме имеют место различные виды резервирования: топлива, генерирующей мощности, линий передачи энергии, преобразующих элементов, систем управления, связи, автоматики и релейной защиты и прочего, в результате чего система становится приспособленной ко многим воздействиям. Это проявляется в том, что при отказе одного или даже нескольких элементов энергосистема сохраняет работоспособное состояние (за исключением редких случаев полного «развала» системы), однако на какое-то время возможны изменения некоторых рабочих характеристик и параметров в отдельной ее части. Согласно определениям теории надежности можно сказать, что практически все учитываемые в [1] технологические нарушения (аварии, технологические и функциональные отказы) являются повреждениями, которые приводят энергосистему в неисправное состояние. В этой связи применительно к энергосистеме в целом следует рассматривать показатели «неповреждаемости», а

не «безотказности», как это принято на уровне оборудования. Это, однако, не исключает исследований и получение соответствующих оценок для редких случаев развала системы, когда технологическое нарушение приводит к потере энергосистемой работоспособного состояния.

**Инертность определяющих свойств (качеств).** При отсутствии искусственно созданных разрушающих воздействий изменения определяющих свойств (качеств) и характеристик энергосистемы происходят постепенно с относительно небольшой скоростью. В качестве примера можно указать незначительный прирост (снижение) общего числа технологических нарушений по годам в каждой конкретно взятой энергосистеме, хотя внутри года эти изменения по месяцам могут быть значительными вследствие сезонных циклов аварийности. Последние, однако, не характеризуют изменение общего уровня аварийности энергосистемы.

**Иерархичность структуры и управления.** Энергосистема по своей структуре, организации эксплуатации и принципам управления относится к иерархическим многоуровневым системам. Известно [5], что функционирование такой системы описывается семейством моделей, каждая из которых отражает поведение системы с точки зрения различных уровней абстрагирования и рассмотрения. Для каждого уровня существует ряд характерных особенностей и переменных, законов и принципов. Принципы и законы, используемые для характеристики системы на любом уровне, в общем случае не могут быть выведены из принципов, используемых на других уровнях.

Обычно уровни рассмотрения работы энергосистемы совмещают с уровнями управления и в зависимости от этого определяются объем и состав полезной информации, которые требуются для принятия решения на данном уровне. При этом руководствуются следующим принципом: при изучении системы на нижнем уровне рассмотрения концентрируется внимание на действиях подсистем, откладывая изучение их взаимодействия для более высокого уровня управления [5].

Показатели аварийности энергосистемы в целом необходимы для принятия квалифицированных решений на уровне управления системой.

**Исследование потока повреждений.** Качественный анализ приведенных на рис. 1 причин повреждений энергосистемы показывает, что большинство из них имеет вероятностный характер, где случайность играет большую или меньшую роль. Действительно, процессы старения и износа, проявление различного рода дефектов, внешние воздействия зависят от многих случайных факторов. Технологические нарушения

из-за ошибок эксплуатации во многом зависят от опыта и квалификации обслуживающего персонала, однако и в этих случаях случайность играет немалую роль.

Возникающие в многочисленных разнородных элементах энергосистемы технологические нарушения образуют поток событий — повреждений, появляющихся одно за другим в случайные моменты времени. Этот поток повреждений обладает следующими свойствами [6]: во-первых, он является ординарным и, во-вторых, представляет собой поток без последствия. Кроме того, поток повреждений в общем случае является нестационарным, так как его интенсивность (плотность) изменяется во времени. При этом под интенсивностью  $\lambda(t)$  понимается среднее число событий (повреждений), приходящихся на единицу времени.

При отмеченных свойствах потока повреждений в энергосистеме согласно предельной теореме потоков [6] число повреждений  $X(t, \tau)$ , возникающих на участке времени  $(t, t+\tau)$ , имеет распределение Пуассона:

$$p\{X(t, \tau)=k\} = \frac{a(t, \tau)^k}{k!} e^{-a(t, \tau)}, \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (1)$$

$$\text{где } a(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} \lambda(t) dt ..$$

Исследование временных рядов общего числа технологических нарушений в энергосистемах, составленных на основе ежемесячной статистической отчетности, показало [7], что ряды с удовлетворительной статистической значимостью (1–5%) имеют тенденцию изменения во времени (тренд), выражаемую аналитической зависимостью вида

$$X(t, \Delta t) = a_0 + bt + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — единица измерения времени, равная одному месяцу;  $a$ ,  $b$ ,  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  — параметры аппроксимирующей временной ряд функции.

Наличие в тренде колебательной составляющей вызвано сезонными циклами аварийности, так как значение периода  $T=2\pi/\omega$  оказалось близким к 12 месяцам. Кроме того, установлено, что абсолютное значение параметра  $b$  в (2) на два порядка меньше параметра  $a_0$ . Данный факт согласуется с ранее отмеченной инертностью определяющих свойств и характеристик системы.

Тренд (2) находится по статистической выборке на ограниченном периоде наблюдения и представляет собой математическое ожидание числа технологических нарушений в единицу времени, т.е. характеризует среднее число нарушений за месяц. Полагая, что каждое технологическое нарушение приводит энергосистему в неисправ-

ное состояние, допустимо рассматривать тренд в качестве интенсивности потока повреждений в системе.

Далее будем исходить из того, что исходная статистическая информация о технологических нарушениях в энергосистеме задана на периоде наблюдения, ограниченном двумя-тремя годами. При этом можно пренебречь составляющей с параметром  $b$  в (2), не внося существенной погрешности в конечные результаты исследований, и задать интенсивность потока повреждений в виде

$$\lambda(t) = a_0 + A \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

При известной интенсивности потока повреждений из (1) определим вероятность отсутствия повреждений в энергосистеме на участке  $(t, t+\tau)$ :

$$\begin{aligned} p_0(t, \tau) &= p\{X(t, \tau) = 0\} = \\ &= \exp \left\{ - \int_t^{t+\tau} [a_0 + A \sin(\omega t + \varphi)] dt \right\} = \\ &= \exp [-a_0 \tau + A' \sin(\omega t + \varphi')], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } A' = \frac{2A}{\omega} \sin \frac{\omega \tau}{2}; \quad \varphi' = \frac{\omega \tau}{2} + \varphi.$$

Вероятность  $p_0(t, \tau)$  является функцией времени, что объясняется влиянием сезонных циклов аварийности. Для исключения этого влияния найдем среднюю вероятность отсутствия повреждений за время  $\tau$  на периоде наблюдения, кратном периоду сезонных колебаний аварийности:

$$\begin{aligned} p_{cp}(T, \tau) &= \frac{1}{mT} \int_0^{mT} p_0(t, \tau) dt = \frac{1}{mT} e^{-a_0 \tau} \times \\ &\quad (m=1, 2, 3) \\ &\quad \times \int_0^{mT} e^{-A' \sin(\omega t + \varphi')} dt. \end{aligned}$$

Разлагая подынтегральное выражение в ряд и выполняя почлененное интегрирование, после преобразований с учетом введенных в (4) обозначений получим

$$p_{cp}(T, \tau) = e^{-a_0 \tau} \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{A m T}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m T} \tau \right)^k \frac{1}{k!} \right]^2 \right\}. \quad (5)$$

Средняя вероятность  $p_{cp}(T, \tau)$  не зависит от времени  $t$  и может представлять характеристику энергосистемы в целом — «неповреждаемость» на периоде наблюдения.

В качестве примера на рис. 2 точками отмечено общее число технологических нарушений по месяцам, произошедших в Кузбассэнерго в 1994 и 1995 гг. Для наглядности указанные

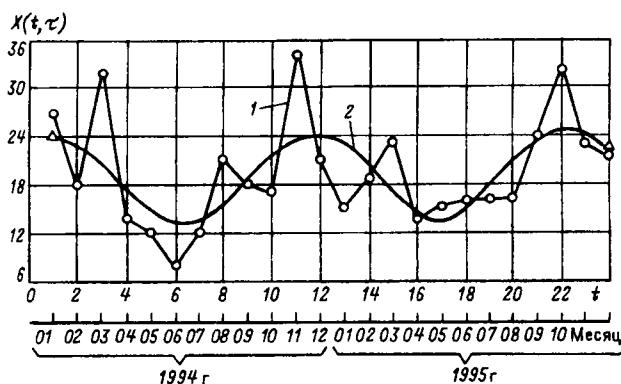


Рис. 2. Число технологических нарушений в АО «Кузбассэнерго»: 1 — статистические данные; 2 — тренд

точки объединены сплошной ломаной линией. На этом же рис. 2 кривая 2 — тренд (статистическая значимость 5%), полученный аппроксимацией исходных данных аналитической зависимостью вида (2):

$$X(t, \Delta t) = 18,5 + 0,042t + 5,43 \sin(0,56t + 88^\circ).$$

Период сезонных циклов аварийности  $T = 2\pi/0,56 = 11,2$  мес.

Некоторое отличие периода колебаний от 12 мес. объясняется непродолжительностью периода наблюдения и возможным небольшим смещением смены сезонов в отдельные годы.

При  $\tau = 1$  мес. по формуле (5) рассчитываем среднюю вероятность отсутствия повреждений:

$$p_{cp}(24,1) = e^{-18,5} \times \times \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{5,43 \cdot 24}{2\pi} \sin \frac{\pi}{24} \right)^k \frac{1}{k!} \right]^2 \right\} = 0,364 \cdot 10^{-6}.$$

Для сравнения по данным Новгородэнерго за тот же период наблюдения тренд числа технологических нарушений (статистическая значимость 1%) имеет вид

$$X(t, \Delta t) = 10,1 - 0,04t + 3,6 \sin(0,54t - 65,5^\circ).$$

После выполнения расчетов получим:

$$T = 11,6 \text{ мес.}; p_{cp}(24,1) = 0,325 \cdot 10^{-3}.$$

Сравнение результатов расчетов для двух рассмотренных энергосистем приводит к выводу, что неповреждаемость Новгородэнерго выше, чем Кузбассэнерго. Однако полученные оценки имеют существенный недостаток — они не учитывают размеры и структуру сравниваемых энергосистем. Суммарная установленная мощность тепловых электростанций Кузбассэнерго почти в 45 раз превосходит эту же мощность Новгородэнерго. Суммарная длина линий электропередачи в Кузбассэнерго в несколько раз больше этой длины

в Новгородэнерго. В структуре Новгородэнерго отсутствуют тепловые сети. Все это снижает практическую ценность использования полученных оценок неповреждаемости энергосистем.

**Показатели неповреждаемости.** Правлением РАО «ЭС России» (протокол от 29.10.93 г. № 28-пр) утверждена форма ежемесячной отчетности энергосистем о произошедших технологических нарушениях на электростанциях и в сетях «16 энерго». В этом отчетном документе содержится не только общее число аварий, технологических и функциональных отказов в энергосистеме в течение месяца, но и выделяются нарушения отдельно на тепловых электростанциях, на гидростанциях, в электрической сети и в тепловой сети. Другими словами, в структуре энергосистемы выделяется четыре крупные подсистемы, по которым ведется учет технологических нарушений. Каждая из выделенных подсистем обладает теми же свойствами, что были ранее сформулированы для энергосистемы в целом, а технологические нарушения образуют в каждой из них потоки повреждений, которые представляют собой независимые пуссоновские потоки событий. Для сформулированных условий согласно предельной теореме потоков [6] интенсивность потока повреждений энергосистемы в целом равна сумме интенсивностей потоков повреждений составляющих ее подсистем:

$$\lambda(t) = \lambda^{(ТЭС)}(t) + \lambda^{(ГЭС)}(t) + \lambda^{(ЭС)}(t) + \lambda^{(ТС)}(t),$$

где  $\lambda^{(ТЭС)}(t)$ ,  $\lambda^{(ГЭС)}(t)$ ,  $\lambda^{(ЭС)}(t)$  и  $\lambda^{(ТС)}(t)$  — интенсивности потоков повреждений соответственно на тепловых электростанциях, на гидроэлектростанциях, в электрической сети и в тепловой сети энергосистемы.

Подставляя (6) в (1) при  $k=0$ , получим:

$$p_0(t, \tau) = p_0^{(ТЭС)}(t, \tau) p_0^{(ГЭС)}(t, \tau) p_0^{(ЭС)}(t, \tau) \times \times p_0^{(ТС)}(t, \tau), \quad (7)$$

т.е. вероятность отсутствия повреждений в энергосистеме на участке  $(t, t+\tau)$  равна произведению вероятностей отсутствия повреждений в составляющих ее подсистемах на этом же участке времени.

На интенсивность потоков повреждений каждой из выделенных подсистем оказывают влияние сезонные условия эксплуатации. Так, например, в электрических сетях некоторых энергосистем максимум аварийности приходит на начало лета, когда новая поросль на деревьях, падение деревьев и грозовая активность вызывают повышенный поток нарушений. Для тепловых электростанций, работающих на угле, неблагоприятными могут оказаться зимние меся-

цы, когда смерзшийся уголь и утяжеленные условия эксплуатации стимулируют повышенное число технологических нарушений.

С учетом сезонных влияний на аварийность будем характеризовать интенсивность потока повреждений каждой подсистемы зависимостью вида (3):

$$\lambda^{(j)}(t) = a_0^{(j)} + A^{(j)} \sin(\omega t + \varphi^{(j)}), \quad (8)$$

где индекс  $j$  может быть: (ТЭС) — тепловые электростанции; (ГЭС) — гидроэлектростанции; (ЭС) — электрические сети, (ТС) — тепловые сети.

Значения параметров  $a_0^{(j)}$  и  $A^{(j)}$  в выражении (8) зависят от размеров подсистемы, т.е. числа, типа и вида оборудования, сооружений и конструкций. Для того чтобы ослабить это влияние, необходимо найти способ приведения  $\lambda^{(j)}(t)$  к единому для всех энергосистем эквиваленту. Предлагается использовать для этих целей применяемое в практике эксплуатации энергосистем понятие приведенной мощности.

Приказом Минэнерго СССР от 26.01.87 г. № 51 введена в действие методика определения приведенной мощности электростанций, электрической и тепловой сетей, в которых принята условная единица измерения [у.е.], обозначаемая так же, как приведенный мегаватт [пр. МВт]. В этой методике на основе принципов научной организации труда разработаны специальные таблицы для пересчета. Так, например, при определении приведенной мощности электростанции принимаются во внимание ее тип, установленная мощность и вид используемого первичного ресурса. Для определения приведенной мощности электрической сети необходимо знать суммарную длину линий электропередачи разных уровней напряжения, число подстанций и трансформаторных пунктов. В практике эксплуатации энергосистем суммарная приведенная мощность энергосистемы используется для определения категории энергосистемы, обоснования штатного расписания, а также для расчета коэффициента аварийности энергосистемы [2].

Достоинством использования приведенной мощности является то, что она в единообразной и сопоставимой форме характеризует объем сфер обслуживания разнообразных элементов энергосистемы.

Пусть известны суммарные приведенные мощности выделенных подсистем энергосистемы: тепловых электростанций —  $(N_{\text{пр}}^{(\text{ТЭС})})$ , гидроэлектростанций —  $(N_{\text{пр}}^{(\text{ГЭС})})$ , электрической сети —  $(N_{\text{пр}}^{(\text{ЭС})})$  и тепловой сети —  $(N_{\text{пр}}^{(\text{ТС})})$ . Будем относить интенсивность потока повреждений каждой подсистемы к 10 пр. МВт, т.е.

$$\bar{\lambda}^{(j)}(t) = \frac{10}{N_{\text{пр}}^{(j)}} \lambda^{(j)}(t) = \frac{10}{N_{\text{пр}}^{(j)}} a_0^{(j)} + \frac{10A^{(j)}}{N_{\text{пр}}^{(j)}} \sin(\omega t + \varphi^{(j)}), \quad (9)$$

где индекс  $j$  имеет тот же смысл, что и в (8).

В качестве примера: значение 10 пр. МВт соответствует приблизительно 350 км воздушных линий электропередачи или двум подстанциям 220–330 кВ; ГРЭС с установленной мощностью 300 МВт при использовании в качестве топлива экибастузского угля соответствует 330 пр. МВт, а в случае газа — 250 пр. МВт.

С использованием (5) и (9) запишем выражение для средней вероятности отсутствия повреждений в  $j$ -й подсистеме за время  $\tau$  на периоде наблюдения, кратному периоду сезонных колебаний аварийности:

$$\bar{p}_{\text{ср}}^{(j)}(T, \tau) = e^{-(10/N_{\text{пр}}^{(j)}) a_0^{(j)} \times (m=1, 2, 3)} \times \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{10A^{(j)} m T}{2\pi N_{\text{пр}}^{(j)}} \sin \frac{\pi}{m T} \tau \right)^k \frac{1}{k!} \right]^2 \right\}, \quad (10)$$

где индекс  $j$  имеет тот же смысл, что и в (8).

Эта вероятность  $\bar{p}_{\text{ср}}^{(j)}(T, \tau)$  не зависит от значения  $t$  и может характеризовать аварийность  $j$ -й подсистемы на момент времени  $t+\tau$ : ее неповреждаемость за время  $\tau$  на периоде наблюдения.

Для практического использования формулу (10) можно упростить, не внося существенных погрешностей в итоговый результат. При использовании в качестве исходных данных ежемесячных отчетов энергосистем о прошедших технологических нарушениях в течение месяца естественно принимать  $\tau=1$  мес. Период наблюдения (выборка статистических данных) должна составлять  $T_{\text{набл}}=12m$  мес. ( $m=1, 2, 3$ ). Нетрудно заметить, что при этом

$$\sin \frac{\pi}{12m} \approx \frac{\pi}{12m} \quad (m=1, 2, 3).$$

Кроме того, практика проведения расчетов для реальных энергосистем показал, что  $N_{\text{пр}}^{(j)} \geq 300$  пр. МВт и  $A^{(j)} \leq 10$ . Непосредственной подстановкой указанных значений в (10) можно убедиться, что погрешность не превышает 5%, если расчеты вести по упрощенной форме:

$$\bar{p}_{\text{ср}}^{(j)}(T, \tau) \approx \exp \left( - \frac{10a_0^{(j)}}{N_{\text{пр}}^{(j)}} \right). \quad (11)$$

Переход от расчетной формулы (10) к (11) существенно сокращает объем вычислительных работ. Это достигается, прежде всего, за счет исключения операции отыскания амплитуды ко-

лебательной составляющей тренда (8). Постоянную составляющую тренда нетрудно рассчитать по исходным статистическим данным:

$$a_0^{(j)} \approx \frac{n^{(j)}}{T_{\text{набл}}} = \frac{n^{(j)}}{12m} \quad (m=1, 2, 3), \quad (12)$$

где  $n^{(j)}$  — число технологических нарушений в  $j$ -й подсистеме за время наблюдения.

Таким образом, для оперативной оценки неповреждаемости рекомендуются следующие расчетные формулы:

для тепловых электростанций энергосистемы:

$$\bar{p}_0^{(\text{TЭС})}(T, \tau) = \exp \left( -\frac{10n^{(\text{TЭС})}}{12mN_{\text{пр}}^{(\text{TЭС})}} \right) \quad (m=1, 2, 3); \quad (13)$$

для гидроэлектростанций энергосистемы:

$$\bar{p}_0^{(\text{ГЭС})}(T, \tau) = \exp \left( -\frac{10n^{(\text{ГЭС})}}{12mN_{\text{пр}}^{(\text{ГЭС})}} \right) \quad (m=1, 2, 3); \quad (14)$$

для электрической сети энергосистемы:

$$\bar{p}_0^{(\text{ЭС})}(T, \tau) = \exp \left( -\frac{10n^{(\text{ЭС})}}{12mN_{\text{пр}}^{(\text{ЭС})}} \right) \quad (m=1, 2, 3); \quad (15)$$

для тепловой сети энергосистемы:

$$\bar{p}_0^{(\text{ТС})}(T, \tau) = \exp \left( -\frac{10n^{(\text{ТС})}}{12mN_{\text{пр}}^{(\text{ТС})}} \right) \quad (m=1, 2, 3). \quad (16)$$

Обобщенный показатель неповреждаемости (ОПН) энергосистемы в целом согласно (7) имеет вид

$$\begin{aligned} \text{ОПН} &= \bar{p}_0^{(\text{TЭС})}(T, \tau) \bar{p}_0^{(\text{ГЭС})}(T, \tau) \bar{p}_0^{(\text{ЭС})}(T, \tau) \bar{p}_0^{(\text{ТС})}(T, \tau) = \\ &= \exp \left[ -\frac{10}{12m} \left( \frac{n^{(\text{TЭС})}}{N_{\text{пр}}^{(\text{TЭС})}} + \frac{n^{(\text{ГЭС})}}{N_{\text{пр}}^{(\text{ГЭС})}} + \frac{n^{(\text{ЭС})}}{N_{\text{пр}}^{(\text{ЭС})}} + \frac{n^{(\text{ТС})}}{N_{\text{пр}}^{(\text{ТС})}} \right) \right] \quad (m=1, 2, 3). \end{aligned} \quad (17)$$

Обобщенный ПН энергосистемы характеризует среднюю вероятность отсутствия повреждений за время  $\tau$  на период наблюдения, кратном периоду сезонных колебаний аварийности, в условной энергосистеме, содержащей в своем составе по 10 пр. МВт на тепловых электростанциях, на гидроэлектростанциях, в электрической сети и в тепловой сети и имеющей число технологических нарушений на 1 пр. МВт в указанных подсистемах такое же, как и в рассматриваемой энергосистеме.

Примеры. В таблице содержатся данные о числе технологических нарушений, произошедших в Кузбассэнерго за 1994 и 1995 гг. В составе энергосистемы имеются тепловые электростанции, электрические и тепловые сети, приведенная мощность которых изменялась в течение анализируемого периода. Эти изменения также отражены в таблице.

При  $\tau = 1$  мес. и  $T_{\text{набл}} = 12$  мес. рассчитаем по формулам (12)–(17) показатели неповреждаемости энергосистемы в целом и ее подсистем на начало января 1995 г.

За период наблюдения с января по декабрь 1994 г. в энергосистеме произошло технологических нарушений:  $n^{(\text{TЭС})} = 191$ ;  $n^{(\text{ГЭС})} = 42$ ;  $n^{(\text{ТС})} = 3$ .

За этот же период средняя приведенная мощность подсистем составила:

для тепловых электростанций

$$N_{\text{пр}}^{(\text{TЭС})} = \frac{3 \cdot 3828,8 + 6 \cdot 3717,2 + 3725,3 + 3836,9}{12} = 3765,7 \text{ пр.МВт};$$

Год	Месяц	Приведенная мощность, МВт в АО «Кузбассэнерго»				Число технологических нарушений			
		ТЭС	Электрическая сеть	Тепловая сеть	Всего	На ТЭС	В электрической сети	В тепловой сети	На ТЭС
1994	январь	3828,8	1228,1	326,8	5383,7	23	4	0	0
1994	февраль	3828,8	1228,1	326,8	5383,7	17	0	1	2
1994	март	3828,8	1228,1	326,8	5383,7	25	8	1	0
1994	апрель	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	14	0	0	1
1994	май	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	11	1	0	0
1994	июнь	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	5	3	0	0
1994	июль	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	8	4	0	1
1994	август	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	20	1	0	0
1994	сентябрь	3717,2	1228,1	326,8	5272,1	11	7	0	1
1994	октябрь	3725,3	1228,1	326,8	5280,2	14	3	0	0
1994	ноябрь	3836,9	1228,1	326,8	5291,8	23	10	1	1
1994	декабрь	3836,9	1228,1	326,8	5291,8	20	1	0	0
1995	январь	3873,4	1233,1	326,8	5433,3	14	1	0	1
1995	февраль	3873,4	1233,1	326,8	5433,3	13	6	0	2
1995	март	3873,4	1233,1	326,8	5433,3	20	3	0	0
1995	апрель	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	8	6	0	0
1995	май	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	10	5	0	0
1995	июнь	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	9	7	0	0
1995	июль	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	6	10	0	0
1995	август	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	8	8	0	0
1995	сентябрь	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	18	6	0	0
1995	октябрь	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	20	12	0	0
1995	ноябрь	3748,9	1233,1	329,8	5311,9	17	6	0	0
1995	декабрь	3930,7	1233,1	329,8	5492,9	18	4	0	1

для электрической сети

$$N_{\text{пр}}^{(\text{ЭС})} = \frac{12 \cdot 1228,1}{12} = 1228,1 \text{ пр.МВт};$$

для тепловой сети

$$N_{\text{пр}}^{(\text{ТС})} = \frac{12 \cdot 326,8}{12} = 326,8 \text{ пр.МВт}.$$

Показатели неповреждаемости подсистем равны:

$$\bar{p}_0^{(\text{ТЭС})}(T, \tau) = \exp\left(-\frac{10 \cdot 191}{12 \cdot 3765,7}\right) = 0,9586;$$

$$\bar{p}_0^{(\text{ЭС})}(T, \tau) = \exp\left(-\frac{10 \cdot 42}{12 \cdot 1228,1}\right) = 0,9718;$$

$$\bar{p}_0^{(\text{ТС})}(T, \tau) = \exp\left(-\frac{10 \cdot 3}{12 \cdot 326,8}\right) = 0,9923.$$

Вычислим обобщенный показатель неповреждаемости ОПН энергосистемы в целом:

$$\text{ОПН} = 0,9586 \cdot 0,9718 \cdot 0,9923 = 0,9244.$$

В дальнейшем при расчете показателей неповреждаемости на начало последующих месяцев использовалась адаптивная процедура, при которой каждый последующий месяц выборка статистических данных уточняется по принципу скользящего окна (добавляются новые данные, а старые снимаются), при этом время наблюдения остается постоянным — 12 мес. Результаты расчетов в виде графиков показаны на рис. 3,а.

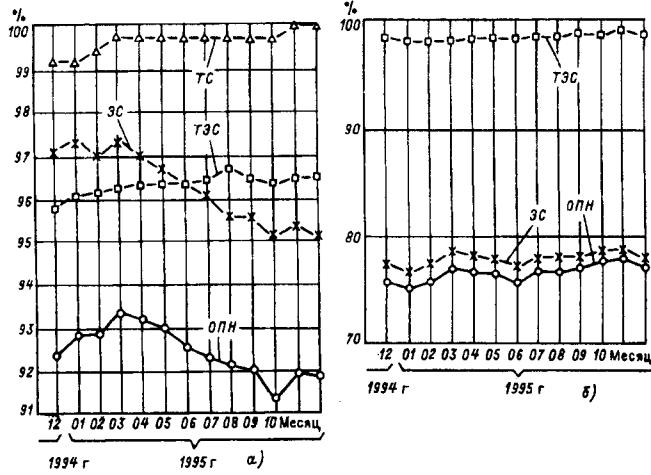


Рис. 3. Показатели неповреждаемости: а — АО «Кузбассэнерго»; б — АО «Новгородэнерго»

В Кузбассэнерго ОПН достаточно высокий, причем все ее подсистемы: тепловые электростанции, электрическая и тепловая сети — равно неповреждаемы. Небольшой срок наблюдения не позволяет делать глубокие выводы. Предварительно можно отметить, что настораживает тенденция к снижению показателя неповреждаемости всей системы вследствие снижения неповреждаемости электрической сети. Пока особых оснований для беспокойства нет, однако следовало бы выполнить профилактический анализ причин нарушений и показателей надежности низшего уровня рассмотрения (оборудования, отдельных объектов) в электрической сети.

В качестве другого примера в таблице приведены данные

о числе технологических нарушений по месяцам в Новгородэнерго за тот же период. В состав энергосистемы входят тепловые электростанции с приведенной мощностью  $N_{\text{пр}}^{(\text{ТЭС})} = 300$  пр. МВт и электрическая сеть с приведенной мощностью  $N_{\text{пр}}^{(\text{ЭС})} = 357$  пр. МВт, которые не изменились за весь анализируемый период.

Результаты расчетов показателей неповреждаемости, выполненных по тому же алгоритму, что и Кузбассэнерго, показаны на рис. 3,б. В Новгородэнерго обобщенный показатель неповреждаемости системы относительно невысокий и в течение года оставался стабильным с некоторой тенденцией к повышению. Пониженный его уровень определяется, в первую очередь, повышенной аварийностью в электрической сети. Для принятия обоснованных решений на уровне управления системой необходимо иметь детальный анализ причин технологических нарушений и показателей надежности на низших уровнях рассмотрения.

**Выводы.** Показатели повреждаемости энергосистемы по данным ежемесячной отчетности о технологических нарушениях на электростанциях и в сетях, определенные по предложенной методике, могут быть использованы на уровне управления энергосистемой в качестве одного из факторов для принятия решений по совершенствованию организации эксплуатации, а также при обосновании направлений (модернизации, реконструкции или замене энергетического оборудования) развития энергосистемы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе электростанций, сетей и энергосистем. — М.: ОГРЭС, 1993.
- Горев Н.Ф. Анализ аварийности оборудования электростанций и сетей в 1991 г. — Электрические станции, 1992, № 9.
- ГОСТ 27.002—83. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Государственный стандарт СССР, 1983.
- РД 50-690—89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартом, 1990.
- Мессарович М., Мако Д., Тахакара Н. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973.
- Венцель Е.С., Овчаров А.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — М.: Наука, 1991.
- Скопинцев В.А. Циклы аварийности в электроэнергетических системах. — Электрические станции, 1997, № 9.

[18.01.99]

*Автор: Скопинцев Владимир Алексеевич*  
окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1965 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию по применению динамических характеристик для исследования электрических систем. Начальник головного научно-методического центра ПИ и НИИ «Энергосетьпроект».

# Аналитическое исследование и выбор параметров однофазных асинхронных микродвигателей

БЕСПАЛОВ В.Я., НОВОКШЕНОВ В.С., ИГЛИКОВ А.С.

Все выходные показатели однофазных асинхронных двигателей, в том числе конденсаторных и с отключаемой пусковой фазой, выражены в виде явных функций частоты вращения и сопротивлений, в результате чего анализ данных машин значительно облегчается. Проведенный анализ двигателей позволил установить оптимальные соотношения и взаимозависимости между величинами, характеризующими режим работы, и присущие машинам рассматриваемого класса взаимосвязи заданных номинальных выходных показателей и оптимальных параметров, что представляет собой первый важный этап решения задачи синтеза.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, главная фаза, вспомогательная фаза, фазосмещающий элемент, параметры, симметричные составляющие, круговое вращающееся поле, механическая характеристика

В теории однофазных асинхронных двигателей [1, 2] выражения для токов прямой и обратной последовательностей являются сложными функциями, так как в них входят полные комплексные сопротивления четырех схем замещения  $Z_{A1}$ ,  $Z_{A2}$ ,  $Z_{B1}$ ,  $Z_{B2}$ . Зависимости токов (моментов) от параметров  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $X_m$ ,  $R_R$ ,  $X_R$  (а значит, и от геометрии машины) скрыты в комплексных уравнениях. Для их выявления исследователи применяли, в частности, методы планирования эксперимента [3, 4] и после оценки удельного веса воздействующих факторов получали приближенные уравнения для некоторых характеристик. Для трехфазного асинхронного двигателя известна зависимость в явном виде его вращающего момента от скольжения и параметров машины.

В данной работе все выходные показатели однофазных двигателей выражены в виде явных функций частоты вращения и сопротивлений, в результате чего анализ этих машин значительно облегчается.

Проведенный анализ позволил установить оптимальные соотношения между величинами, характеризующими режим работы машины, и присущие машинам рассматриваемого класса взаимосвязи заданных номинальных выходных показателей и оптимальных параметров, что представляет собой первый этап решения задачи синтеза. На втором этапе с помощью найденных параметров определяются геометрические размеры машины по выражениям, приведенным в [3].

Исходные уравнения для токов прямой

*All output parameters of single-phase induction motors, including capacitor motors and motors with a switchable starting phase, are expressed as explicit functions of the rotational speed and resistances, thus making the analysis of these machines much easier. The performed analysis of electric motors made it possible to find optimum relationships between the parameters characterizing the operating mode and inherent in machines of the considered type of relationship between the rated output parameters and optimum parameters, which is a first important stage of the solution of the problem of synthesis.*

**Key words:** induction motor, main phase, auxiliary phase, phase-shifting element, parameters, symmetrical components, circular rotating field, mechanical characteristic

$I_{A1}$  и обратной  $I_{A2}$  последовательностей главной фазы  $A$  статора двигателя, полученные в результате решения системы уравнений равновесия напряжений, имеют вид:

$$i_{A1} = \frac{\dot{U}}{c_A c_B} \frac{c_B Z_{B2} - j k c_A Z_{A2}}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{A2} Z_{B1}}; \quad (1)$$

$$i_{A2} = \frac{\dot{U}}{c_A c_B} \frac{c_B Z_{B1} - j k c_A Z_{A1}}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{A2} Z_{B1}}, \quad (2)$$

где  $c_A$ ,  $c_B$  — коэффициенты преобразования Т-образных схем замещения в Г-образные.

После преобразований (1) и (2) и определения тока  $I_A = I_{A1} + I_{A2}$  получено уравнение действующего значения тока главной фазы  $A$  статора:

$$I_A = \frac{U}{k} \sqrt{\frac{R_A^2 + X_A^2}{P^2 + Q^2}}, \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_A &= k [(R_s + R_g') (1 - \nu^2) + R_{RO} (B + 1)]; \\ X_A &= k [(X_{so} - X_c') (1 - \nu^2) - R_{RO} A] + R_{RO} \nu; \\ P &= (1 - \nu^2) [R_s (R_s + R_g') - X_{so} (X_{so} - X_c')] + \\ &\quad + R_{RO} [(X_{so} + X_{mo}) A + R_s B - R_g']; \\ Q &= (1 - \nu^2) [X_{so} (R_s + R_g') + R_s (X_{so} - X_c')] + \\ &\quad + R_{RO} [(X_{so} + X_{mo}) B - R_s A + X_c']. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В выражениях (4)  
 $\nu = n/n_c$  — относительная частота вращения ротора;  
обобщенные сопротивления

$$X_{so} = X_s + \frac{X_R}{c_R}; \quad X_{mo} = \frac{X_m}{c_R}; \quad R_{RO} = \frac{R_R}{c_R^2};$$

обобщенные фазосдвигающие активное и емкостное сопротивления, включенные последовательно во вспомогательную фазу  $B$  статора, для конденсаторных двигателей

$$R_g' = \frac{R_g}{k^2}; \quad X_c' = \frac{X_c}{k^2};$$

для двигателей с отключаемой пусковой фазой

$$R_g' = \frac{R_g}{k^2} + 0,5R_s; \quad X_c' = \frac{X_c}{k^2} - 0,5X_s,$$

$R_g$ ,  $X_c$  — реальные внешние добавочное активное и емкостное сопротивления;  $c_R = 1 + \frac{X_R}{X_m}$  — коэффициент рассеяния обмотки ротора;  $k$  — коэффициент трансформации; коэффициенты

$$A = \frac{2(R_s + R_g') + \frac{R_{RO}}{X_{mo}}(X_{so} + X_{mo} - X_c')}{X_{mo}};$$

$$B = \frac{2(X_{so} - X_c') - \frac{R_{RO}}{X_{mo}}(R_s + R_g')}{X_{mo}};$$

$R_s$ ,  $X_s$  — активное и индуктивное сопротивления фазы  $A$  статора;  $R_R$ ,  $X_R$  — сопротивления обмотки ротора, приведенные к числу витков фазы  $A$  статора;  $X_m$  — индуктивное сопротивление взаимоиндукции фазы  $A$ .

Уравнение для тока вспомогательной (пусковой) фазы  $B$  (после определения  $I_B = j \frac{I_{A1}}{k} - j \frac{I_{A2}}{k}$ )

$$I_B = \frac{U}{k^2} \sqrt{\frac{R_B^2 + X_B^2}{P^2 + Q^2}}, \quad (5)$$

где

$$R_B = R_s(1 - \nu^2) + R_{RO} \left( 2 \frac{X_{so}}{X_{mo}} + 1 - \frac{R_s R_{RO}}{X_{mo}^2} \right);$$

$$X_B = X_{so}(1 - \nu^2) - kR_{RO}\nu - R_{RO} \left( 2 \frac{R_s}{X_{mo}} + \frac{R_{RO}(X_{so} + X_{mo})}{X_{mo}^2} \right).$$

Уравнение для общего тока двигателя (после определения  $I = I_A + I_B$ )

$$I = \frac{U}{k^2} \sqrt{\frac{R^2 + X^2}{P^2 + Q^2}}, \quad (6)$$

где

$$R = (1 - \nu^2) [R_s(1 + k^2) + k^2 R_g'] + \\ + R_{RO} \left[ (B + 1)(1 + k^2) + 2 \frac{X_c'}{X_{mo}} + R_g' \frac{R_{RO}}{X_{mo}^2} \right]; \\ X = (1 - \nu^2) [X_{so}(1 + k^2) - k^2 X_c'] - \\ - R_{RO} \left[ A(1 + k^2) + X_c' \frac{R_{RO}}{X_{mo}^2} - 2 \frac{R_g'}{X_{mo}} \right];$$

Электромагнитная мощность однофазного двигателя равна разности электромагнитных мощностей прямой и обратной последовательностей:

$$P_3 = P_{31} - P_{32} = 2I_{A1}^2 R_{RA1}' - 2I_{A2}^2 R_{RA2}', \quad (7)$$

где  $R_{RA1}'$ ,  $R_{RA2}'$  — активные сопротивления разветвления Т-образных схем замещения прямой и обратной последовательностей.

Преобразовав (7), получаем уравнение электромагнитной мощности:

$$P_3 = \frac{U^2 R_{RO}}{k^2} \frac{a_0 + a_1 \nu - a_2 \nu^2 - a_3 \nu^3}{[e(1 - \nu^2) + f]^2 + [g(1 - \nu^2) + h]^2}, \quad (8)$$

где

$$a_0 = 2k \left\{ R_g' \left[ X_{so} + \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} (X_{so} + X_{mo}) + X_c' \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[ R_s + R_{RO} + \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} R_s \right] \right] \right\};$$

$$a_1 = k^2 [(R_s + R_g')^2 + (X_{so} - X_c')^2] + (R_s^2 + X_{so}^2) - \\ - \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \left\{ k^2 [(R_s + R_g')^2 + (X_{so} + X_{mo} - X_c')^2] + \right. \\ \left. + [R_s^2 + (X_{so} + X_{mo})^2] \right\};$$

$$a_2 = 2k [R_g' X_{so} + X_c' (R_s + R_{RO})];$$

$$a_3 = k^2 [(R_s + R_g')^2 + (X_{so} - X_c')^2] + (R_s^2 + X_{so}^2);$$

$$e = R_s^2 - X_{so}^2 + R_g' R_s + X_c' X_{so};$$

$$g = 2R_s X_{so} + R_g' X_{so} - X_c' R_s;$$

$$f = R_{RO} [(X_{so} + X_{mo}) A + R_s B - R_g'];$$

$$h = R_{RO} [X_{so} + X_{mo}] B - R_s A + X_c'.$$

Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{P_3}{\frac{2\pi n_c}{60}}. \quad (9)$$

Пусковой момент двигателя (при  $\nu = 0$ )

$$M_{\Pi} = \frac{P_{\text{ЭП}}}{2\pi n_c} = \frac{U^2 R_{RO}}{k^2 \frac{2\pi n_c}{60}} \frac{a_0}{(e+f)^2 + (g+h)^2}. \quad (10)$$

Если фазосдвигающие сопротивления в фазе  $B$  отсутствуют, т.е.  $R_g=0$  и  $X_c=0$ , то коэффициент  $a_0=0$  и начальный пусковой момент двигателя равен нулю. Уравнения токов фаз статора  $I_A$  и  $I_B$ , общего тока  $I$ , электромагнитной мощности  $P_{\text{Э}}$  (момента  $M$ ) описывают характеристики двигателя во всем диапазоне частот вращения ротора (от пуска  $\nu=0$  до синхронного холостого двигателя  $\nu=1$ ); это относится к двигателю наиболее общего типа, у которого в фазе  $B$  включены активное  $R_g$  и емкостное  $X_c$  сопротивления.

Для расчета характеристик конденсаторных двигателей во всех выражениях необходимо положить  $R_g'=0$ . Для конденсаторного двигателя с пусковым и рабочим конденсаторами сопротивление  $X_c'$  при расчете пусковой части характеристик учитывает емкости обоих параллельно включенных конденсаторов, а при расчете рабочей части характеристик — только емкость рабочего конденсатора.

При выводе уравнений не учтено активное сопротивление намагничивающей ветви схем замещения, для двигателей с пусковыми элементами разница в значениях сопротивлений фаз добавлена к сопротивлениям фазосдвигающего элемента.

Как показывают расчеты, для рассматриваемых машин отношение  $\frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \ll 1$  (см. ниже). С учетом этого  $a_0 \approx a_2$  и  $a_1 \approx a_3$ , и вращающий момент

$$M = \frac{U^2 R_{RO}}{k^2 \frac{2\pi n_c}{60}} \frac{a_0 + a_3 \nu}{\frac{A_0}{1-\nu^2} + 2A_2 + A_4(1-\nu^2)}, \quad (11)$$

где

$$A_0 = f^2 + h^2; \quad A_2 = ef + gh; \quad A_4 = e^2 + g^2.$$

Применение (11) не вносит в расчеты ощущимой погрешности.

На основе приведенных выше уравнений сделан анализ режимов работы конденсаторных микродвигателей.

При круговом поле, которое создается в этих двигателях при оптимальной частоте вращения, электромагнитная мощность двигателя равна электромагнитной мощности прямой последовательности:

$$P_{\text{Э}} = P_{\text{Э1}} = 2I_{A1}^2 R_{RA1}. \quad (12)$$

Эту оптимальную частоту вращения  $\nu_{\text{опт}}$  целесообразно выбрать из условия максимума со-

противления  $R_{RA1m}' = X_{mo}/2$ , который имеет место при частоте вращения

$$\nu_{\text{опт}} = 1 - \frac{R_{RO}}{X_{mo}}. \quad (13)$$

Соответствующее оптимальное скольжение

$$s_{\text{опт}} = 1 - \nu_{\text{опт}} = \frac{R_{RO}}{X_{mo}}. \quad (14)$$

Поскольку при круговом поле  $I_{A2}=0$ , то ток фазы  $A$   $I_{A1kp}' = I_{A1kp} = \frac{U}{Z_{A1}}$ , где  $Z_{A1}$  — полное комплексное сопротивление прямой последовательности этой фазы. Этот ток и электромагнитная мощность двигателя (12) связаны зависимостью

$$P_{\text{ЭКР}} = \frac{2R_{RO}(1-\nu_{\text{kp}})}{(1-\nu_{\text{kp}})^2 + \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2}} I_{A1kp}^2. \quad (15)$$

При круговом поле отношение некоторых условных электрических потерь к электромагнитной мощности двигателя

$$\eta' = \frac{I_{A1kp}^2 R_{RO}}{P_{\text{ЭКР}}}$$

имеет минимальное значение при оптимальном скольжении, причем этот минимум численно равен оптимальному скольжению:

$$\eta'_{\text{min}} = s_{\text{опт}} = \frac{R_{RO}}{X_{mo}}.$$

На основании изложенного целесообразно номинальное скольжение  $s_{\text{н}}$  выбрать равным  $s_{\text{опт}}$  [5].

При  $s_{\text{н}}=s_{\text{опт}}$  номинальный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = \frac{1}{\frac{2\pi n_c}{60}} \frac{4U^2 X_{mo}}{(2R_s + X_{mo})^2 + (2X_{so} + X_{mo})^2}, \quad (16)$$

а ток фазы  $A$  обмотки статора в номинальном режиме

$$I_{A\text{н}} = \frac{2U}{\sqrt{(2R_s + X_{mo})^2 + (2X_{so} + X_{mo})^2}}. \quad (17)$$

Из этих выражений для номинального режима получаем:

$$P_{\text{Эн}} = I_{A\text{н}}^2 X_{mo}. \quad (18)$$

Номинальные токи — фазы  $B$  и общий:

$$I_{B\text{н}} = \frac{I_{A\text{н}}}{k}; \quad I_{\text{н}} = I_{A\text{н}} \sqrt{1 + \frac{1}{k^2}}. \quad (19)$$

Полная механическая мощность, развиваемая ротором, меньше электромагнитной мощности на величину условных электрических потерь в обмотке ротора; она тем больше, чем больше

разность между обобщенными индуктивным сопротивлением взаимоиндукции и активным сопротивлением обмотки ротора:

$$P'_{RH} = P_{\text{ЭН}} - I_{A\text{H}}^2 R_{RO} = I_{A\text{H}}^2 (X_{mo} - R_{RO}). \quad (20)$$

Этой разности пропорционален и КПД машины:

$$\eta_{\text{H}} = \frac{X_{mo} - R_{RO}}{X_{mo} + 2R_s + R_g}. \quad (21)$$

Полное комплексное сопротивление фазы  $A$  в номинальном режиме

$$Z_{A\text{H}} = R_{A\text{H}} + jX_{A\text{H}} = \left( R_s - \frac{X_{mo}}{2} \right) + j \left( X_{so} + \frac{X_{mo}}{2} \right). \quad (22)$$

Сопротивление  $X_{mo}/2$ , входящее в активное сопротивление фазы  $R_{A\text{H}}$ , соответствует электромагнитной мощности, передаваемой от статора ротору магнитным полем фазы  $A$ :

$$P_{\text{ЭA}} = I_{A\text{H}}^2 \frac{X_{mo}}{2}. \quad (23)$$

Полное комплексное сопротивление фазы  $B$  в номинальном режиме

$$\begin{aligned} Z_{B\text{H}} = & R_g - jX_C + k^2 Z_{A\text{H}} = (R_g + k^2 R_{A\text{H}}) + j(k^2 X_{A\text{H}} - \\ & - X_C) = R_{B\text{H}} + jX_{B\text{H}} = \left( R_g + k^2 R_s + k^2 \frac{X_{mo}}{2} \right) + \\ & + j \left( k^2 X_{so} + k^2 \frac{X_{mo}}{2} - X_C \right). \end{aligned} \quad (24)$$

Сопротивление  $k^2 \frac{X_{mo}}{2}$ , входящее в активное сопротивление фазы  $R_{B\text{H}}$ , соответствует электромагнитной мощности, передаваемой от статора ротору магнитным полем фазы  $B$ :

$$P_{\text{ЭB}} = I_{B\text{H}}^2 k^2 \frac{X_{mo}}{2} = I_{A\text{H}}^2 \frac{X_{mo}}{2} = P_{\text{ЭA}}, \quad (25)$$

т.е. обе обмотки статора в равной степени участвуют в создании электромагнитной мощности двигателя:

$$P_{\text{ЭН}} = P_{\text{ЭA}} + P_{\text{ЭB}} = I_{A\text{H}}^2 X_{mo}.$$

Условия, при выполнении которых в машине обеспечивается круговое врачающееся поле, определены в результате анализа уравнения:

$$I_{R42} = 0 \quad (\text{или } I_{A2} = 0),$$

где  $I_{R42}$  — ток ротора обратной последовательности фазы  $A$ .

В двигателе общего типа, у которого в фазе  $B$  включены емкостные  $X_C$  и активное  $R_g$  сопротивления, круговое поле при скольжении  $s_{\text{H}} = s_{\text{опт}} = R_{RO}/X_{mo}$  будет обеспечено при выборе

данных сопротивлений из условия:

$$\frac{X_C}{R_g} > \frac{R_{A\text{H}}}{X_{A\text{H}}} = \frac{2R_s + X_{mo}}{2X_{so} + X_{mo}} = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_{A\text{H}}} = \frac{1}{k_{\text{K}}}, \quad (26)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi_{A\text{H}} = k_{\text{K}} = \frac{2X_{so} + X_{mo}}{2R_s + X_{mo}} = \frac{X_{A\text{H}}}{R_{A\text{H}}}$$

— тангенс угла сдвига между напряжением и номинальным током фазы  $A$  и равный ему коэффициент трансформации конденсаторного двигателя (без  $R_g$  в фазе  $B$ ).

При выборе отношения фазосдвигающих сопротивлений в пределах

$$\frac{R_{A\text{H}}}{X_{A\text{H}}} < \frac{X_C}{R_g} < \infty$$

значения коэффициента трансформации лежат в пределах

$$0 < k < k_{\text{K}}. \quad (27)$$

Задавшись отношением  $X_C/R_g$ , находим конкретное значение коэффициента трансформации:

$$k = \frac{\frac{X_C}{R_g} - \frac{R_{A\text{H}}}{X_{A\text{H}}}}{1 + \frac{X_C}{R_g} \frac{R_{A\text{H}}}{X_{A\text{H}}}}. \quad (28)$$

Затем определяем обобщенные фазосдвигающие сопротивления:

$$R'_g = \frac{X_{A\text{H}} - kR_{A\text{H}}}{k}; \quad X'_C = \frac{R_{A\text{H}} + kX_{A\text{H}}}{k}. \quad (29)$$

Если во вспомогательную фазу включен только конденсатор, ( $k = k_{\text{K}} = X_{A\text{H}}/R_{A\text{H}}$ ;  $R'_g = 0$ ), то

$$X'_C = \frac{R_{A\text{H}}^2 + X_{A\text{H}}^2}{X_{A\text{H}}} = \frac{|Z_{A\text{H}}|^2}{X_{A\text{H}}},$$

где  $|Z_{A\text{H}}|$  — модуль сопротивления главной фазы.

Сопротивления фазосдвигающих элементов (реальные):

$$R_g = k^2 R'_g; \quad X_C = k^2 X'_C. \quad (30)$$

Включение в фазу  $B$  последовательно с емкостью добавочного сопротивления  $R_g$  следует применять в тех случаях, когда расчетное значение коэффициента трансформации конденсаторного двигателя  $k > 2$ . Это приводит к повышению напряжения на вспомогательной фазе и конденсаторе. Необходимый для обеспечения кругового поля при том же скольжении  $s_{\text{H}}$  коэффициент трансформации для двигателя с  $R_g$  и  $X_C$  меньше, чем для двигателя только с

$X_C$  в фазе  $B$  (27).

Полное комплексное сопротивление фазы  $B$

$$Z_{B\text{H}} = R_g - jX_C + k^2 Z_{A\text{H}};$$

с учетом (29) и (30)

$$Z_{B\text{H}} = k(X_{A\text{H}} - jR_{A\text{H}}) = -jkZ_{A\text{H}}. \quad (31)$$

Токи фаз в номинальном режиме

$$I_{A\text{H}} = \frac{\dot{U}}{Z_{A\text{H}}}; \quad I_{B\text{H}} = \frac{\dot{U}}{Z_{B\text{H}}} = \frac{\dot{U}}{-jkZ_{A\text{H}}} = j \frac{I_{A\text{H}}}{k}$$

сдвигаются по фазе на угол  $90^\circ$ , и приведенный ток  $kI_{B\text{H}}$  фазы  $B$  равен току  $I_{A\text{H}}$  фазы  $A$ , т.е. при выборе  $k$ ,  $R'_g$ ,  $X'_C$  по (28) и (29) в машине при скольжении  $s_{\text{H}} = s_{\text{опт}} = \frac{R_{RO}}{X_{mo}}$  обеспечивается круговое поле.

Сопротивление фазы  $B$  при включении в нее только емкости  $Z_{B\text{H}} = -jX_C + k^2 Z_{A\text{H}}$  с учетом (29) и (30):

$$Z_{B\text{H}} = k(kR_{A\text{H}} - R_{A\text{H}}).$$

Если учесть, что для рассматриваемого двигателя  $k = k_{\text{K}} = X_{A\text{H}}/R_{A\text{H}}$ , получим тот же результат:

$$Z_{B\text{H}} = k(X_{A\text{H}} - jR_{A\text{H}}) = -jkZ_{A\text{H}}.$$

Для электрической сети двигатель представляет собой эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений обмоток  $Z_{A\text{H}}$  и  $Z_{B\text{H}}$ . В номинальном режиме модуль сопротивления конденсаторного двигателя, выраженный через ток (19):

$$I_{\text{H}} = I_{A\text{H}} \sqrt{1 + \frac{1}{k_{\text{K}}^2}} = \frac{U}{\sqrt{R_{A\text{H}}^2 + X_{A\text{H}}^2}} \sqrt{1 + \frac{R_{A\text{H}}^2}{X_{A\text{H}}^2}} = \frac{U}{X_{A\text{H}}},$$

равен реактивному сопротивлению фазы  $A$ :

$$|Z| = \frac{U}{I_{\text{H}}} = X_{A\text{H}} = X_{so} + \frac{X_{mo}}{2}. \quad (32)$$

Полное комплексное сопротивление конденсаторного двигателя в номинальном режиме:

$$Z = \frac{Z_{A\text{H}} Z_{B\text{H}}}{Z_{A\text{H}} + Z_{B\text{H}}} = X_{A\text{H}} \frac{2R_{A\text{H}} X_{A\text{H}} + j(X_{A\text{H}}^2 - R_{A\text{H}}^2)}{|Z_{A\text{H}}|^2} \quad (33)$$

или

$$Z = X_{A\text{H}} \frac{2k_{\text{K}} + j(k_{\text{K}}^2 - 1)}{k_{\text{K}}^2 + 1}. \quad (34)$$

При проектировании двигателя обычно задан косинус угла сдвига между напряжением и общим током, который можно выразить через функции угла сдвига между напряжением и током фазы  $A$ :

$$\cos \varphi = \frac{2R_{A\text{H}} X_{A\text{H}}}{|Z_{A\text{H}}|^2} = \frac{2k_{\text{K}}}{k_{\text{K}}^2 + 1} = 2 \sin \varphi_A \cos \varphi_A = \sin 2\varphi_A,$$

откуда

$$\varphi_A = \frac{\arcsin(\cos \varphi)}{2} \quad (35)$$

и модуль сопротивления фазы  $A$

$$|Z_{A\text{H}}| = 2X_{A\text{H}} \frac{\cos \varphi_A}{\cos \varphi}. \quad (36)$$

Для двигателя общего типа ( $k < k_{\text{K}} = X_{A\text{H}}/R_{A\text{H}}$ ) полное комплексное сопротивление в номинальном режиме

$$Z = \frac{Z_{A\text{H}} Z_{B\text{H}}}{Z_{A\text{H}} + Z_{B\text{H}}} = \frac{k}{k^2 + 1} [(kR_{A\text{H}} + X_{A\text{H}}) + j(kX_{A\text{H}} - R_{A\text{H}})]$$

и его модуль

$$|Z| = \frac{k |Z_{A\text{H}}|}{\sqrt{k^2 + 1}} = \frac{|Z_{B\text{H}}|}{\sqrt{k^2 + 1}}. \quad (37)$$

Справедливость полученных соотношений проверена на примере двигателя 4ААТ56А2, у которого  $P_{2\text{H}} = 120$  Вт,  $U_{\text{H}} = 220$  В,  $n_{\text{c}} = 3000$  об/мин. Параметры двигателя, определенные из опыта при номинальной частоте вращения  $\nu_{\text{H}} = n_{\text{H}}/n_{\text{c}} = 0,9534$ , рассчитывались по выражениям  $\nu_{\text{H}} = 1 - R_{RO}/X_{mo}$ , (18), (19), (26), (29) и имеют следующие значения:  $R_{RO}/X_{mo} = 1 - \nu_{\text{H}} = 0,0466$ ;  $k = 1,685$ ;  $X_{mo} = 177,4$  Ом;  $R_{RO} = 8,26$  Ом;  $X_{so} = 123,1$  Ом;  $X'_C = 288,5$  Ом;  $R_{RO}^2/X_{mo}^2 = 0,002172 \ll 1$ ; сопротивление  $R_g$  измерено непосредственно и равно 37 Ом.

Ниже приведены опытные и расчетные значения электромагнитной мощности данного двигателя с рабочей емкостью в фазе  $B$ :

Значение $\nu$	0,934	0,9347	0,9534	0,9666	0,9767	0,9833
$P_{\text{Э}}$ (опыт), Вт	180	154	140,5	103,4	68,6	51,8
$P_{\text{Э}}$ (расчет), Вт	141	141,8	142,1	131,6	110,2	88,2

Расхождение характеристик по мере удаления от номинального режима можно объяснить тем, что расчетные уравнения не учитывают насыщение магнитной цепи машины.

Найденные в результате анализа соотношения позволяют определить оптимальные параметры двигателя, обеспечивающие заданные требования: номинальную полезную мощность  $P_{\text{H}}$ , номинальную частоту вращения  $n_{\text{H}}$ , КПД, коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , кратность пускового момента  $m_{\text{p}}$ .

При расчете номинального режима последовательно определяются следующие параметры:

1. Общий ток двигателя

$$I_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}} \eta_{\text{H}} \cos \varphi}.$$

2. Сопротивление двигателя и равное ему активное сопротивление главной фазы  $A$

$$|Z| = X_{A\text{h}} = \frac{U}{I_{\text{h}}}.$$

3. Угол сдвига между напряжением и током фазы  $A$

$$\varphi_A = \frac{\arcsin(\cos \varphi)}{2}.$$

4. Полное сопротивление фазы  $A$

$$|Z_{A\text{h}}| = 2X_{A\text{h}} \frac{\cos \varphi_A}{\cos \varphi}.$$

5. Активное сопротивление фазы  $A$

$$R_{A\text{h}} = |Z_{A\text{h}}| \cos \varphi_A.$$

6. Коэффициент трансформации для двигателей:

- а) с рабочей емкостью  $C_p$  в фазе  $B$ ;
- б) с рабочей  $C_p$  и пусковой  $C_{\text{п}}$  емкостями в фазе  $B$

$$k_k = \frac{X_{A\text{h}}}{R_{A\text{h}}}.$$

7. Сопротивление конденсатора и его емкость для конденсаторных двигателей:

$$X_{C\text{p}} = X_{A\text{h}} (1 + k_k^2); \quad C_p = \frac{10^6}{2\pi f X_{C\text{p}}}.$$

8. Коэффициент трансформации для двигателя общего типа, предварительно задавшись отношением  $\frac{X_C}{R_G} > \frac{R_{A\text{h}}}{X_{A\text{h}}}$ ,

$$k = \frac{\frac{X_C}{R_g} - \frac{R_{A\text{h}}}{X_{A\text{h}}}}{1 + \frac{X_C}{R_g} \frac{R_{A\text{h}}}{X_{A\text{h}}}};$$

фазосдвигающие сопротивления для этого двигателя:

$$R_g = k (X_{A\text{h}} - k R_{A\text{h}}); \quad X_C = k (R_{A\text{h}} + k X_{A\text{h}});$$

общий ток данного двигателя

$$I_{\text{h}} = \frac{U}{k |Z_{A\text{h}}|} \sqrt{k^2 + 1}.$$

9. Токи фаз  $A$  и  $B$ :

$$I_{A\text{h}} = \frac{U}{|Z_{A\text{h}}|}; \quad I_{B\text{h}} = \frac{U}{k |Z_{A\text{h}}|}.$$

10. Номинальные частота вращения ротора и скольжение:

$$\nu_{\text{h}} = \frac{n_{\text{h}}}{n_{\text{c}}}; \quad s_{\text{h}} = 1 - \nu_{\text{h}}.$$

11. Обобщенное индуктивное сопротивление взаимоиндукции

$$X_{mo} = \frac{P_{\text{h}} + P_{\text{мех}}}{I_{A\text{h}}^2 \nu_{\text{h}}},$$

где  $P_{\text{мех}}$  — механические потери — (0,05–0,15) $P_{2\text{h}}$ .

12. Обобщенное активное сопротивление обмотки ротора

$$R_{RO} = s_{\text{h}} X_{mo}.$$

13. Активное и обобщенное индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$R_s = R_{A\text{h}} - \frac{X_{mo}}{2}; \quad X_{so} = X_{A\text{h}} - \frac{X_{mo}}{2}.$$

Конденсаторные двигатели трех рассмотренных типов:

а) с  $R_g$  и  $C_p$  в фазе  $B$ ;

б) с  $C_p$  в фазе  $B$ ;

в) с  $C_p$  и  $C_{\text{п}}$  в фазе  $B$ ,

как правило, предназначены для продолжительного режима работы, их параметры выбраны из условий номинального режима. Двигатель с  $C_p$  и  $C_{\text{п}}$  в фазе  $B$  применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить повышенный пусковой момент (10).

Входящие в (10) коэффициенты для конденсаторных двигателей:

$$a_0 = 2 \frac{X_{C\text{п}}}{k} (R_s + R_{RO}); \quad e = R_s^2 - X_{so}^2 + \frac{X_{C\text{п}}}{k^2} X_{so};$$

$$g = R_s \left( 2X_{so} - \frac{X_{C\text{п}}}{k^2} \right); \quad f = 2s_{\text{h}} R_s \left( 2X_{A\text{h}} - \frac{X_{C\text{п}}}{k^2} \right);$$

$$h = s_{\text{h}} \left[ -2e + X_{mo} \left( 2X_{so} - \frac{X_{C\text{п}}}{k^2} \right) \right].$$

Для заданного пускового момента  $M_{\text{п}} = m_{\text{п}} M_{\text{н}}$  находится из (10) одно неизвестное ( $X_{C\text{п}}$ )-емкостное сопротивление двух параллельно включенных на время пуска конденсаторов, затем емкость пускового конденсатора

$$C_{\text{п}} = \frac{1}{\omega X_{C\text{п}}} - C_p,$$

где  $C_p$  найдена ранее из условий номинального режима.

В выражениях коэффициентов (10) принято  $R_{RO}^2 \ll 1$ ;  $A = \frac{2R_s}{X_{mo}}$ ;  $B = \frac{2(X_{so} - X'_C)}{X_{mo}}$ , что практически не вносит в расчеты ощутимой погрешности.

Параметры вспомогательной (пусковой) фазы двигателей с пусковыми элементами ( $R_g$  или  $X_C$ ) выбираются после расчета главной фазы, т.е. когда известны  $R_s$ ,  $X_s$ ,  $X_m$ ,  $R_R$ ,  $X_R$ , из условий

обеспечения заданных пусковых показателей — пускового тока  $I_{\text{п}}$  (в (6) принимается  $\nu=0$ ) и пускового момента  $M_{\text{п}}$  (10) — или из условия обеспечения кругового поля при пуске (в двигателе с пусковой емкостью):

Для двигателя с пусковым сопротивлением  $R_g$ , положив во всех выражениях  $X_C=0$  и  $X_C'=-0,5X_s$ , в результате совместного решения (6) при  $\nu=0$  и (10) находим неизвестные  $k$  и  $R_g'$ . Затем определяем необходимое значение внешнего сопротивления  $R_g=(R_g'-0,5R_s)k^2$ .

Для двигателя с пусковой емкостью, приняв  $R_g=0$  и  $R_g'=0,5R_s$ , в результате совместного решения (6) при  $\nu=0$  и (10) находим неизвестные  $k$  и  $X_C'$ . Тогда необходимое значение сопротивления конденсатора  $X_C=(X_C'+0,5X_s)k^2$ . Требуемые для обеспечения кругового поля при пуске коэффициент трансформации и сопротивление конденсатора рассчитываются по формулам:

$$k = \frac{X_{so} + s_h X_{mo}}{1,5R_s + R_{RO}};$$

$$X_C = \left( 0,5X_s + \frac{R_s + R_{RO}}{k} + X_{so} + s_h^2 X_{mo} \right) k^2.$$

Уравнение (1) и (2) определяют токи двигателя, у которого обе обмотки статора находятся под напряжением. Для двигателей с пусковыми элементами при отключенной фазе  $B$  надо положить  $Z_{sB}+Z_g=\infty$ , тогда токи прямой и обратной последовательностей оставшейся под напряжением фазы  $A$  (при пульсирующем поле) будут равны:

$$i_{A1\text{п}} = i_{A2\text{п}} = \frac{\dot{U}}{C_A} \frac{1}{Z_{A1} + Z_{A2}}. \quad (38)$$

После преобразований и с учетом  $i_{A\text{п}}=i_{A1\text{п}}+i_{A2\text{п}}$  получено выражение для действующего значения тока фазы:

$$i_{A\text{п}} = U \sqrt{\frac{R_{\text{п}}^2 + X_{\text{п}}^2}{P_{\text{п}}^2 + Q_{\text{п}}^2}}, \quad (39)$$

где

$$R_{\text{п}} = 2 \frac{R_{RO}}{X_{mo}}; \quad X_{\text{п}} = (1 - \nu^2) - \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2};$$

$$P_{\text{п}} = -X_{so} (1 - \nu^2) + R_{RO} \left[ 2 \frac{R_s}{X_{mo}} + \frac{R_{RO}}{X_{mo}^2} (X_{so} + X_{mo}) \right];$$

$$Q_{\text{п}} = R_s (1 - \nu^2) + R_{RO} \left[ 2 \frac{X_{so}}{X_{mo}} + 1 - \frac{R_{RO}}{X_{mo}^2} R_s \right].$$

Электромагнитная мощность двигателя (7)

$$P_{\text{эп}} = U^2 R_{RO} \frac{\left( 1 - \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \right) \nu - \nu^3}{P_{\text{п}}^2 + Q_{\text{п}}^2}. \quad (40)$$

Отношение электромагнитной мощности обратной последовательности к электромагнитной мощности прямой последовательности характеризует степень эллиптичности магнитного поля в машине, т.е. степень уменьшения результирующего момента (мощности) за счет обратного поля:

$$\varepsilon = \frac{P_{32}}{P_{31}} = \frac{(2 - s) \left( \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} + s^2 \right)}{s \left[ \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} + (2 - s)^2 \right]}.$$

Это отношение имеет минимальное значение при оптимальном скольжении, которому этот минимум численно равен (14).

Соответствующая оптимальная частота вращения ротора определяется выражением (13). Этот вывод получен при допущении, что в рабочем режиме скольжение ротора по отношению к полю обратной последовательности близко к двум. При оптимальном скольжении активное сопротивление  $R'_{RA1}$  имеет максимальное значение  $R'_{RA1m}=X_{mo}/2$ .

Анализ опытных характеристик ряда однофазных машин показывает, что отношение квадрата потребляемого тока к полной механической мощности  $I^2/P'_R$  имеет у них явно выраженный минимум при частоте вращения  $\nu_m$ , равной номинальной  $\nu_h$  или весьма близкой к ней [5]. Примеры даны в таблице.

Частота вращения	Тип машины			
	АОЛБ12/4	ДХМ-3	ДБСМ-1	АОЛБ12/2
$\nu_h$	0,946	0,96	0,96	0,964
$\nu_m$	0,946	0,957	0,95	0,964

Учитывая, что  $\nu_h \approx \nu_m$ , для определения зависимости номинальной частоты вращения от параметров введем в качестве одного из критериев оптимальности отношение некоторых условных электрических потерь  $I_{A\text{п}}^2 R_{RO}$  к полной механической мощности  $P'_R=P_{\text{эп}} \nu$ :

$$\eta' = \frac{I_{A\text{п}}^2 R_{RO}}{P'_R} = \frac{\left( 1 + \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \right) - 2\nu^2 \left( 1 - \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \right) + \nu^4}{\left( 1 - \frac{R_{RO}^2}{X_{mo}^2} \right) \nu^2 - \nu^4}. \quad (41)$$

Частота вращения, соответствующая минимуму отношения  $\eta'$ , для двигательного режима с учетом  $R_{RO}^2/X_{mo}^2 \ll 1$  также определяется выражением (13). Экстремумы трех функций  $R'_{RA1}(\nu)$ ,  $\varepsilon(\nu)$  и  $\eta'(\nu)$  имеют место при одинаковых значениях аргумента, на основании чего целесообразно для рассматриваемых двигателей номинальную частоту вращения выбрать равной оптимальной:

$$\nu_H = 1 - \frac{R_{RO}}{X_{mo}} = 1 - s_H.$$

При номинальной частоте вращения ротора сопротивление рабочей (главной) фазы обмотки статора

$$Z_{AH} = R_{AH} + jX_{AH} = (R_s + R_{\text{эм}}) + j(X_{so} + X_{\text{эм}}) = \\ = \left[ R_s + \frac{X_{mo}}{2} \frac{1}{(1-s_H)^2 + 1} \right] + j \left[ X_{so} + \frac{X_{mo}}{2} \frac{(1-s_H)^2 + s_H}{(1-s_H)^2 + 1} \right]. \quad (43)$$

Активное сопротивление  $R_{\text{эм}}$  соответствует суммарной электромагнитной мощности, передаваемой в номинальном режиме от статора к ротору:

$$P_{\text{эм.н}} = P_{\text{э1н}} + P_{\text{э2н}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{2} \frac{1}{(1-s_H)^2 + 1}. \quad (44)$$

При частотах вращения от нуля до синхронной (практически от критической до  $\nu_c = 1$ ) изменения суммарной мощности подчиняются уравнению:

$$P_{\text{эм}} = U^2 R_{RO} \frac{s_H^2 + (1 - \nu^2)}{P_{\text{н}}^2 + Q_{\text{н}}^2}$$

или

$$P_{\text{эм}} = I_{AH}^2 R_{RO} \frac{s_H^2 + (1 - \nu^2)}{(1 - \nu^2)^2 - 2(1 - \nu^2)s_H^2 + s_H^2(4 + s_H^2)}.$$

Результирующая электромагнитная мощность (40), равная разности мощностей прямой и обратной последовательностей,

$$P_{\text{э.н}} = P_{\text{э1н}} - P_{\text{э2н}} = I_{AH}^2 R_{RO} \times \\ \times \frac{(1 - s_H^2)\nu - \nu^3}{(1 - \nu^2)^2 - 2(1 - \nu^2)s_H^2 + s_H^2(4 + s_H^2)}. \quad (45)$$

Эта мощность и определяет вращающий (результатирующий) момент двигателя; в номинальном режиме она равна:

$$P_{\text{э.н}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{2} \frac{(1 - s_H^2)^2}{((1 - s_H)^2 + 1)}. \quad (46)$$

Электромагнитная мощность прямой последовательности в номинальном режиме на сопротивлении  $R_{\text{эм}}$

$$P_{\text{э1н}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{4}. \quad (47)$$

Электромагнитная мощность обратной последовательности в номинальном режиме на сопротивлении  $R_{\text{эм}}$

$$P_{\text{э2н}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{4} s_H \frac{(1 - s_H) + 1}{(1 - s_H)^2 + 1}$$

составляет от мощности  $P_{\text{э1н}}$  часть, пропорциональную  $s_H$ , так как  $s_H \ll 1$ :

$$P_{\text{э2н}} \approx P_{\text{э1н}} s_H. \quad (48)$$

Электрические потери в обмотке ротора в номинальном режиме

$$P_{\text{эRн}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{2} s_H \frac{3(1 - s_H) + s_H^2}{(1 - s_H)^2 + 1}$$

с учетом  $s_H \ll 1$  составляют от мощности  $P_{\text{э1н}}$  часть, пропорциональную трехкратному значению скольжения  $s_H$ :

$$P_{\text{эRн}} \approx 3s_H P_{\text{э1н}}. \quad (49)$$

Из изложенного следует, что при выборе  $s_H = R_{RO}/X_{mo}$ , поскольку мощность обратной последовательности (48) мала, магнитное поле в машине близко к круговому (в конденсаторных двигателях это обеспечивается включением емкости в фазу  $B$ ), а вследствие малого значения потерь в роторе (49) суммарная мощность  $P_{\text{эм.н}} = P_{\text{э1н}} + P_{\text{э2н}}$  становится примерно равной полной механической мощности  $P'_{RH} = P_{\text{эмн}} - P_{\text{эRн}}$ :

$$P_{\text{эм.н}} \approx P'_{RH} \approx P_{\text{э1н}} = I_{AH}^2 \frac{X_{mo}}{4}. \quad (50)$$

Поскольку  $s_H \ll 1$ , сопротивление двигателя в номинальном режиме (43) можно принять равным

$$Z_{AH} = R_{AH} + jX_{AH} = (R_s + R_{\text{эм}}) + j(X_{so} + X_{\text{эм}}) = \\ = \left( R_s + \frac{X_{mo}}{4} \right) + j \left( X_{so} + \frac{X_{mo}}{4} \right). \quad (51)$$

С учетом (51) номинальный ток двигателя с отключаемой пусковой фазой

$$I_{AH} = \frac{4U}{\sqrt{(4R_s + X_{mo})^2 + (4X_{so} + X_{mo})^2}}. \quad (52)$$

Мощность двигателя в номинальном режиме (50)

$$P_{\text{эм.н}} = \frac{4U^2 X_{mo}}{(4R_s + X_{mo})^2 + (4X_{so} + X_{mo})^2}. \quad (53)$$

Полезная мощность на валу  $P_{\text{н}} = P'_{RH} - P_{\text{мех}}$ , где  $P_{\text{мех}}$  — механические потери.

Критическую частоту вращения  $\nu_{kp}$ , соответствующую максимальному моменту, можно найти, решив уравнение, полученное в результате дифференцирования (40):

$$(R_s^2 + X_{so}^2)(1 - \nu_{kp}^2)^3 - 2(a_2 + R_s^2 + X_{so}^2) \times \\ \times (1 - \nu_{kp}^2)^2 - 3a_0(1 - \nu_{kp}^2) + 2a_0 = 0, \quad (54)$$

где

$$a_0 = s_H^2 \{ [2R_s + s_H(X_{so} + X_{mo})]^2 + [2X_{so} + X_{mo} - s_H R_s]^2 \};$$

$$a_2 = s_H [R_s(X_{mo} - s_H R_s) - s_H X_{so}(X_{so} + X_{mo})].$$

Справедливость полученных соотношений проверена экспериментально на примере двигателя АОЛБ 12/4 со следующими паспортными данными:  $P_{2\text{н}} = 80$  Вт,  $U_{\text{н}} = 220$  В,  $n_c = 1500$  об/мин. Ниже приведены опытная и расчетная зависимости полной механической мощности в зависимости от  $\nu$ :

$\nu$	0,894	0,934	0,946	0,953	0,967	0,98	0,993
$P'_{RH}$ (опыт)	107,2	93,2	84,2	74,5	57,6	40,2	18,35
$P'_{RH}$ (расчет)	101	92,5	83,4	77	59,5	38,2	11,9

Расчетная зависимость получена при использовании опытных значений обобщенных параметров, рассчитанных по выражениям (39), (41) и (42):  $R_{RO} = 12,6$  Ом;  $X_{mo} = 221$  Ом;  $X_{so} = 91,5$  Ом;

непосредственным измерением получено  $R_s = 19,82$  Ом, механические потери определены графически методом разделения потерь. Опытные значения незначительно отличаются от расчетных. Решение (54) дает для этого двигателя значение  $\nu_{kp} = 0,887$ , которое совпадает с значением  $\nu_{kp}$  на расчетной зависимости  $P_3(\nu)$ .

Полученные соотношения позволяют определить оптимальные параметры двигателя, обеспечивающие заданные требования: номинальную полезную мощность  $P_n$ , номинальную частоту вращения  $n_n$ , КПД  $\eta_n$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , кратности максимального  $m_m$  и пускового  $m_n$  моментов, пускового тока  $i_n$ .

При расчете оптимальных номинальных параметров определяются:

### 1. Ток двигателя

$$I_{An} = \frac{P_n}{\eta_n U_n \cos \varphi_n}.$$

2. Полное, активное и индуктивное сопротивления фазы:

$$Z_{An} = U/I_{An}; \quad R_{An} = Z_{An} \cos \varphi_n; \quad X_{An} = Z_{An} \sin \varphi_n.$$

3. Обобщенное индуктивное сопротивление взаимоиндукции

$$X_{mo} = \frac{4(P_n + P_{mech})}{I_{An}^2},$$

где  $P_{mech} = (0,05-0,15) P_n$ .

4. Обобщенное активное сопротивление обмотки ротора

$$R_{RO} = s_n X_{mo} = \left(1 - \frac{n_n}{n_c}\right) X_{mo}.$$

5. Активное и обобщенное индуктивное сопротивления обмотки статора:

$$R_s = R_{An} - \frac{X_{mo}}{4}; \quad X_{so} = X_{An} - \frac{X_{mo}}{4}.$$

Если требуется обеспечить заданную кратность максимального момента  $m_m$ , то после определения  $X_{mo}$  и  $R_{RO}$  можно, задавшись критической частотой вращения  $\nu_{kp}$ , определить вначале три неизвестных коэффициента  $a_0$ ,  $a_2$ ,  $(R_s^2 + X_{so}^2)$  из совместного решения (54) и (55):

$$M = \frac{P_{3,n}}{\frac{2\pi n_c}{60}} = \frac{U^2 R_{RO}}{\frac{2\pi n_c}{60}} \frac{(1 - s_n^2) \nu - \nu^3}{P_n^2 + Q_n^2} = \frac{U^2 R_{RO}}{\frac{2\pi n_c}{60}} \times \frac{(1 - s_n^2) \nu - \nu^3}{a_0 + 2a_2(1 - \nu^2) + (R_s^2 + X_{so}^2)(1 - \nu^2)^2}, \quad (55)$$

причем (55) надо использовать для двух режимов:

$$a) \nu = \nu_n, \quad M = M_n; \quad b) \nu = \nu_{kp}, \quad M = M_m.$$

Затем найти неизвестные  $R_s$  и  $X_{so}$  и сопоставить со значениями, полученными в п. 5 из условий обеспечения номинального режима. При расхождении необходимо изменить  $\nu_{kp}$  и повторить расчет до удовлетворительного совпадения. Отклонение режима от оптимального зависит в

этом случае от степени отклонения найденных  $R_s$  и  $X_{so}$  от их оптимальных значений по п. 5.

Задание  $\nu_{kp}$  определяет форму механической характеристики, таким образом можно регулировать жесткость механической характеристики.

Заданные кратности пусковых момента и тока, как и получение при пуске кругового поля, обеспечиваются выбором параметров пусковой фазы — коэффициента трансформации  $k$  и внешнего фазосдвигающего элемента ( $R_g$  или  $X_C$ ) в зависимости от типа двигателя.

Найденные для рассмотренных типов двигателей параметры  $X_{so}$ ,  $X_{mo}$ ,  $R_{RO}$ ,  $s_n = \frac{R_{RO}}{X_{mo}} = \frac{R_R}{X_R + X_m}$  связаны с параметрами схемы замещения  $X_s$ ,  $X_m$ ,  $R_R$ ,  $X_R$ , для которых (в том числе для  $R_s$ ) в [3] приведены выражения, устанавливающие их связь с размерами машины и различными конструктивными коэффициентами. Используя эти выражения, можно решить второй этап задачи синтеза — определение размеров и обмоточных данных машины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Чечет Ю.С. Электрические микромашины автоматических устройств. — М.: Энергия, 1964.
- Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1988.
- Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. — М.: Высшая школа, 1980.

4. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А., Рустамов Т.Б. Использование методов планирования эксперимента для исследования механических характеристик и выходных показателей управляемых и неуправляемых микродвигателей. — Труды МЭИ, 1972, вып. 138.

5. Самохина Г.С., Беспалов В.Я., Игликов А.С. Выбор параметров однофазного асинхронного двигателя с отключаемой пусковой фазой. — Электричество, 1977, № 2.

[21.09.98]

*Авторы: Беспалов Виктор Яковлевич* окончил в 1960 г. электромеханический факультет (ЭМФ) Московского энергетического института (МЭИ). В 1992 г. защитил в МЭИ докторскую диссертацию на тему «Асинхронные машины для динамических режимов работы (Вопросы теории, математического моделирования и разработки). Профессор кафедры электромеханики МЭИ.

*Новокшенов Владимир Степанович* окончил ЭМФ Томского политехнического института в 1949 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка, математическое моделирование и исследование электрических машин автономных систем» в Московском авиационном институте. Профессор Алма-Атинского института энергетики и связи.

*Игликов Амантай Саменович* окончил энергетический факультет Фрунзенского политехнического института в 1960 г. В 1998 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Аналитическое исследование и выбор параметров однофазных асинхронных микродвигателей общего применения» в Казахском национальном техническом университете. Заведующий лабораторией в Академии гражданской авиации.

# Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин. Часть II\*

ПОПОВ В.И.

Предложены и исследованы новые схемы трехфазных дробных петлевых несимметричных обмоток электрических машин переменного тока при нецелом числе  $z/3$  для  $2p=4$  и 6 полюсов, характеризуемые пониженной несимметрией напряжений, улучшенным гармоническим составом МДС. Разработана методика определения электромагнитных параметров обмоток с использованием их многоугольников МДС и звезд пазовых ЭДС, даны сравнения основных параметров предложенных обмоток с известными и показаны преимущества новых обмоток.

**Ключевые слова:** трехфазные несимметричные дробные обмотки, дифференциальное рассеяние, коэффициенты несимметрии напряжений

Группировка катушек  $m=3$ -фазных несимметричных дробных обмоток при нецелом  $z/m$ , когда оказываются нарушенными по [1–2] оба условия симметрии ( $2p/d \neq \text{ц.ч.}$  и  $d/m = \text{ц.ч.}$ ), должна определяться для всей обмотки. Если числа  $z$  и  $p$  имеют общий делитель  $t \geq 1$ , то обмотка содержит  $t$  частей и они занимают одинаковые положения в магнитном поле, а всей обмотке соответствуют  $t$  звезд пазовых ЭДС с  $z/t$  векторами в каждой из них. Таким образом, для несимметричных обмоток такого вида имеем по [1–2]  $z=Nt$  и  $2pm=dt$ , т.е.  $N=qd=z/t$ , и тогда электрические углы сдвига пазовых векторов для основной гармонической ЭДС (МДС) — между соседними пазами  $\alpha_n$  и соседними векторами  $\alpha_b$  — определяются выражениями (28) по [1] и номера последовательных пазов звезд ЭДС соответствуют  $D$ -рядам [1–2] при той же разности номеров  $D=(mNP+m)/d$  по [1], что и для несимметричных обмоток при целых числах  $z/m$  и  $d/m$ .

По значению  $D$  определяются ряды номеров последовательных пазов звезды пазовых ЭДС, и число таких рядов для всей обмотки равно  $t$  с  $N$  пазами в каждом, а каждый последующий ряд получается из предыдущего прибавлением к нему числа  $N=qd$ . Максимальный коэффициент распределения для основной гармонической ЭДС получается при разделении  $z$  пазов, представленных  $t$  рядами, на  $m$  фаз таким образом, чтобы пазы каждой фазы были возможно ближе друг к другу, а так как число пазов  $z$  не кратно числу фаз  $m$ , то равные числа катушек для

New schemes are proposed and investigated of asymmetric three-phase fractional-slot lap windings of a.c. electrical machines with a non-integer number  $z/3$  for  $2p=4$  and 6 poles, characterized by a reduced voltage asymmetry and an improved harmonic composition of the m.m.f. A procedure has been developed for determining the electromagnetic parameters of the windings using their m.m.f polygons and stars of the slot e.m.f. The windings proposed are compared with the known ones, and their advantages are demonstrated.

**Key words:** asymmetric fractional-slot three-phase windings, differential dispersion, coefficients of voltage asymmetry

фаз могут получаться только при удалении некоторых катушек по [2] или их частей в предлагаемых обмотках; числа малых и больших катушечных групп в разных фазах получаются различными, и формирование таких обмоток должно обеспечивать возможно меньшую несимметрию напряжений.

Последовательность больших и малых групп в группировке дробной несимметричной обмотки рассматриваемого вида не зависит, как и в обмотках по [1–2], от целой части  $b$  и определяется дробной частью  $c/d$  числа  $q=b+c/d$ . Вместе с тем ее группировка должна определяться для всей обмотки (для  $6p$  групп) и не иметь повторений.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при  $z/3 \neq \text{ц.ч.}$  имеют знаменатель дробности  $d$  числа  $q$ , кратный трем ( $d/3 = \text{ц.ч.}$ ), и для них  $2p/d \neq \text{ц.ч.}$  Ограничимся исследованием несимметричных обмоток такого вида для чисел полюсов  $2p=4$  и 6. При  $2p=4$  и значениях  $d=3$  и 6 числитель дроби  $c/d$  может иметь значения  $c=1, 2$  для  $d=3$  и  $c=1, 5$  для  $d=6$ , которым при  $q=b+1/6, b+1/3, b+2/3, b+5/6$  соответствуют группировки для  $6p=12$  групп и  $b=0$  [2]:

$$\begin{aligned} & 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \underline{1} \ 0 \ 0 \ 0 \ (c/d=1/6); \\ & 0 \underline{1} \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ (c/d=1/3); \\ & 1 \ 0 \ 1 \ \underline{1} \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ \underline{1} \ (c/d=2/3); \\ & 1 \ 1 \ 1 \ \underline{1} \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ (c/d=5/6), \end{aligned} \quad (1)$$

а при  $2p=6$  значение  $d$  должно быть кратным 9, тогда числитель дроби  $c/d$  может иметь значения  $c=1, 2, 4, 5, 7, 8$  и им при  $q=b+1/9, b+2/9, b+4/9, b+5/9, b+7/9, b+8/9$  соответ-

\* Часть I этой статьи опубликована в № 4 и 5, 1999 г.

ствуют группировки для  $6p=18$  групп и  $b=0$  [2]:

$$\begin{aligned} & \underline{1} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ (c/d=1/9); \\ & \underline{1} \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ (c/d=2/9); \\ & 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ \underline{1} \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ \underline{1} \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ (c/d=4/9); \\ & \underline{1} \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ (c/d=5/9); \\ & 1 \ 1 \ 1 \ \underline{1} \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ \underline{1} \ 0 \ (c/d=7/9); \\ & 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ (c/d=8/9), \end{aligned} \quad (2)$$

где черточкой снизу помечены катушечные группы, в которых по [2] удаляется (выключается) начальная или конечная катушка.

Как и для любой  $m=3$ -фазной двухслойной  $2m=6$ -зонной обмотки, в дробной несимметричной обмотке (при  $b \neq 0$ ) каждая фаза содержит  $2p$  катушечных групп и при соединении ее схемы катушечные группы с четными номерами, соответствующие зонам  $X, Y, Z$ , включаются встречно группам с нечетными номерами, соответствующим зонам  $A, B, C$  [1].

Исследуемые трехфазные несимметричные дробные обмотки с группировками по (1) и (2) не имеют повторений и параллельных ветвей, содержат  $6p$  катушечных групп с номерами от  $1\Gamma$  до  $(6p)\Gamma$  и изображаются развертками пазовых слоев по [1], где отмеченные кружочками пазы соответствуют выключенным по [2] катушкам групп рядов (1)–(2). На звездах пазовых ЭДС верхнего пазового слоя размечены оси катушечных групп, а группы с выключенным по [2] катушками отмечены пунктирными линиями и их номерам приписан сверху штрих, а точками отмечены оси векторов ЭДС катушечных групп  $\Sigma E'_{k,g}$ ,  $\Sigma E''_{k,g}$  фаз для  $2p=6$ -полюсных обмоток.

Трехфазные несимметричные дробные обмотки при  $q=b+1/6$  и  $2p=4$  формируются в  $z=2(6b+1)$  пазах из  $6p=12$  катушечных групп с концентрическими неравновитковыми по рис. 1, a–3, a катушками при группировке по (1). Эквивалентное число полностью заполненных обмоткой пазов равно  $z'=z-4x$ , средний шаг катушек по пазам принимается равным  $y_{p,cr}=$

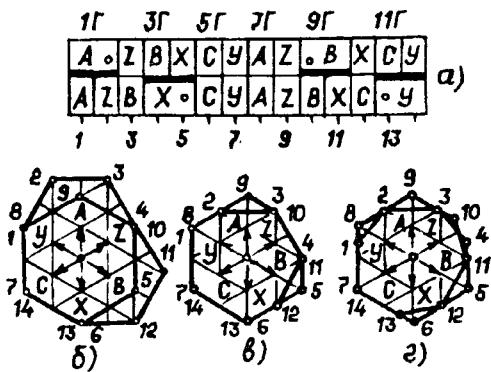


Рис. 1. Чередования по пазам фазных зон (а) и многоугольники МДС (б–г) трехфазной несимметричной дробной  $q=b+1/6$  обмотки при  $q=7/6$ ,  $p=2$ ,  $z=14$

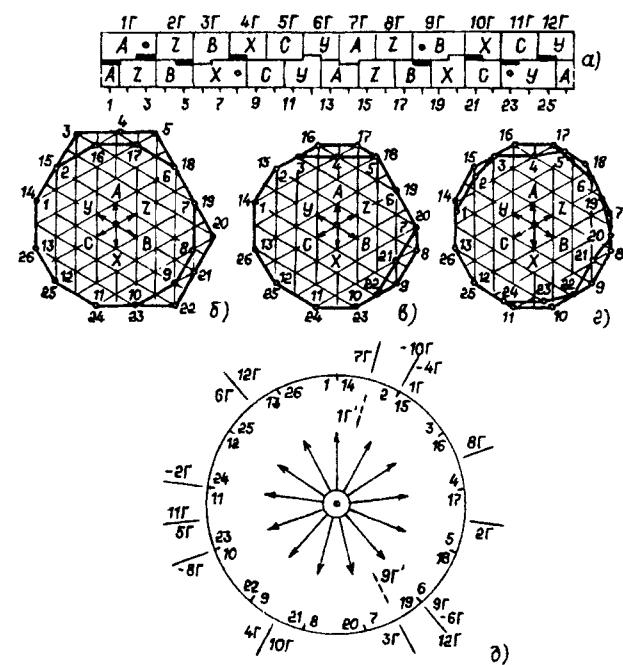


Рис. 2. Чередования по пазам фазных зон (а), многоугольники МДС (б–г) и звезда пазовых ЭДС (д) трехфазной несимметричной дробной  $q=b+1/6$  обмотки при  $q=13/6$ ,  $p=2$ ,  $z=26$

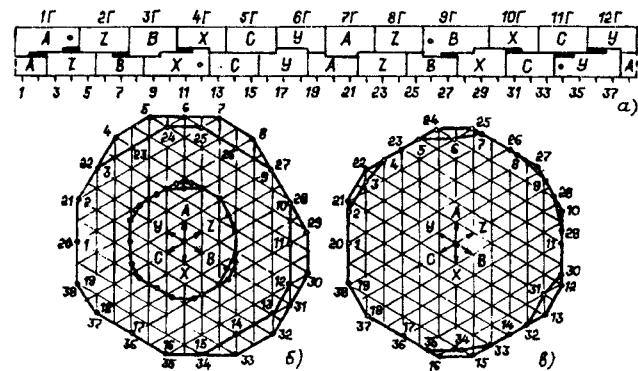


Рис. 3. Чередования по пазам фазных зон (а) и многоугольники МДС (б–г) трехфазной несимметричной дробной  $q=b+1/6$  обмотки при  $q=19/6$ ,  $p=2$ ,  $z=38$

$=3b-k$  при  $k=0$  для  $b=1$ ,  $k=1$  для  $b=2$  и 3,  $k=2$  для  $b=4$  и 5, значение  $x$  выбирается в пределах  $0,45 \div 0,55$ .

Примеры выполнения обмоток при  $q=b+1/6$  и  $2p=4$  для значений  $b=1, 2, 3$  показаны на рис. 1–3.

При  $q=1+1/6$  ( $b=1$ ,  $c=1$ ,  $N=7$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=2(6+1)=14$  пазов (рис. 1, a) и группировку по (1) 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1. При  $\tau_p=z/2p=3,5$  шаги катушек по пазам равны  $y_{p,cr}=4$ , 2 и  $y_p=3$  ( $y_{p,cr}=3b=3$ ) для двух- и однокатушечных групп; зачерненные пазы содержат по  $(2w_k-x)$  витков. Многоугольники МДС рис. 1, б–г построены при одинаковом масштабе треугольной сетки для обмоток: исходной равновитковой при полном числе катушек (рис. 1, б), при включенных катушках групп  $1\Gamma$ ,  $9\Gamma$  (рис. 1, в)

и предлагаемой при неравновитковых катушках для  $x=0,5$  (рис. 1,2).

При  $q=2+1/6$  ( $N=13$ ) и  $p=2$  обмотка (рис. 2,а) имеет  $z=26$  пазов и группировку 3 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 2 при шагах катушек  $y_{pi}=7, 5, 3$  и 6, 4 ( $y_{pi,cr}=3b-1=5$  при  $\tau_{pi}=6, 5$ ) для трех- и двухкатушечных групп; многоугольники МДС рис. 2,б—г построены по тем же условиям, что и для рис. 1,б—г.

При  $q=3+1/6$  ( $N=19$ ) и  $p=2$  обмотка (рис. 3,а) имеет  $z=38$  пазов и группировку 4 3 3 3 3 3 3 3 3 4 3 3 3 при  $y_{pi}=11, 9, 7, 5$  и 10, 8, 6 ( $y_{pi,cr}=3b-1=8$  при  $\tau_{pi}=9,5$ ) для четырех- и трехкатушечных групп; многоугольники МДС рис. 3,б соответствуют обмоткам исходной при полном числе катушек (наружный) и при выключенных катушках групп 1Г, 9Г (внутренний) и их масштабы отличаются вдвое, а рис. 3,в — неравновитковой при  $x=0,5$ .

Трехфазным несимметричным обмоткам при  $q=b+1/6$  и  $2p=4$  полюсах соответствует звезда пазовых ЭДС вида рис. 2,д содержащая  $t=2$  звезды с  $z/2$  векторами в каждой при угле их сдвига  $\alpha_{pi}=360^\circ/2/z$  и симметричном смещении осей фаз  $A$  и  $B$  относительно оси фазы  $C$ , по которой определяются фазные  $\Sigma E'_{k,r}$  и  $\Sigma E''_{k,r}$  ЭДС фаз и углы их сдвига:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma E'_{k,rA} &= E_{1r+4r+10r}; & \Sigma E''_{k,rA} &= E_{7r}; \\ \Sigma E'_{k,rB} &= E_{6r+9r+12r}; & \Sigma E''_{k,rB} &= E_{3r}; \\ \Sigma E'_{k,rC} &= E_{5r+11r}; & \Sigma E''_{k,rC} &= (E_{2r+8r}) \cos(\alpha_{pi}/2); \\ \gamma_A^\circ &= \arcsin [(\Sigma E'_{k,rA}/E_{\phi A}) \sin(180^\circ - \alpha_{pi}/2)] = \gamma_B^\circ; \\ \varphi_{AB}^\circ &= (2b) \alpha_{pi} + 2\gamma_A^\circ; & \varphi_{BC}^\circ &= \varphi_{CA}^\circ = (360^\circ - \varphi_{AB}^\circ)/2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\gamma_A^\circ = \gamma_B^\circ$  — углы сдвига векторов ЭДС  $\Sigma E'_{k,rA}$  и  $E_{\phi A}$ ,  $\Sigma E'_{k,rB}$  и  $E_{\phi B}$ ;  $\varphi_{AB}^\circ$ ,  $\varphi_{BC}^\circ$ ,  $\varphi_{CA}^\circ$  — углы сдвига векторов фазных ЭДС, а значения фазных ЭДС определяются выражениями:

для фаз  $A$  и  $B$

$$E_\phi^2 = (\Sigma E'_{k,r})^2 + (\Sigma E''_{k,r})^2 - \Sigma E'_{k,r} \Sigma E''_{k,r} \times \times 2 \cos(180^\circ - \alpha_{pi}/2); \quad (5)$$

для фазы  $C$

$$E_\phi = \Sigma E'_{k,r} + \Sigma E''_{k,r}. \quad (6)$$

Для обмотки рис. 1,а при  $2w_{k*}=2$  витках паза, значениях угла  $\alpha_{pi}=360^\circ/7$ , ЭДС катушечных групп  $\Sigma E'_{k,rA} = \Sigma E'_{k,rB} = 3,776615 - 1,75676x$ ,  $\Sigma E''_{k,rA} = \Sigma E''_{k,rB} = 0,974928$ ,  $E_{\phi C} = 3,706615$  по (4)–(6) вычисляются и сводятся в табл. 1 параметры: исходной равновитковой обмотки при полном числе катушек; равновитковой обмотки при выключенных катушках групп 1Г, 9Г; неравновитковой обмотки (при  $x=0,5$ ).

Из табл. 1 видно, что для неравновитковой обмотки рис. 1,а при  $x=0,5$  коэффициент несимметрии  $K_{нес\%}$  снижается в  $3,34/1,89=1,8$  раза по сравнению с исходной равновитковой и в  $5,11/1,89=2,7$  раза по сравнению с обмоткой по [2] с выключенным катушками групп 1Г и 9Г.

Из многоугольников МДС рис. 1,б и г

$$R_d^2 = (68 - 48x + 20x^2)/14, \quad (7)$$

откуда вычисляются: для исходной обмотки при полном числе катушек ( $x=0$ )  $R_d^2=68/14$  и по [1] при  $K_{об}=0,9225$  значение  $\sigma_{д\%}=14,95$ ; для неравновитковой (при  $x=0,5$ )  $R_d^2=49/14$  и при  $K_{об}=0,9307$  значение  $\sigma_{д\%}=10,78$ , т.е. эффективность по коэффициенту  $\sigma_d$  неравновитковой обмотки возрастает в  $14,96/10,78=1,39$  раза.

Подобными расчетами определяются и сводятся в табл. 1 параметры обмоток по рис. 2,а и 3,а.

По табл. 1 видно значительное снижение ко-

Таблица 1

Параметры при $q=b+1/6$	$z=14$		$z=26$		$z=38$	
	$x=0$	$x=0,5$	$x=0$	$x=0,5$	$x=0$	$x=0,5$
$E_{\phi A}=E_{\phi B}$	4,6045	3,7307	7,9970	7,1642	11,9976	11,0831
$E_{\phi C}$	3,7066	3,7066	7,1573	7,1573	11,1361	11,1361
$K_{об}$	0,9225	0,9307	0,8904	0,8952	0,9245	0,9251
$\gamma_A^\circ = \gamma_B^\circ$	5,2711	6,5105	3,1147	4,4295	2,2039	3,2246
$\varphi_{AB}^\circ$	113,3994	115,8782	116,9988	119,6282	118,0920	120,1334
$\varphi_{BC}^\circ = \varphi_{CA}^\circ$	123,3003	122,0609	121,5006	120,1859	120,9540	119,9333
$E_{AB}$	7,6969	6,3234	13,6370	12,3854	20,5778	19,2094
$E_{BC}=E_{CA}$	7,3267	6,5067	13,2285	12,4144	20,1344	19,2359
$K_{нес\%}$	3,34	1,89	2,05	0,16	1,46	0,09
$\sigma_{д\%}$	14,96	10,78	4,25	3,44	2,02	2,19

эффективов несимметрии  $K_{\text{нес}}\%$  и дифференциального рассеяния  $\sigma_{\text{д}}\%$  неравновитковых обмоток с  $q=b+1/6$  и  $2p=4$  по сравнению с исходными при полном числе катушек. Расчеты для обмоток при  $q=4+1/6$  ( $z=50$ ),  $q=5+1/6$  ( $z=62$ ), выполняемых подобно обмотке рис. 3,а, показывают снижение для них при  $x=0,5$  коэффициента  $K_{\text{нес}}\%$  в  $1,27/0,12=10,6$  раза для  $z=50$  и в  $1,01/0,03=32,7$  раза для  $z=62$ .

**Трехфазные несимметричные дробные обмотки при  $q=b+1/3$  и  $2p=4$**  полюсах формируются в  $z=4(3b+1)$  пазах при группировке по (1) и для ее  $(b+1)$ -катушечных групп ( $2\Gamma$ ,  $4\Gamma$ ,  $8\Gamma$ ,  $12\Gamma$ ) внутренняя катушка содержит по  $(1-x)w_k$  витков, а группы  $6\Gamma$ ,  $10\Gamma$  содержат катушку с увеличенным числом витков  $(1+x)w_k$ ,  $z'=z-2x$ ; средний шаг катушек по пазам принимается равным при  $y_{\text{п.ср}}=3b-k$  при  $k=0$  для  $b=1$  и 2,  $k=1$  для  $b=3$  и 4,  $k=2$  для  $b=5$ ; значение  $x$  выбирается в пределах  $0,35 \div 0,45$ .

Выполнение обмоток при  $q=b+1/3$  и  $2p=4$  по такому алгоритму для значений  $b=1$ , 2, 3 показано на примере одной обмотки (рис. 4).

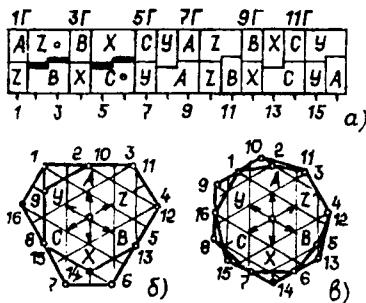


Рис. 4. Чередование по пазам фазных зон (а) и многоугольники МДС (б-в) трехфазной несимметричной дробной обмотки при  $q=4/3$ ,  $p=2$ ,  $z=16$

При  $q=1+1/3$  ( $b=1$ ,  $c=1$ ,  $N=4$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=4(3+1)=16$  пазов (рис. 4,а) и группировку 1 2 1 2 1 1 2 1 1 1 2. Шаги катушек

равны  $y_{\text{пп}}=4,2$  и  $y_{\text{п}}=3$  ( $y_{\text{п.ср}}=3b=3$  при  $\tau_{\text{п}}=4$ ) для двух- и однокатушечных групп; многоугольники МДС рис. 4,б и в построены (при одинаковом масштабе сетки) для обмоток — исходной равновитковой при полном числе катушек (рис. 4,б) и неравновитковой (рис. 4,в).

При  $q=2+1/3$  ( $N=7$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=28$  пазов и группировку 2 3 2 3 2 2 2 3 2 2 2 3 при шагах катушек  $y_{\text{пп}}=8, 6, 4$  и  $7, 5$  ( $y_{\text{п.ср}}=3b-1=5$  при  $\tau_{\text{п}}=7$ ) для трех- и двухкатушечных групп; внутренняя катушка групп  $6\Gamma$ ,  $10\Gamma$  содержит по  $(1+x)w_k$  витков; многоугольники МДС строятся для обмоток: исходной, с выключенной катушкой группы  $2\Gamma$ , неравновитковой.

При  $q=3+1/3$  ( $N=10$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=40$  пазов и группировку 3 4 3 4 3 3 3 4 3 3 3 4 при  $y_{\text{пп}}=11, 9, 7, 5$  и  $10, 8, 6$  ( $y_{\text{п.ср}}=3b-1=8$  при  $\tau_{\text{п}}=10$ ) для четырех- и трехкатушечных групп; средняя катушка групп  $6\Gamma$ ,  $10\Gamma$  содержит по  $(1+x)w_k$  витков; многоугольники МДС строятся для обмоток: исходной, с выключенной катушкой группы  $2\Gamma$  и неравновитковой при  $x=0,5$ .

Трехфазным несимметричным обмоткам при  $q=b+1/3$  и  $2p=4$  соответствует звезда пазовых ЭДС вида рис. 5 при симметричном смещении осей фаз  $A$  и  $B$  относительно оси фазы  $C$ , по

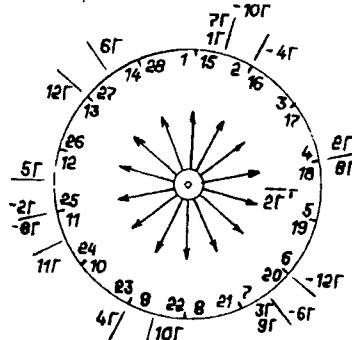


Рис. 5. Звезда пазовых ЭДС трехфазной несимметричной дробной обмотки при  $q=7/3$ ,  $p=2$ ,  $z=28$

Таблица 2

Параметры при $q=b+1/3$	$z=16$		$z=28$		$z=40$	
	$x=0$	$x=0,4$	$x=0$	$x=0,4$	$x=0$	$x=0,4$
$E_{\Phi A}=E_{\Phi B}$	4,3976	4,4902	8,3882	8,4388	11,8229	11,9219
$E_{\Phi C}$	4,2824	4,5556	8,3024	8,5445	11,7597	12,0335
$K_{\text{об}}$	0,8718	0,8905	0,9288	0,9346	0,9078	0,9152
$\gamma_A=\gamma_B$	8,5432	6,9720	4,1556	3,6571	2,7101	2,4747
$\gamma_C$	4,7357	—	2,9205	—	2,1042	—
$\varphi_{AB}$	117,9136	121,0560	120,2602	121,2572	120,5798	121,0506
$\varphi_{BC}$	125,7789	119,4720	122,7904	119,3714	121,8142	119,4747
$\varphi_{CA}$	116,3075	119,4720	116,9494	119,3714	117,6060	119,4747
$E_{AB}$	7,5355	7,8183	14,5478	14,7081	20,5374	20,7578
$E_{BC}$	7,7265	7,8130	14,6535	14,6613	20,6073	20,6909
$E_{CA}$	7,3736	7,8130	14,2273	14,6613	20,1724	20,6909
$K_{\text{нес}}\%$	2,71	0	1,77	0,20	1,32	0,22
$\sigma_{\text{д}}\%$	12,12	8,59	4,24	2,83	1,87	1,35

которой определяются:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma E'_{\text{к.г}A} &= E_{1\Gamma+7\Gamma+10\Gamma}; & \Sigma E''_{\text{к.г}A} &= E_{4\Gamma}; \\ \Sigma E'_{\text{к.г}B} &= E_{3\Gamma+6\Gamma+9\Gamma}; & \Sigma E''_{\text{к.г}B} &= E_{12\Gamma}; \\ \Sigma E'_{\text{к.г}C} &= E_{2\Gamma+8\Gamma}; & \Sigma E''_{\text{к.г}C} &= (E_{5\Gamma+11\Gamma}) \cos(\alpha_{\text{п}}/2); \\ \varphi_{AB} &= (2b+1)\alpha_{\text{п}} - 2\gamma_A^\circ; \\ \varphi_{BC} &= \varphi_{CA}^\circ = (360^\circ - \varphi_{AB}^\circ)/2, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где углы  $\gamma_A^\circ = \gamma_B^\circ$  определяются по (4), а значения фазных ЭДС — по (5) для фаз *A*, *B* и по (6) для фазы *C*.

По (8) и многоугольникам МДС обмоток с  $q=b+1/3$  вычисляются и сводятся в табл. 2 параметры обмоток.

Из табл. 2 видно значительное снижение коэффициентов несимметрии  $K_{\text{нес}\%}$  и дифференциального рассеяния  $\sigma_{\text{д}\%}$  неравновитковых обмоток с  $q=b+1/3$  при  $x=0,4$  по сравнению с обмотками с выключенной по [2] катушкой. Например, для обмотки с  $q=1+1/3$  ( $z=16$ )  $\sigma_{\text{д}\%}$  уменьшается в  $12,12/8,59=1,41$  раза, а значение  $K_{\text{нес}\%}$  снижается до нуля, т.е. такая обмотка становится практически симметричной. Расчеты для обмоток при  $q=4+1/3$  ( $z=52$ ) и  $q=5+1/3$  ( $z=64$ ) показывают снижение для них (при  $x=0,4$ ) коэффициента несимметрии  $K_{\text{нес}\%}$  примерно в 12 раз.

**Трехфазные несимметричные дробные обмотки при  $q=b+2/3$  и  $2p=4$**  полюсах формируются в  $z=4(3b+2)$  пазах из  $bp=12$  катушечных групп с концентрическими неравновитковыми катушками при группировке по (1) и  $z'=z-2x$ ; средний шаг катушек принимается равным  $Y_{\text{п.ср}}=3b+k$  при  $k=1$  для  $b=1$  и 2,  $k=0$  для  $b=3$  и 4,  $k=-1$  для  $b=5$ , а значение  $x$  выбирается в пределах  $0,35 \div 0,45$ .

При  $q=1+2/3$  ( $b=1$ ,  $c=2$ ,  $N=5$ ),  $p=2$  и  $z=20$  обмотка имеет группировку 2 1 2 2 2 1 2 1 2 1 2 2 при шагах катушек  $y_{\text{п}}=5$ , 3 и  $y_{\text{п}}=4$  ( $y_{\text{п.ср}}=3b+1=4$  при  $\tau_{\text{п}}=5$ ) для двух- и однокатушечных групп; многоугольники строятся для обмоток — исходной при полном числе катушек, с выключ-

ченными катушками групп 4 $\Gamma$ , 12 $\Gamma$ , неравновитковой.

При  $q=2+2/3$  ( $N=8$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=32$  паза и группировку 3 2 3 3 3 2 3 2 3 2 3 3 при шагах катушек  $y_{\text{п}}=9$ , 7, 5 и 8, 6 ( $y_{\text{п.ср}}=3b+1=7$  при  $\tau_{\text{п}}=8$ ) для трех- и двухкатушечных групп; многоугольники МДС строятся по тем же условиям, что и выше.

При  $q=3+2/3$  ( $N=11$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=44$  паза и группировку 4 3 4 4 4 3 4 3 4 3 4 4 при  $y_{\text{п}}=12$ , 10, 8, 6 и 11, 9, 7 ( $y_{\text{п.ср}}=3b=9$  при  $\tau_{\text{п}}=11$ ) для четырех- и трехкатушечных групп; многоугольники МДС строятся для обмоток — исходной равновитковой, неравновитковой при  $x=0,5$ .

Трехфазным несимметричным обмоткам при  $q=b+2/3$  и  $2p=4$  соответствует звезда пазовых ЭДС, по которой определяются значения необходимых ЭДС и углов.

Параметры обмоток с  $q=b+2/3$  сведены в табл. 3, из которой видно значительное снижение коэффициентов  $K_{\text{нес}\%}$  и  $\sigma_{\text{д}\%}$  неравновитковых обмоток с  $q=b+2/3$  при  $x=0,4$  по сравнению с обмотками с выключенными по [2] катушками. Например, для обмотки с  $q=3+2/3$  ( $z=44$ )  $\sigma_{\text{д}\%}$  уменьшается в  $1,49/1,25=1,19$  раза, а значение  $K_{\text{нес}\%}$  снижается до нуля, т.е. такая обмотка становится практически симметричной. Расчеты для обмоток при  $q=4+2/3$  ( $z=56$ ) и  $q=5+2/3$  ( $z=68$ ) показывают снижение при  $x=0,4$  коэффициента  $K_{\text{нес}\%}$  примерно в 10 раз для  $z=56$  и в 18 раз для  $z=68$ .

**Трехфазные несимметричные дробные обмотки при  $q=b+5/6$  и  $2p=4$**  полюсах формируются в  $z=2(6b+5)$  пазах из  $bp=12$  катушечных групп с концентрическими неравновитковыми катушками при группировке по (1) и  $z'=z-4x$ ; средний шаг катушек принимается равным  $Y_{\text{п.ср}}=3b+k$  при  $k=1$  для  $b=1$  и 2,  $k=0$  для  $b=3$  и 4,  $k=-1$  для  $b=5$ , а значение  $x$  выбирается в пределах  $0,15 \div 0,25$ .

При  $q=1+5/6$  ( $b=1$ ,  $c=5$ ,  $N=11$ ),  $p=2$  и  $z=22$

Таблица 3

Параметры при $q=b+2/3$	$z=20$		$z=32$		$z=44$	
	$x=0$	$x=0,4$	$x=0$	$x=0,4$	$x=0$	$x=0,4$
$E_{\text{ф}A}=E_{\text{ф}B}$	5,4588	5,5849	9,3900	9,5258	12,8593	13,0031
$E_{\text{ф}C}$	5,3431	5,3431	9,3265	9,3265	12,8173	12,8173
$K_{\text{об}}$	0,9034	0,8974	0,9369	0,9335	0,9175	0,9157
$\gamma_A^\circ = \gamma_B^\circ$	6,1814	4,2250	4,5853	3,1622	3,5542	2,2484
$\varphi_{AB}^\circ$	120,3628	116,4500	121,6704	118,8244	121,6538	119,0422
$\varphi_{BC}^\circ = \varphi_{CA}^\circ$	119,8186	121,7750	119,1648	120,5878	119,1731	120,4789
$E_{AB}$	9,4722	9,4957	16,3991	16,4006	22,4562	22,4126
$E_{BC}=E_{CA}$	9,3463	9,5481	16,1404	16,3750	22,1434	22,4151
$K_{\text{нес}\%}$	0,89	0,36	1,07	0,11	0,94	0
$\sigma_{\text{д}\%}$	6,01	6,10	2,86	2,46	1,49	1,25

Таблица 4

Параметры при $q=b+5/6$	$z=22$		$z=34$		$z=46$	
	$x=0$	$x=0,2$	$x=0$	$x=0,2$	$x=0$	$x=0,2$
$E_{\Phi A}$	6,0955	6,3128	10,1234	10,3396	13,5187	13,7651
$E_{\Phi B}=E_{\Phi C}$	6,0955	6,1492	10,1234	10,1523	13,5187	13,5662
$K_{\text{об}}$	0,8708	0,8779	0,9203	0,9230	0,9013	0,9048
$\gamma_B=\gamma_C$	4,6276	3,6683	2,8670	2,4863	2,0754	1,8692
$\varphi_{AB}$	121,6538	119,0590	121,3250	119,2784	121,0665	119,4351
$\varphi_{BC}$	123,8010	121,8820	122,2044	121,4432	121,5422	121,1298
$\varphi_{CA}$	114,5452	119,0590	116,4706	119,2784	117,3913	119,4351
$E_{AB}$	10,6446	10,7412	17,6501	17,6819	23,5399	23,6022
$E_{BC}$	10,7541	10,7503	17,7257	17,7108	23,5949	23,6300
$E_{CA}$	10,2557	10,7412	17,2142	17,6819	23,1013	23,6022
$K_{\text{нес}\%}$	2,85	0,093	1,81	0,013	1,33	0,085
$\sigma_{\text{д}\%}$	4,37	4,01	2,34	1,56	—	—

Таблица 5

z	q (2p=4)	Равновитковые ( $x=0$ )			Неравновитковые			Эффективность по		
		$K_{\text{об}}$	$K_{\text{нес}\%}$	$\sigma_{\text{д}\%}$	$x$	$K_{\text{об}}$	$K_{\text{нес}\%}$	$\sigma_{\text{д}\%}$	$K_{\text{нес}\%}$	
14	7/6	0,9225	3,34	14,95	0,5	0,9307	1,89	10,78	1,8	1,39
16	4/3	0,8718	2,71	12,12	0,4	0,8905	0	8,59	—	1,41
20	5/3	0,9034	0,89	6,01	0,4	0,8974	0,36	6,10	2,5	—
22	11/6	0,8708	2,85	4,37	0,2	0,8779	0,093	4,01	30,6	1,09
26	13/6	0,8904	2,05	4,25	0,5	0,8952	0,16	3,44	12,8	1,24
28	7/3	0,9288	1,77	4,24	0,4	0,9346	0,20	2,83	8,9	1,50
32	8/3	0,9369	1,07	2,86	0,4	0,9335	0,11	2,46	9,7	1,16
34	17/6	0,9203	1,81	2,34	0,2	0,9230	0,11	1,56	16,5	1,50
38	19/6	0,9245	1,46	2,01	0,5	0,9251	0,09	2,19	16,2	—
40	10/3	0,9078	1,32	1,87	0,4	0,9252	0,22	1,35	6,0	1,39
44	11/3	0,9175	0,94	1,49	0,4	0,9157	0	1,25	—	1,19
46	23/6	0,9013	1,33	—	0,2	0,9048	0,09	—	14,8	—

обмотка имеет группировку 2 2 2 2 2 1 2 2 2 2 1 2 при шагах катушек  $y_{\text{пп}}=5$ , 3 и  $y_{\text{пп}}=4$  ( $y_{\text{пп,ср}}=3b+1=4$  при  $\tau_{\text{пп}}=5,5$ ) для групп двух- и однокатушечных; многоугольники МДС строятся для обмоток — исходной при полном числе катушек и неравновитковой.

При  $q=2+5/6$  ( $N=17$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=34$  паза и группировку 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 при шагах катушек  $y_{\text{пп}}=9$ , 7, 5 и 8, 6 ( $y_{\text{пп,ср}}=3b+1=7$  при  $\tau_{\text{пп}}=8,5$ ) для трех- и двухкатушечных групп; многоугольники МДС строятся для обмоток — исходной и с выключенной катушкой группы 4Г, неравновитковой.

При  $q=3+5/6$  ( $N=23$ ) и  $p=2$  обмотка имеет  $z=46$  пазов и группировку 4 4 4 4 4 3 4 4 4 4 3 4 при шагах катушек  $y_{\text{пп}}=12$ , 10, 8, 6 и 11, 9, 7 ( $y_{\text{пп}}=3b=9$  при  $\tau_{\text{пп}}=11,5$ ) для четырех и трехкатушечных групп; многоугольники МДС строятся для обмоток — исходной равновитковой, неравновитковой.

Параметры обмоток сведены в табл. 4, из которой видно значительное снижение коэффициентов  $K_{\text{нес}\%}$  и  $\sigma_{\text{д}\%}$  неравновитковых обмоток с  $q+5/6$  при  $x=0,2$  по сравнению с обмотками с выключенной по [2] катушкой. Например, для

обмотки с  $q=1+5/6$  ( $z=22$ )  $\sigma_{\text{д}\%}$  уменьшается в  $4,37/4,01=1,09$  раза, а  $K_{\text{нес}\%}$  — в  $2,85/0,093=30,7$  раза, т.е. такая обмотка становится практически симметричной. Расчеты для обмоток при  $q=4+5/6$  ( $z=58$ ) и  $q=5+5/6$  ( $z=70$ ), показывают снижение (при  $x=0,4$ ) коэффициента  $K_{\text{нес}\%}$  примерно в 12 раз.

Сравнение электромагнитных параметров трехфазных несимметричных неравновитковых обмоток при нецелом числе  $z/3$  и  $2p=4$  с равновитковыми ( $x=0$ ) показано (в порядке возрастания чисел пазов  $z$ ) в табл. 5, где приведены показатели эффективности по степени снижения коэффициентов несимметрии  $K_{\text{нес}\%}$  и дифференциального рассеяния  $\sigma_{\text{д}\%}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Попов В.И. Новые схемы трехфазных дробных обмоток электрических машин. Часть I. — Электричество, 1999, № 4 и 5.
- Лившиц-Гарик М. Обмотки машин переменного тока / Пер. с англ. — М.; Л.: ГЭИ, 1959.

[23.04.98]

(Окончание ч. II статьи — в следующем номере)

# Некоторые аспекты применения фаззи-управления в электроприводах

ТЕРЕХОВ В.М., ВЛАДИМИРОВА Е.С.

Дается краткая историческая справка о стадиях развития фаззи-логики. Указывается место, занимаемое фаззи-управлением среди основных направлений фаззи-логики. Отмечаются принципиальные особенности фаззи-управления, определяющие возможные области его применения. Анализируются области применения фаззи-контроллера для электроприводов. Приводятся результаты исследования по модернизации типовой структуры подчиненного регулирования силового следящего электропривода с нелинейностями в электромеханическом оборудовании на основе фаззи-управления.

**Ключевые слова:** электропривод, следящий привод, фаззи-логика, фаззи-управление

Фаззи-логика, в переводе с английского — приближенная, нечеткая, нежесткая, мягкая, но сохранившая в неанглийских публикациях в основном английское наименование Fuzzy (фаззи), находится сегодня в третьей стадии своего развития и применения. Родившаяся на основе теории множества в США в 60-е годы [1] фаззи-логика развивалась на первой стадии теоретически и применительно к информационным системам. Первым практическим применением фаззи-логики как управляющего средства было управление процессом приготовления цемента во вращающейся печи в 1970 г.

Вторая, «японская», стадия характеризуется эйфорией практического применения фаззи-управления японскими фирмами в 80-е годы: автоманист в метро, оптимизация режима зажигания в автомобиле, режимов работы пылесосов, стиральных машин, видеокамер и т.д., всего свыше 120 промышленных применений [2]. Европейские специалисты тогда скептически отнеслись к фаззи-управлению, считая, что те же задачи можно решить и традиционными способами управления.

Однако в 90-е годы на третьей, «европейской», стадии развития фаззи-логики специалисты в Европе изменили своим скептическим взглядам, когда убедились, что есть проблемы управления, которые лучше или дешевле могут решаться с помощью фаззи-управления либо могут быть решены только с применением фаззи-управления.

В некоторых фирмах и университетах Японии, Китая, Индии, Германии, США созданы отделы, которые занимаются теоретическими и практическими проблемами в трех направлениях фаззи-логики: фаззи-управление; фаззи-анализ фун-

*A brief historical review of development stages of the fuzzy-logic is given. The position of the fuzzy-control among the main directions of the fuzzy-logic is shown. The principal particularities of the fuzzy-control, which determine possible fields of its application, are outlined. Fields of application of fuzzy-controller for electric drives are analyzed. Results of a modernization of a typical structure of a subordinated control of a power servodrive with non-linearities in an electromechanical equipment on the basis of the fuzzy-control are presented.*

**Ключевые слова:** electric drive, servodrive, fuzzy-logic, fuzzy-control

кциональных и числовых множественных данных («распознавание образов»); экспертные системы. Появилось много публикаций, проводятся семинары по фаззи-логике, организованные фирмами (IEEE) и университетами (Uni-Dortmund) [3].

На данной стадии развития фаззи-управления имеются методические разработки в виде программной продукции и аппаратных предложений по фаззи-контроллерам. В области применения основное внимание уделяется медленным технологическим процессам (системы водо- и теплоснабжения, производства соков, химических жидкостей и т.п.), для которых фаззи-управление оказывается весьма эффективным.

Области применения фаззи-управления определяются отличительными свойствами и особенностями этого вида управления. Суть процедуры фаззи-управления в технических системах отражена на рис. 1,а и состоит в следующем: физические входные переменные  $x(t)$  на каждом временном такте определяют их степени принадлежности  $\mu(x)$  числовым множествам-ассоциациям  $A(i)$ , образующим логические фаззи-переменные — лингвистические термины (отрицательный большой (NL) — отрицательный средний (NM) — положительный большой (PL) (рис. 1,б). Преобразование физических входных переменных  $x(t)$  в  $A_{ij}$  называется фаззификацией. На основании предварительно составленных экспертом правил в форме: «ЕСЛИ  $x_1$  принадлежит  $A_{i1}$  И...И  $x_n$  принадлежит  $A_{in}$ , ТО  $u$  принадлежит  $B_i$ » выделяются выходные фаззи-переменные  $B_i$  (процедура логического заключения). Из выходных функций принадлежности  $\mu(u)$  логических переменных  $B_i$  согласно принципам фаззи-логики выделяются на каждом временном

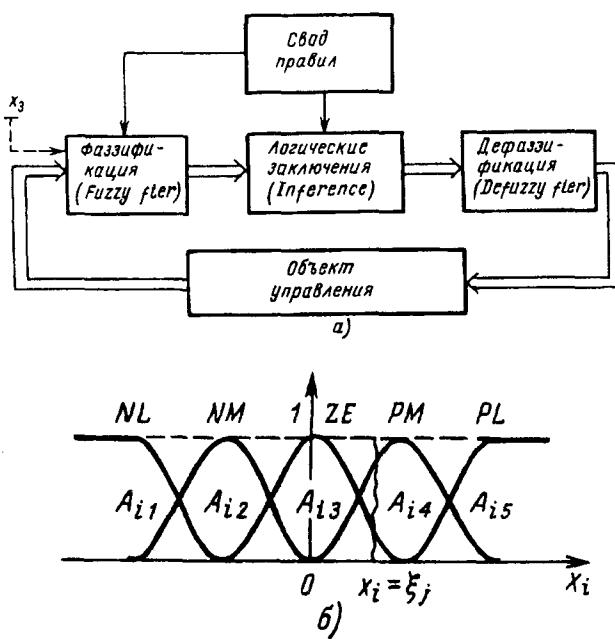


Рис. 1. Общая структурная схема фаззи-управления (а) и фаззи-переменные ( $A_i$ ) с функциями принадлежности ( $\mu(x_i)$ ) (б)

также физические управляющие воздействия  $u(t)$  (процедура дефаззификации). Данный процесс управления выполняет фаззи-контроллер, реализуемый программно-аппаратным способом и имеющий в наиболее простом варианте два входных и одно выходное воздействия (рис. 2). Фаззи-управление, весьма простое структурно и функционально, оказывается сложным при его синтезе, т.е. составлении алгоритма — свода правил и их количественного описания. Эта трудоемкая процедура выполняется итерационным методом на основе моделирования. Для оптимизации этого процесса начинают использовать нейронные сети в режиме обучающей системы.

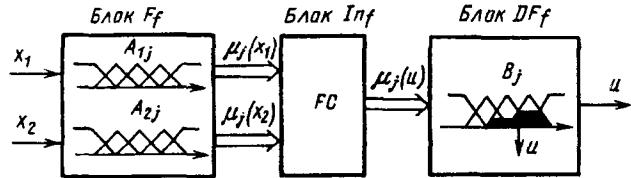


Рис. 2. Схема фаззи-контроллера с двумя входами и одним выходом

Принципиальные особенности фаззи-управления состоят в следующем:

фаззи-переменные, т.е. лингвистические термины, измеряются не отдельными числовыми значениями, а числовыми множествами, перекрывающими друг друга (рис. 1,б);

фаззи-управление в принципе не требует точной модели объекта, оно организует стратегию управления, моделирует мышление человека с принятием «мягкого» решения;

фаззи-управление имеет дело не с приближенными входными числовыми данными, а с приближенной концепцией управления, которая вводится для обработки данных, точных или неточных;

фаззи-контроллер — это включенная в процесс управления и работающая в реальном времени экспертная система, которая применяет фаззилогику в преобразовании качественных величин — лингвистических терминов.

Из этих особенностей следует, что фаззи-управление непригодно для формирования процессов регулирования в электроприводе «в малом», поскольку работает с числовыми массивами в качестве переменных, не подходит оно и для прецизионных систем электропривода и технологических процессов, так как использует приближенную стратегию управления. Однако фаззи-управление оказывается эффективным в сложных непрецизионных электромеханических системах с неполным, неточным математическим описанием или с отсутствием такового, может также улучшать процессы «в большом» при отработке значительных входных воздействий и возмущений в точных системах регулирования электропривода [4].

Применительно к электроприводу для фаззи-управления можно выделить два уровня:

верхний, при котором осуществляется управление технологическим процессом через электроприводы как исполнительные электромеханические модули (ЭММ) этого процесса (рис. 3);

нижний, при котором улучшаются показатели качества собственно электропривода — сложной электромеханической системы (ЭМС), что расширяет ее технологические возможности (рис. 4).

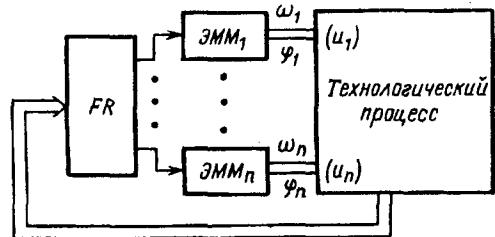


Рис. 3. Схема управления технологическим процессом с фаззи-регулятором (FR) через электромеханические модули (ЭММ<sub>1</sub>, ..., ЭММ<sub>n</sub>)

На первом уровне применения фаззи-управления исполнители технологического процесса — ЭММ-могут быть простейшими нерегулируемыми электроприводами, осуществляющими «мягкое», неточное позиционирование рабочих органов по выходным командам («приоткрыть немного вентиль», «открыть полностью», «прикрыть наполовину» и т.п.). В качестве ЭММ могут использоваться и регулируемые электроприводы для рабочих органов, требующих изменения ско-

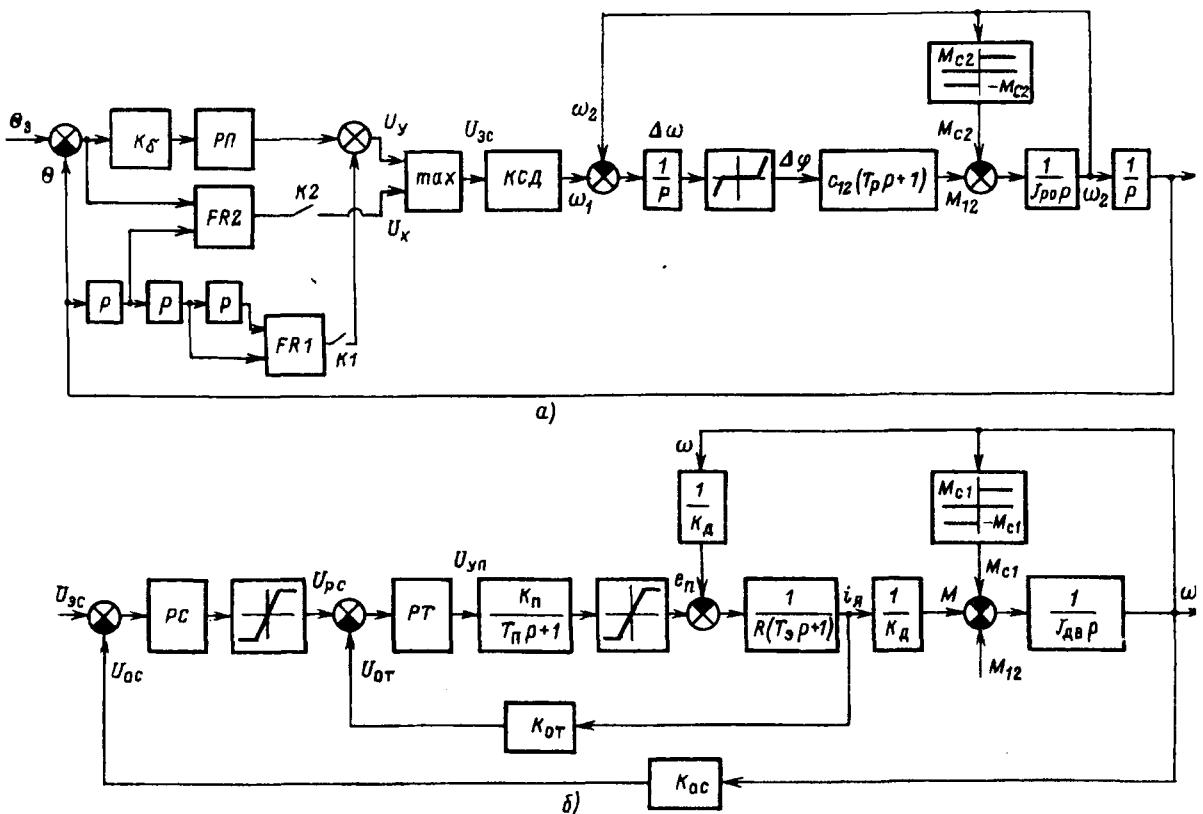


Рис. 4. Типовая трехконтурная структура подчиненного регулирования следящего нелинейного электропривода с дополнительными фаззи-регуляторами (FR1 и FR2) (а) и контур скорости (КСД) в ее составе (б)

ности согласно выходной команде («уменьшить подачу насоса», «увеличить максимально» и т.п.). При этом системы регулирования каждого в отдельности электропривода выполняются традиционными средствами, а фаззи-контроллер обеспечивает взаимосвязанную работу ЭММ в технологическом процессе. Фаззи-контроллер может выполнять не основную, а дополнительную функцию управления технологическим процессом, работая параллельно с основным традиционным регулятором и «мягко» реагируя на дополнительные внешние факторы, например на изменение параметров микроклимата в технологическом помещении и т.п., что повышает качество технологического процесса [3].

На втором уровне применения (для индивидуального электропривода) применение фази-контроллера оказывается целесообразным при оптимизации внешнего контура, так как именно он выполняет технологическую задачу электропривода. При этом улучшить показатели электропривода удается за счет ценного качества фази-контроллера — возможности реализации необходимого нелинейного алгоритма управления. Это позволяет устранять режимы автоколебаний в сложных нелинейных электроприводах, когда этого не удается достичь традиционными способами управления. Известно, что в сложных электромеханических системах реализация пара-

метрической адаптации традиционными методами затруднительна из-за проблемы сохранения устойчивости системы. Однако на основе адаптивного фаззи-регулятора, выполняющего неполную, «мягкую», приближенную адаптацию [3], эта проблема может быть решена.

Представляется актуальным исследовать возможность применения фаззи-управления в электроприводах. Так, важное практическое значение приобретает модернизация электроприводов без замены силового оборудования только на основе введения в систему управления фаззи-регулятора взамен традиционного регулятора или дополнительно к нему. На кафедре автоматизированного электропривода МЭИ проводилось исследование по модернизации типовой трехконтурной структуры подчиненного регулирования применительно к следящему электроприводу (СЭП) малой скорости антенной установки (рис. 4). В приведенной схеме:  $K_\delta$  — коэффициент линеаризованного измерителя рассогласования;  $РП$ ,  $РС$  и  $РТ$  — регуляторы положения, скорости и тока;  $max$  — элемент, реализующий функцию  $U_{3c} = max(|U_y|, |U_k|) sign U_y$ ;  $КСД$  — свернутый контур скорости двигателя;  $c_{12}$ ,  $T_p$  — коэффициент жесткости и постоянная времени вязкого трения редукторной передачи;  $J_{po}$  — момент инерции рабочего органа, приведенный к валу двигателя;  $K_{от}$ ,  $K_{oc}$  — коэффициенты обратной связи

по току и скорости двигателя;  $K_{\Pi}$ ,  $T_{\Pi}$  — коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя;  $K_d$ ,  $J_{dv}$  — коэффициент передачи и момент инерции двигателя;  $R$ ,  $T_e$  — сопротивление и электрическая постоянная времени силовой цепи двигателя.

В состав модернизируемого электропривода входят два двигателя ДНМ11 общей мощностью 5,6 кВт,  $n=1800$  об/мин. Некоторые параметры электромеханической системы: номинальная скорость рабочего органа 18'/с; механическая резонансная частота 2 Гц; кинематический люфт 2,5'; соотношение приведенных моментов инерции рабочего органа и двигателей 0,003; доли моментов трения на валах двигателей и рабочего органа относительно номинального — соответственно 50 и 1%.

Исходная система (ключи  $K1$  и  $K2$  разомкнуты) из-за упругости и зазора редуктора и неблагоприятного соотношения моментов инерции двигателя и рабочего органа (рефлектора) входит в режим автоколебаний при повышении коэффициента усиления пропорционально-интегрального регулятора положения (ПИ-РП) до желаемого по условию модернизации значения (рис. 5,а). Введение фаззи-регулятора  $FR1$  по двум переменным  $x_1 = \frac{d^2\theta}{dt^2}$  и  $x_2 = \frac{d^3\theta}{dt^3}$  (ключ  $K1$  замкнут) с алгоритмом управления, представленным таблично на рис. 6, позволяет повысить коэффициент усиления ПИ-РП до желаемого уровня при сохранении достаточно устойчивого режима позиционирования (рис. 5,б). Результаты

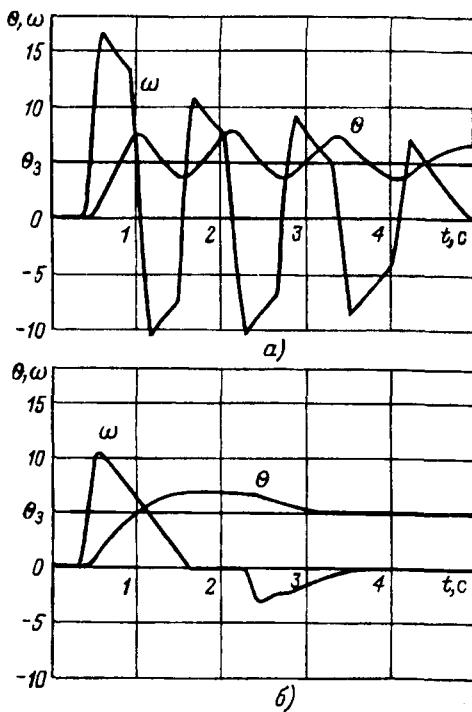


Рис. 5. Процессы позиционирования электропривода пропорционально-интегральным регулятором положения: а — без фаззи-регуляторов; б — с фаззи-регулятором  $FR1$

$x_1$	NL	NS	ZE	PS	PL	
$x_2$	NL	NS	ZE	PS	PL	
NL	X	X		PL	PS	NS
NS	X		PL	PS	NS	NS
ZE	PL	PS	ZE	NS	NL	
PS	PS	PS	NS	NL	X	
PL	PS	NS	NL	X	X	X

Рис. 6. Алгоритм управления фаззи-регулятора  $FR1$

получены на основании составленного алгоритма управления в виде табличного свода правил (рис. 6) с числовыми значениями местоположения фаззи-переменных NL (отрицательный большой), NS (отрицательный малый), PS (положительный малый), PL (положительный большой) соответственно для  $x_1$ : -0,009, -0,007, 0,007, 0,009;  $x_2$ :  $-8^{-6}$ ,  $-6^{-6}$ ,  $6^{-6}$ ,  $8^{-6}$ ; и: -11,5, -9,2, 9,2, 11,5. При этом для упрощения программы расчета управляющего воздействия была составлена преобразованная синглетон-формула дефазификации:

$$y = \frac{a \left( \sum_{i=1}^6 \mu_i - \sum_{j=1}^6 \mu_j \right) + b \left( \sum_{k=1}^3 \mu_k - \sum_{l=1}^3 \mu_l \right) + 0 \cdot \mu_{ZE}}{\sum_{n=1}^{19} \mu_n},$$

где индексы  $i$ ,  $j$ ,  $k$ ,  $l$  функций принадлежности  $\mu$  — номера правил для определения выходных фаззи-переменных соответственно PS, NS, PL, NL,  $a=9,2$ ,  $b=11,5$ .

Однако в полученном процессе позиционирования ПИ-РП дает перерегулирование, что вызывает двукратный процесс выбора зазора и, следовательно, нежелательный двукратный выброс динамической ошибки. Для устранения перерегулирования, но сохранения нулевой статической ошибки СЭП предлагается замена ПИ-РП на П-РП с добавлением второго фаззи-регулятора  $FR2$  по переменным  $\theta$  и  $\frac{d\theta}{dt}$  (ключ  $K2$  замкнут) с алгоритмом, компенсирующим ошибку при входе в установившийся режим (рис. 7). Данная модернизация на базе фаззи-регуляторов эффективна не только технически, что следует из приведенных графиков, но и экономически, так как не требует дорогостоящей замены силового электромеханического оборудования и обходится минимальными аппаратными затратами при цифровом управлении положением привода.

В заключение следует отметить, что задача поиска областей эффективного применения

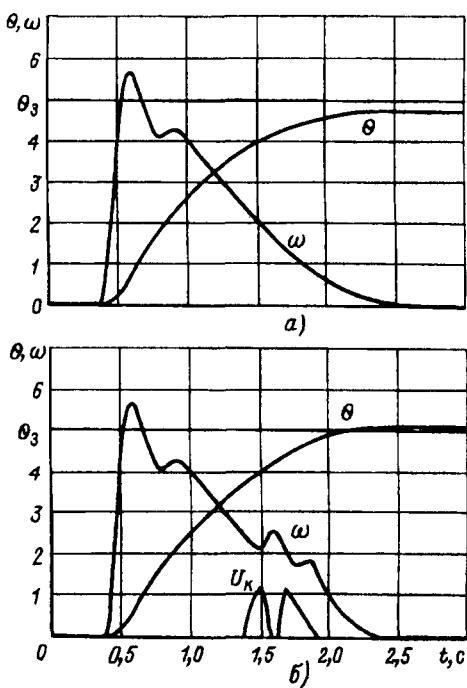


Рис. 7. Процессы позиционирования электропривода с пропорциональным регулятором положения: а — с одним дополнительным фаззи-регулятором (FR1); б — с двумя фаззи-регуляторами (FR1 и FR2)

фаззи-управления в электроприводе остается актуальной. Среди уже определенных областей можно выделить следующие:

фаззи-управление комплексом электромеханических модулей в составе технологического процесса для его улучшения за счет расширения учитываемых факторов, влияющих на процесс;

стабилизация движения сложных нелинейных электроприводов при больших воздействиях по каналам управления и момента нагрузки;

приближенная, «мягкая» адаптация в электроприводах с изменяемыми механическими и электрическими параметрами;

модернизация системы управления на основе фаззи-контроллера без замены силового электромеханического оборудования, которая оказывается для определенного класса электроприводов эффективной не только технически, но и экономически.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zadeh A. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965.
2. Reinfrank M. Fuzzy-Control-unscharfe Logik als Regelungskonzept. — Siemens Zeitschrift, 1991, № 5.
3. Reusch B., Fuzzy-Logik. 4. Dortmunder Fuzzy-Tage, 6–8 Juni, 1994.
4. Терехов В.М., Барышников А.С. Стабилизация движения тяжелых электроприводов на основе Fuzzy-логики. — Электричество, 1996, № 8.

[09.12.98]

Автор: Терехов Владимир Михайлович окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1953 г. В 1980 г. в МЭИ защитил докторскую диссертацию, посвященную исследованию электропривода следящих установок. Профессор МЭИ.

Владимира Екатерина Сергеевна — аспирант МЭИ.

## V симпозиум

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2010

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИТИИ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В 2000—2010 ГОДАХ

Состоится в Подмосковье 19—22 октября 1999 г.

#### Организаторы

Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина (ВЭИ)

Международная Ассоциация делового сотрудничества по трансформаторам, высоковольтной аппаратуре, электротехнической керамике и другим комплектующим изделиям и материалам (ТРАВЭК)

На симпозиум представлено более 200 докладов специалистов России и стран ближнего и дальнего зарубежья по направлениям:

- развитие технологии производства и передачи электроэнергии;
- оборудование высокого напряжения для передачи и распределения электроэнергии; изоляция; диагностика; испытания;
- электротехнологии и новые виды оборудования;
- преобразовательная техника и ее элементная база;
- системы управления и защиты.

По вопросу участия в Симпозиуме просьба обращаться в секретариат:

Адрес: Россия 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12

Факс: (095) 362-55-03, 362-56-17

Телефоны: (095) 362-55-03, 361-95-20, 361-96-87

# О расчете емкости некоторых видов пластин

СТРУНСКИЙ М.Г.

С помощью аналитического метода, предложенного автором ранее, определены приближенные значения емкости пластин, контур которых имеет форму астроиды, круговой луночки, ромба или ограничен кривыми разных порядков. Сопоставление полученных данных с результатами вычислений емкости существующими методами подтвердило эффективность примененной методики расчета.

**Ключевые слова:** емкость, пластина, погрешность, распределение потенциала

В статье [1] был предложен метод расчета электрической емкости проводников, примененный к уединенным пластинам, на форму и характеристики контура которых были наложены определенные геометрические ограничения. Несмотря на последнее, выделенный класс проводников весьма широк и включает в себя значительное число пластин, определение емкости которых представляет как теоретический, так и практический интерес.

Сущность предложенного метода заключается в задании (по соответствующим правилам) на поверхности пластины фиктивного распределения заряда, отражающего главные особенности истинного распределения, и принятии в качестве потенциала проводника его значения в начале координат. Установлено, что рассчитанная таким путем емкость пластин является сравнительно близким приближением к точному значению их емкости сверху, что в сочетании с получаемой существующими методами [2] нижней оценкой позволяет найти приближенное значение емкости данного проводника с известной погрешностью.

Ограниченный объем [1] не позволил рассмотреть в должной мере методические особенности применения метода и, соответственно, заметно расширить количество решенных задач по определению емкости пластин. Именно этому посвящена настоящая работа, являющаяся по существу продолжением статьи [1]; поэтому и обозначения, и основные расчетные формулы, и порядок представления численных результатов — такие же, что и в предыдущей работе.

Для удобства приведем здесь полученную в [1] формулу для расчета верхней границы емкости пластины:

$$C_B = \frac{q}{U_0} = 4\pi\epsilon \frac{\sum_{i=1}^n \int \sigma_i dS_i}{\sum_{i=1}^n \int \frac{\sigma_i dS_i}{\sqrt{x^2 + y^2}}}, \quad (1)$$

With the help of the analytical method proposed by authors earlier approximate capacitance values of plates with a contour in the form of an astroid, a circle crescent, a rhomb or restricted by curves of different orders are determined. The comparison of the data obtained with the results of calculating capacitance by existent methods has confirmed the efficiency of the method applied.

**Key words:** capacitance, plate, error, potential distribution

где  $q$  — суммарный заряд пластины;  $U_0$  — значение потенциала пластины в начале координат при плотности заряда

$$\sigma_i = \frac{f_i}{\sqrt{P_i^{(2)}(x, y)}}; \quad (2)$$

$P_i^{(2)}(x, y)$  — полином второй степени, представляющей левую часть уравнения

$$P_i^{(2)}(x, y) = 0, \quad (3)$$

получаемого из уравнения порядка  $k$ , описывающего  $i$ -ю часть контура пластины:

$$P_i^{(k)}(x, y) = 0; \quad (4)$$

$f_i$  — функция, определяемая для одной из  $n$  подобластей занимаемой пластиной области из условия  $\sigma_i \Big|_{\substack{x=x_1 \\ y=y_1}} = \text{const}$ ;  $S_i$  — односторонняя площадь поверхности каждой из подобластей;  $dS_i$  — элементы площади.

Если распределение заряда определено во всех точках поверхности пластины (в частности, кривые, ограничивающие контур пластины, не имеют изолированных особых точек), то  $f_i = A_i = \text{const}_i$ . Для проводников, контур которых описывается одним уравнением,  $n = 1$ .

Перейдем к расчету емкости пластин характерной формы.

Вычислим емкость пластины, контур которой имеет форму астроиды (рис. 1), уравнение которой

$$x^{2/3} + y^{2/3} = a^{2/3} \quad (5)$$

есть частный случай уравнения (4). Для приведения (5) к виду (3) возведем обе его части в третью степень:

$$a^2 - (x^{2/3} + y^{2/3})^3 = 0. \quad (6)$$

Введем криволинейные координаты, используя

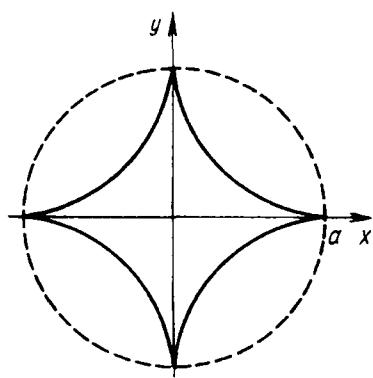


Рис. 1

параметрические уравнения астроиды:

$$x = u \cos^3 v; \quad y = u \sin^3 v. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим

$$a^2 - u^2 = 0,$$

откуда в соответствии с (2)

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{a^2 - u^2}}. \quad (8)$$

Найдя якобиан

$$D = 3u \sin^2 v \cdot \cos^2 v,$$

выполним требуемые (1) интегральные операции:

$$q = 2 \cdot 4 \cdot 3A \int_0^{a/2} \int_0^{\pi/2} \frac{u}{\sqrt{a^2 - u^2}} \sin^2 v \cdot \cos^2 v \, du \, dv = \frac{3}{2} \pi a A;$$

$$U_0 = \frac{2 \cdot 4}{4\pi\epsilon} 3A \int_0^{a/2} \int_0^{\pi/2} \frac{u}{\sqrt{a^2 - u^2}} \frac{\sin^2 v \cos^2 v}{u \sqrt{\sin^6 v + \cos^6 v}} \, du \, dv = \frac{A}{\epsilon} \left[ K\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - E\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \right],$$

где  $K\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \equiv K$ ,  $E\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \equiv E$  — полные эллиптические интегралы первого и второго рода с модулем  $k = \sqrt{3}/2$ .

Тогда согласно (1)

$$C_B = 8\epsilon a \frac{3\pi}{16(K - E)} = 8\epsilon a \cdot 0,62303. \quad (9)$$

Дополнив верхнюю границу (9) нижней оценкой

$$C_H = \frac{8\epsilon}{\sqrt{\pi}} \sqrt{S} = 8\epsilon a \sqrt{\frac{3}{8}} = 8\epsilon a \cdot 0,61237,$$

найдем значение емкости рассматриваемого проводника:

$$C_0 \simeq C_{\text{ср.г}} = \frac{2C_B C_H}{C_B + C_H} = 0,61766$$

с погрешностью

$$\delta = \frac{C_0 - C_H}{C_H} 100\% < 0,9\%.$$

Заметим, что если не переходить к криволинейным координатам, то исходя из (6) можно получить для  $C_B$  тот же результат, однако при этом вычисления оказываются гораздо более громоздкими.

Определим емкость проводника, имеющего форму симметричной круговой луночки. Поместим начало координат в центре симметрии, находящемся на расстоянии  $d$  от центра окружности, дуга которой ограничивает верхнюю половину луночки (рис. 2). Введя полярные координаты  $(r, \psi)$ , будем иметь:

$$R_0^2 = d^2 + r^2 + 2dr \sin \psi = d^2 + a^2,$$

откуда следует уравнение контура луночки

$$a^2 - (r^2 + 2dr \sin \psi) = 0,$$

а согласно (2) и выражение для плотности заряда:

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{a^2 - (r^2 + 2dr \sin \psi)}}. \quad (10)$$

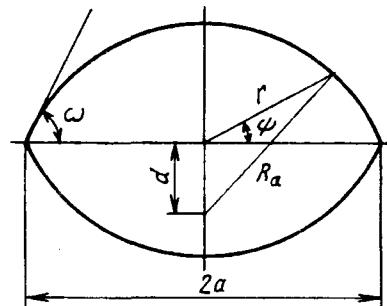


Рис. 2

Используя условия симметрии и разложив подкоренное выражение в (10) на множители, найдем суммарный заряд проводника и его потенциал в начале координат:

$$q = 2 \cdot 4A \int_0^{\pi/2} d\psi \int_0^{l-d \cdot \sin \psi} \frac{r \, dr}{\sqrt{(l-m)(l+m)}} = 8A \left[ \frac{\pi}{2} (a-d) + d \int_0^{\pi/2} \sin \psi \arcsin \frac{d \cdot \sin \psi}{l} \, d\psi \right] = 4\pi a \left( \sqrt{1 + \frac{d^2}{a^2}} - \frac{d}{a} \right) A;$$

$$U_0 = \frac{2A}{\pi\epsilon} \int_0^{\pi/2} d\psi \int_0^{l-d \cdot \sin \psi} \frac{dr}{\sqrt{(l-m)(l+m)}} = \frac{\pi}{2\epsilon} \left[ 1 - \frac{4}{\pi^2} I(\omega) \right] A,$$

где  $l \equiv \sqrt{d^2 \sin^2 \psi + a^2}$ ;  $m \equiv r + d \cdot \sin \psi$ ;

$$I(\omega) \equiv \int_0^{\pi/2} \arctg(\operatorname{ctg} \omega \cdot \sin \psi) \, d\psi,$$

причем  $\operatorname{ctg} \omega = d/a$ .

На основании (1)

$$C_B = 8\epsilon a \frac{\operatorname{tg} \frac{\omega}{2}}{1 - \frac{4}{\pi^2} I(\omega)}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что в крайних случаях ( $\omega = 0$  и  $\omega = 90^\circ$ ) эта формула приводит к точным результатам  $C_0 = 0$  и  $C_0 = 8\epsilon a$  соответственно.

Интеграл  $I(\omega)$  легко табулируется. Кроме того, нетрудно установить, что

$$\begin{aligned} I(\omega) \Big|_{\omega > 45^\circ} &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} (\operatorname{ctg} \omega)^{2k+1} \frac{(2k)!!}{(2k+1)!!} = \\ &= \operatorname{ctg} \omega \left( 1 - \frac{2}{9} \operatorname{ctg}^2 \omega + \frac{8}{75} \operatorname{ctg}^4 \omega - \frac{48}{735} \operatorname{ctg}^6 \omega + \frac{384}{8505} \operatorname{ctg}^8 \omega - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3840}{114345} \operatorname{ctg}^{10} \omega + \dots \right) \end{aligned}$$

а при достаточно малых углах  $\omega$  значения  $I(\omega)$  могут быть вычислены по формуле

$$I(\omega) = \frac{\pi^2}{4} - \sin \omega \left[ K(\cos \omega) + \frac{1}{6} E(\cos \omega) + \dots \right]$$

( $K$  и  $E$  — полные эллиптические интегралы первого и второго рода с модулем  $\lambda = \cos \omega$ ), погрешность которой при  $\omega = 5^\circ$  составляет  $\delta = -0,58\%$  и убывает с уменьшением  $\omega$ .

Границные значения емкости рассматриваемого проводника и ее приближенные значения, характеризуемые погрешностью  $\delta$ , представлены в табл. 1, в которой для сопоставления приведены также результаты расчета емкости  $C_{01}'$  по выражениям, полученным в [3, 4] для луночки, либо весьма узкой, либо близкой к диску.

Таблица 1

Относительные значения и погрешность определения емкости пластины в форме симметричной круговой луночки

$\omega$ , град.	$C_{01}'$	$I(\omega)$	$C_{B1}$	$C_{H1}$	$C_{01} = C_{\text{ср.г.1}}$	$\delta$ , %
10	0,402	1,864894	0,35829	0,27273	0,30970	11,9
20	0,515	1,495050	0,44744	0,38807	0,41565	6,6
30	0,641	1,203700	0,52318	0,48029	0,50082	4,1
40	—	0,957137	0,59464	0,56301	0,57839	2,7
50	—	0,739204	0,66576	0,64228	0,65381	1,8
60	—	0,540288	0,73922	0,72204	0,73053	1,2
70	0,819	0,353886	0,81745	0,80567	0,81152	0,72
80	0,899	0,175127	0,90321	0,89681	0,90000	0,35

Представленные данные свидетельствуют о сравнительно небольшой погрешности определения емкости с помощью предложенного в [1] метода в довольно широком диапазоне изменения угла  $\omega$ .

Значения  $C_{01}'$  находились по формуле (46) из [3] (при  $0 \leq \omega \leq 30^\circ$ ) или (47) из [4] (для  $70 \leq \omega \leq 90^\circ$ ), а нижняя

оценка — по формуле

$$C_{H1} \equiv C_H / 8\epsilon a = \sqrt{\frac{1}{\sin \omega} \left( \frac{\omega}{90 \sin \omega} - \frac{2 \cos \omega}{\pi} \right)}.$$

Данные табл. 1 позволяют также обоснованно указать границы применимости формулы (47) работы [4]. Так, при  $\omega \leq 70^\circ$  ее использование уже нецелесообразно, так как рассчитываемое по ней значение превышает верхнюю границу емкости; в то же время, как показывает более детальный анализ, с увеличением угла  $\omega$  точность этой формулы возрастает, обеспечивая при  $\omega > 87^\circ$  получение пяти верных знаков после запятой. Что касается выражения (46) из [3], то получаемые по нему значения превосходят не только верхние оценки емкости  $C_{01}'$ , но при  $\omega \geq 15^\circ$  и емкости эллиптической пластины, внутри которой содержится рассматриваемая пластина. Поэтому возможности применения данного выражения требуют уточнения.

Получим значение емкости пластины, контур которой описывается уравнением шестого порядка (рис. 3):

$$(x^2 + y^2)^3 = a^2 (x^4 + y^4). \quad (12)$$

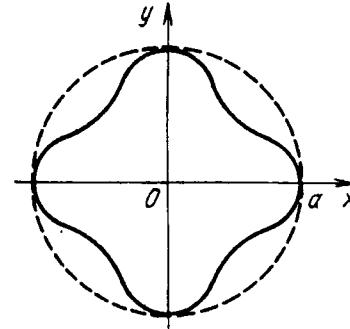


Рис. 3

Полярное уравнение контура, как и требуется, — второй степени:

$$a^2 (\cos^4 \psi + \sin^4 \psi) - r^2 = 0.$$

Из (12) видно, что в начале координат имеется изолированная особая точка (четвертого порядка), поэтому при построении функции распределения заряда по поверхности пластины следует поставить условие о постоянстве плотности в этой точке:

$$\begin{aligned} \sigma \Big|_{r=0} &= \frac{f(\psi)}{\sqrt{a^2 (\cos^4 \psi + \sin^4 \psi) - r^2}} \Big|_{r=0} = \\ &= \frac{f(\psi)}{a \sqrt{\cos^4 \psi + \sin^4 \psi}} = A_1, \end{aligned}$$

откуда

$$f(\psi) = A \sqrt{\cos^4 \psi + \sin^4 \psi},$$

и на основании (2)

$$\sigma = \frac{A \sqrt{\cos^4 \psi + \sin^4 \psi}}{\sqrt{a^2 (\cos^4 \psi + \sin^4 \psi) - r^2}}. \quad (13)$$

Исходя из (13), получим:

$$q = 2 \cdot 4 \int_0^{\pi/2} f(\psi) d\psi \int_0^a \frac{r dr}{\sqrt{a^2 [f(\psi)/A]^2 - r^2}} = 3\pi a A;$$

$$U_0 = \frac{2 \cdot 4}{4\pi\epsilon} \int_0^{\pi/2} f(\psi) d\psi \int_0^a \frac{dr}{\sqrt{a^2 [f(\psi)/A]^2 - r^2}} = \frac{A}{\epsilon} E_1 \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right),$$

где  $E_1 \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \equiv E_1$  — полный эллиптический интеграл второго рода с модулем  $z_1 = \sqrt{2}/2$ , т.е.

$$C_B = 8\epsilon a \frac{3\pi}{8E_1} = 8\epsilon a \cdot 0,87225.$$

Нижняя оценка:

$$C_H = 8\epsilon a \frac{\sqrt{3}}{2} = 8\epsilon a \cdot 0,86602.$$

Следовательно, емкость данного проводника имеет значение

$$C_0 \approx C_{\text{ср.г.}} = 8\epsilon a \cdot 0,86913,$$

погрешность которого  $\delta < 0,4\%$ .

Рассчитаем емкость пластины, контур которой описывается кривыми разных порядков (рис. 4). Как видно, область, занимаемая пластиной, ограничена попарно симметричными дугами окружности и отрезками прямых. Очевидно, что согласно (2)

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \frac{A\alpha}{\sqrt{a^2 - (x^2 + y^2)}}, \quad \sigma_2 = \sigma_4 = \frac{A}{\sqrt{b^2 - y^2}}, \quad (14)$$

где параметр  $\alpha$  находится из условия

$$\alpha = \left. \frac{a^2 - (x^2 + y^2)}{b^2 - y^2} \right|_{x=y=0} = \frac{a}{b}.$$

Уравнение линии сшивания следует из соотношения

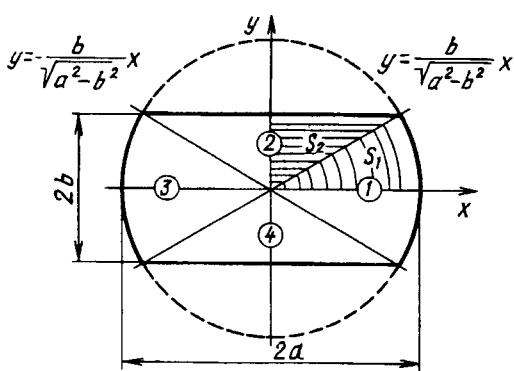


Рис. 4

$$\frac{a^2}{b^2} (b^2 - y^2) = a^2 - x^2 - y^2,$$

откуда

$$y = \pm \frac{b}{\sqrt{a^2 - b^2}} x,$$

что соответствует и рис. 4.

Условия симметрии позволяют ограничиться интегрированием лишь в первом квадранте; использовав (14) и заметив, что  $b/a = \sin \alpha_0$ ,  $\sqrt{a^2/b^2 - 1} = \operatorname{ctg} \alpha_0$  будем иметь:

$$\begin{aligned} q = 2 \cdot 4 \left( \int_{S_1} \sigma_1 dS_1 + \int_{S_2} \sigma_2 dS_2 \right) &= 8A \left( \frac{a}{b} \int_0^a d\psi \int_0^a \frac{r dr}{\sqrt{a^2 - r^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \int_0^b \frac{dy}{\sqrt{b^2 - y^2}} \int_0^a dx \right) = 8Aa \left( \frac{a}{b} \alpha_0 + \cos \alpha_0 \right); \\ U_0 &= \frac{2 \cdot 4}{4\pi\epsilon} A \left( \int_{S_1} \frac{\sigma_1 dS_1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \int_{S_2} \frac{\sigma_2 dS_2}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) = \\ &= \frac{2A}{\pi\epsilon} \left( \frac{a}{b} \int_0^a d\psi \int_0^a \frac{dr}{\sqrt{a^2 - r^2}} + \int_0^b \frac{dy}{\sqrt{b^2 - y^2}} \int_0^a \frac{dx}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) = \\ &= \frac{A}{\epsilon} \left( \frac{a}{b} \alpha_0 + A r \operatorname{sh} \operatorname{ctg} \alpha_0 \right). \end{aligned}$$

На основании (1) после простых преобразований получим:

$$C_B = 8\epsilon a \frac{\alpha_0 + 1/2 \sin 2\alpha_0}{\alpha_0 + \sin \alpha_0 \cdot \ln \operatorname{ctg} \frac{\alpha_0}{2}}. \quad (15)$$

Предельные случаи  $\alpha_0 = 0$  и  $\alpha_0 = \pi/2$  дают:  $C_B|_{\alpha_0=0} = 0$ , что отвечает физическому смыслу;  $C_B|_{\alpha_0=\pi/2} = 8\epsilon a$ , т.е. (15) приводит к точному выражению для емкости диска.

Результаты расчета верхних и нижних границ емкости рассматриваемой пластины, а также приближенные значения емкости и погрешности ее определения представлены в табл. 2, где  $C'_B$  — лучшие верхние оценки из получаемых существующими методами: на основании неравенства  $C_0 \leq \frac{4\epsilon}{\pi} L$  (при  $\alpha_0 \leq 20^\circ$ ) и с помощью метода интегральных геометрических параметров [2] ( $\alpha_0 > 20^\circ$ ), а  $\delta'$  — соответствующая им погрешность. Нижние оценки  $C_H$  вычислены по формуле, следующей из метода симметризации:

$$C_H = 8\epsilon a \sqrt{\frac{\alpha_0}{90} + \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha_0}.$$

Таблица 2

Относительные значения и погрешности определения емкости пластины, изображенной на рис. 4

$\alpha_0$ , град.	$C_{B1}'$	$C_{B1}$	$C_{H1}$	$C_{B1}' = C_{\text{ср.г1}}$	$\delta$ , %	$\delta'$ , %
10	0,64528	0,57824	0,46902	0,51793	9,4	13,7
20	0,81886	0,71128	0,65332	0,68107	4,1	10,1
30	0,88466	0,80926	0,78038	0,79456	1,8	5,9
40	0,93212	0,88333	0,87058	0,87691	0,7	3,3
50	0,96477	0,93685	0,93222	0,93453	0,2	1,7
60	0,98498	0,97196	0,97074	0,97135	0,06	0,7
70	0,99552	0,99133	0,99115	0,99124	0,009	0,2
80	0,999437	0,998884	0,998878	0,998881	0,0003	0,03

Приведенные данные показывают, что формула (15) позволяет снизить погрешность определения емкости данной пластины от полутора раз до двух порядков.

Найдем емкость пластины в форме ромба (рис. 5). Уравнение части контура в пределах

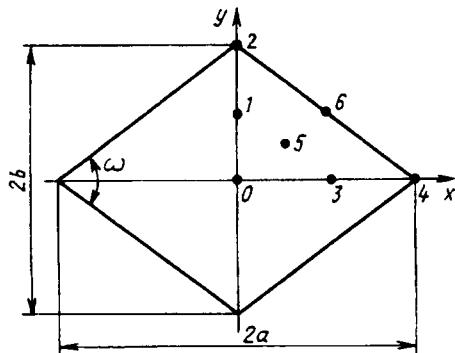


Рис. 5

первого координатного угла как уравнение прямой в отрезках имеет вид

$$x/a + y/b = 1. \quad (16)$$

Введя криволинейные координаты соотношениями

$$x = \frac{a}{c} u \cos^2 v; \quad y = \frac{b}{c} u \sin^2 v,$$

и приведя (16) к виду (3), получим:

$$c^2 - u^2 = 0,$$

откуда в соответствии с (2)

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{c^2 - u^2}}.$$

Определив якобиан  $D = \frac{ab}{c^2} u \cdot \sin 2v$ , выполним стандартные операции:

$$q = 2 \cdot 4A \frac{ab}{c^2} \int_0^c \int_0^{\pi/2} \frac{u}{\sqrt{c^2 - u^2}} \sin 2v du dv = 8 \frac{ab}{c} A;$$

$$U_0 = \frac{2 \cdot 4}{4\pi\epsilon} A \frac{ab}{c} \int_0^c \int_0^{\pi/2} \frac{du}{\sqrt{c^2 - u^2}} \frac{\sin 2v dv}{\sqrt{a^2 \cos^4 v + b^2 \sin^4 v}} = \\ = \frac{A}{\epsilon} \frac{ab}{c \sqrt{a^2 + b^2}} \ln \left( \frac{b}{a} \frac{\sqrt{a^2 + b^2} + b}{\sqrt{a^2 + b^2} - b} \right); \\ C_B = \frac{8\epsilon a \sqrt{1 + b^2/a^2}}{\ln [(1 + \sqrt{1 + a^2/b^2})(1 + \sqrt{1 + b^2/a^2})]}. \quad (17)$$

Последняя формула может быть представлена в равносильной форме (см. рис. 5):

$$C_B = \frac{8\epsilon a \cdot 2}{\text{Ar sh} \operatorname{tg} \frac{\omega}{2} + \text{Ar sh} \operatorname{ctg} \frac{\omega}{2}}.$$

При  $a/b=1$  из (17) следует полученное в [1] выражение для емкости квадратной пластины.

Границные и приближенные значения емкости, а также соответствующие погрешности приведены в табл. 3, в которой емкости пластины отнесены к емкости диска радиусом  $a$ . Верхние оценки  $C_{B1}'$  отобраны как лучшие после сопоставления данных, полученных существующими методами: на основе неравенства  $C_0 \leq \frac{4\epsilon}{\pi} L$  (при  $a/b=1$  и  $1,5$ ), по методу интегральных геометрических параметров ( $a/b=2 \div 4$ ) и по методу частей [2] ( $a/b \geq 5$ ) с использованием описанного эллипса.

Таблица 3

Относительные значения и погрешности определения емкости пластины в форме ромба

$a/b$	$C_{B1}'$	$C_{B1}$	$C_{H1}$	$C_{01} = C_{\text{ср.г1}}$	$\delta$ , %	$\delta'$ , %
1	0,90032	0,80228	0,79788	0,80008	0,27	5,7
1,5	0,76512	0,66039	0,65147	0,65590	0,68	7,4
2	0,70842	0,58084	0,56419	0,57240	1,4	10,2
3	0,61327	0,49121	0,46066	0,47545	3,1	12,4
4	0,55960	0,44009	0,39894	0,41851	4,7	14,4
5	0,52080	0,40611	0,35682	0,37988	6,1	15,7
7,5	0,46038	0,35199	0,29135	0,31881	8,6	18,4
10	0,42504	0,32439	0,25231	0,28385	11,1	20,3
20	0,35829	0,26775	0,19458	0,22537	13,7	22,8
50	0,29645	0,21625	0,15860	0,18299	13,3	23,2
100	0,26217	0,18839	0,13913	0,16006	13,1	23,5

Аналогично нижние оценки найдены с помощью метода симметризации ( $1 \leq a/b \leq 10$ ) и метода частей (по вписанному эллипсу).

Как видно из табл. 3, формула (17) обеспечивает значительное снижение погрешности расчета емкости, особенно в диапазоне сравнительно небольших значений  $a/b$ .

В заключение остановимся на одном принципиальном вопросе.

В статье [1] на примере прямоугольной пластины детальными вычислениями была подтверждена минимальность потенциала в качестве координат при выбранном согласно (2) распределении заряда; это равнозначно утверждению о том, что формулой (1) устанавливается верхняя граница емкости рассматриваемого проводника. Так как при увеличении соотношения  $a/b$  в случае прямоугольной пластины угол при вершине остается постоянным, а у пластины в форме ромба угол  $\omega$  (рис. 5) непрерывно уменьшается, то при истинном распределении заряда в последнем случае должен возрастать порядок обращения плотности в бесконечность в указанной вершине [5], что не учитывается формулой (2). Поэтому, несмотря на достаточную общность доказательства минимальности потенциала в центре пластины [1], целесообразно убедиться в сохранении этого свойства и для рассматриваемого, существенно более сложного, случая.

Не выписывая ввиду громоздкости выражение для потенциала проводника в форме ромба, аналогично как по структуре, так и по выводу формулы для потенциала прямоугольной пластины [1], приведем некоторые из полученных численных данных.

В начале координат потенциал принимает следующие значения:

$\omega$ , град	1	5	20	60	90
$a/b$	114,6	22,9	5,7	1,7	1,0
$U_0 \frac{\epsilon}{A}$	5,443242	3,868572	2,611672	1,866264	1,762747

Вычисленные безразмерные значения потенциала в характерных точках поверхности пластины (см. рис. 5) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Относительные значения потенциала пластины в форме ромба

№ точ- ки	$x_0$ $a$	$y_0$ $b$	U/U <sub>0</sub> при $\omega$ (град)				
			1	5	20	60	90
1	0	0,5	1,05935	1,08356	1,12485	1,18837	1,22265
2	0	1	1,12734	1,17924	1,26687	1,39048	1,44095
3	0,5	0	1,87483	1,80850	1,65484	1,38579	1,22265
4	1	0	1,87792	1,82790	1,73878	1,57726	1,44095
5	0,25	0,25	1,89985	1,84263	1,69254	1,38666	1,23158
6	0,5	0,5	1,94206	1,90799	1,81690	1,62342	1,51206

Как видно, основные закономерности распределения потенциала подтвердились и для рассматриваемой пластины: в начале координат потенциал — наименьший ( $U_{\min}/U_0 = 1,00000$ ) и возрастает вдоль лучей, выходящих из начала координат (точки 0-1-2, 0-3-4, 0-5-6), достигая максимальных значений на контуре независимо от соотношения размеров пластины. С ростом угла  $\omega$ , т.е. уменьшением отношения  $a/b$ , в большинстве точек потенциал снижается, но в точках 1 и 2 возрастает; в результате разность потенциалов, например в вершинах (точки 2 и 4), уменьшается и при  $\omega = 90^\circ$ , когда ромб переходит в квадрат, обращается в нуль. Указанные особенности распределения потенциала могут быть объяснены проанализированными в [1] условиями формирования потенциала пластины.

Главным же результатом здесь является подтверждение минимальности потенциала пластины в начале координат даже при  $\omega = 1^\circ$ , т.е. для одного из наиболее неблагоприятных по точности задания плотности заряда случаев среди пластин выделенного класса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Струнский М.Г. Эффективный метод расчета электрической емкости. — Электричество, 1999, № 7.
2. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергия, 1981.
3. Лебедев Н.Н., Скальская И.П. Распределение электричества на тонкой проводящей пластине, имеющей форму произвольной круговой луночки. — ЖТФ, 1986, т. 56, вып. 3.
4. Лебедев Н.Н., Скальская И.П. Распределение электричества на тонкой проводящей пластине, имеющей форму симметричной круговой луночки. — ЖТФ, 1980, т. 50, вып. 7.
5. Лебедев Н.Н., Скальская И.П. Распределение плотности электрического заряда вблизи угловой точки тонкой проводящей секториальной пластины. — ЖТФ, 1987, т. 57, вып. 11.

[05.11.97]

Автор: Струнский Михаил Григорьевич в 1951 г. окончил Ленинградский электротехнический институт и в 1958 г. физический факультет Ленинградского государственного университета. В 1963 г. в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова защитил кандидатскую диссертацию по вопросам судовой электротехники. Ведущий научный сотрудник ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.

# О свойстве четырехполюсников с повторяющимися ячейками, одинаковыми по схеме и включению

ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ Г.И.

Обосновано свойство четырехполюсников определенных структур (в принципе с неограниченным числом элементов), заключающееся в том, что при питании их импульсами с изменением напряжения по закону степенных функций выходное напряжение после окончания переходного процесса практически не зависит от значений определенной совокупности параметров. Приведены примеры их использования.

**Ключевые слова:** четырехполюсники, цепи наращивания, импульсы напряжения, мостовые цепи, уравновешивающие параметры

Группа многоэлементных двухполюсников, рассмотренных в статье [1], в принципе с неограниченным числом элементов, обладают тем свойством, что при воздействии на них одной из форм импульсов с изменением напряжения в течение их длительности по закону степенных функций электрический ток после окончания переходного процесса зависит от значений определенной совокупности параметров и со сколь угодно малой ошибкой не зависит от значений остальных параметров. Эти двухполюсники в мостовых цепях (МЦ) позволили получить такое важное свойство, как раздельное уравновешивание [2]. Число их получилось настолько большим, что отпала необходимость в построении четырехплечих МЦ с импульсным питанием, не обладающих таким свойством.

Схемы двухполюсников дают возможность раздельно уравновешивать МЦ образцовыми регулируемыми резисторами и реактивными элементами, только регулируемыми резисторами уравновешивать они не позволяют, а именно такая задача на протяжении многих десятилетий ставится перед МЦ [2–4]. Поэтому объективно существует задача в поиске электрических цепей, обеспечивающих раздельное уравновешивание МЦ регулируемыми резисторами. В настоящее время имеются частные решения этой задачи, т.е. для ограниченного (в районе двух–четырех) числа параметров в объекте контроля, измерения или исследования [2–5]. Для произвольного количества параметров задача не решена.

Для решения задачи по аналогии с [1] нужно найти двухполюсники, при воздействии на которые импульсов с изменением напряжения по закону степенных функций с каждым последующим целочисленным показателем степени в математическом описании импульса, электриче-

*A property of two-port networks of certain structures (in principle, with an unlimited number of elements) is substantiated. This property consists in that when supplying two-port networks by pulses with voltage changing according to the power function low the output voltage after determination of a transient process practically does not depend on values of certain totality of parameters.*

**Ключевые слова:** two-port networks, increasing circuits, voltage pulses, bridge circuits, balancing parameters

ский ток после окончания переходного процесса зависит от новой совокупности параметров, отличающихся от предыдущей активным сопротивлением, которое не входило ранее в предыдущие совокупности. Обнаружить двухполюсники с таким свойством не удалось. Можно предположить, что их вообще не существует. Но обратим внимание, что двухполюсники из [1] объединяются в ветвь с одиночным элементом плеча отношения будущей МЦ [2], общий вывод их образует один из выводов измерительной диагонали моста, т.е. от такого объединения получаются четырехполюсники (ЧП).

При каждом последующем показателе степени питающего импульса после окончания переходного процесса выходное напряжение их должно зависеть от совокупности параметров, в которую входит новое активное сопротивление. Таких ЧП тоже найти не удалось. Но были построены относительно сложные ЧП, в которых каждая новая совокупность параметров отличается в общем случае от предыдущей на группу из нескольких параметров, в число которых обязательно входят одно или несколько активных сопротивлений. Выбирая в качестве уравновешивающего активное сопротивление из этой группы параметров при воздействии каждой последующей формы питающих импульсов, получаем раздельное уравновешивание МЦ регулируемыми резисторами с участием последних ЧП. Мостовые цепи с таким свойством получаются путем замены в известных МЦ [2] ЧП с уравновешивающими двухполюсниками из [1] на один из ЧП с уравновешивающими активными сопротивлениями. В данной работе приводятся результаты исследований названных ЧП.

На рис. 1 изображены структуры ЧП. Из него видно, что все они явно распадаются на

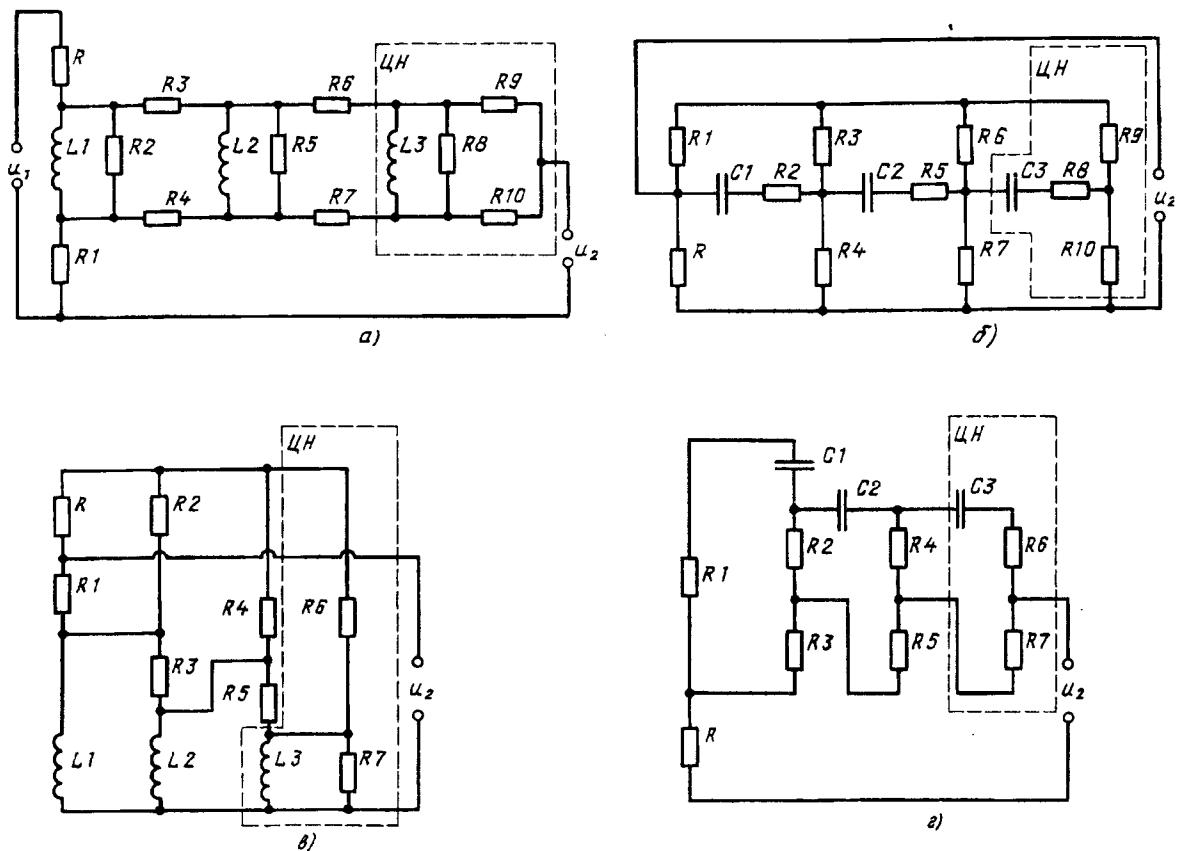


Рис. 1

повторяющиеся цепи. В каждой структуре для примера выделено пунктирными линиями по одной такой цепи. Условно для краткости будем называть их цепями наращивания (ЦН). В структурах *а* и *б* на рис. 1 ЦН содержат определенным образом включенные между собой три резистора и один реактивный элемент, а в структурах *в* и *г* — два резистора и реактивный элемент. Цепи напряжения в каждом ЧП одинаковы и определенным образом соединены между собой. Простым и очевидным выглядит включение последующей ЦН к предыдущей в резистивно емкостных ЧП. В структуре *б* они соединяются тремя выводами, а в структуре *г* — двумя (рис. 1). Менее очевидным является включение их в резистивно-индуктивных ЧП. Так в структуре *а* в разрыв между двумя последовательно включенными резисторами предыдущей ЦН включается катушка индуктивности последующей ЦН и три ее резистора, как показано на рис. 1. В структуре *в* в предыдущей ЦН делается разрыв между индуктивной катушкой и цепи из двух последовательно включенных резисторов, в разрыв включаются катушка индуктивности последующей ЦН и далее два ее резистора, как изображено на рис. 1. Выходы ЧП *а* и *г* образуют общий вывод двух последовательно соединенных резисторов последней ЦН, а в ЧП *б* и *в* —

общий вывод двух последовательно соединенных резисторов *R* и *R1* начальной части цепи (рис. 1). Число ЦН является неограниченным.

На ЧП воздействуют импульсы напряжения, форма которых описывается выражением

$$u_1 = U_1 (t/t_{ii})^h, \quad (1)$$

где *U<sub>1</sub>* — амплитуда импульса; *t<sub>ii</sub>* — его длительность; *t* — текущее время и *h* последовательно принимает значения 0, 1, 2, ... Выходное напряжение в обобщенном виде определяется известной формулой [6]:

$$u_2 = \frac{U_1 h!}{t_{ii}^h} \left[ \frac{\Psi(0)}{\psi(0)} \frac{t^h}{h!} - \frac{t^{h-1}}{(h-1)!} \sum_{i=1}^k \frac{\Psi(p_i)}{p_i^2 \psi'(p_i)} - \frac{t^{h-2}}{(h-2)!} \times \right. \\ \times \sum_{i=1}^k \frac{\Psi(p_i)}{p_i^3 \psi'(p_i)} - \dots - t \sum_{i=1}^k \frac{\Psi(p_i)}{p_i^h \psi'(p_i)} - \\ \left. - \sum_{i=1}^k \frac{\Psi(p_i)}{p_i^{h+1} \psi'(p_i)} (1 - e^{-p_i t}) \right], \quad (2)$$

где

$$\Psi(p) = D_0 + D_1 p + D_2 p^2 + \dots; \quad (3)$$

$$\psi(p) = d_0 + d_1 p + d_2 p^2 + \dots + d_k p^k; \quad (4)$$

*p<sub>i</sub>* — корни уравнения  $\psi(p)=0$ ; *k* — число этих

корней;  $d_0, d_1, d_2, \dots, D_0, D_1, D_2$  — обобщенные величины, определяющиеся параметрами элементов, входящих в ЧП.

При большом числе элементов в ЧП, особенно реактивных, получаются уравнения высоких степеней. С возрастанием степени уравнений быстро возрастает сложность их решения, а уравнения выше четвертой степени, как известно, в общем виде, в принципе, не решаются. Для обоснования свойств ЧП приближенные методы решения уравнений непригодны. В (2) первое слагаемое в квадратных скобках не зависит от корней  $p_i$ . Для получения при большом числе элементов результатов анализа в алгебраической форме по формулам (2)–(4) нужно, чтобы остальные слагаемые в (2) тоже не зависели от этих корней. Такого решения к настоящему времени нет. Но известно [7], что все слагаемые в (2), кроме первого и последнего, можно заменить на эквивалентные формулы, не содержащие корней  $p_i$ .

Для этого каждое слагаемое числителей в (2) следует разделить на соответствующий знаменатель, и в результате получаются фрагменты формулы, имеющие структуру

$$\sum_m = \sum_{i=1}^k [p_i^m / \psi'(p_i)], \quad (5)$$

где  $m$  — целые числа положительного и отрицательного знаков.

В соответствии с [7] они равны нулю или заменяются на эквивалентные формулы, содержащие только свободный член и коэффициенты уравнения, в зависимости от знака  $m$  и соотношения между значениями  $k$  и  $m$ . В результате замены фрагментов выражения (2) структуры (5) на эквивалентные формулы из [7] получим, что

$$\begin{aligned} u_2 = & (U_1 h! / t_u^h) \left\{ D_0 t^h / d_0 h! - t^{h-1} (D_0 \Sigma_2 + D_1 \Sigma_1) / (h-1)! - t^{h-2} (D_0 \Sigma_3 + D_1 \Sigma_2 + D_2 \Sigma_1) / (h-2)! - \right. \\ & - t^{h-3} (D_0 \Sigma_4 + D_1 \Sigma_3 + D_2 \Sigma_2 + D_3 \Sigma_1) / (h-3)! - \dots - \\ & - t (D_0 \Sigma_h + D_1 \Sigma_{h-1} + D_2 \Sigma_{h-2} + D_3 \Sigma_{h-1}) - \\ & - (D_0 \Sigma_{h+1} + D_1 \Sigma_h + D_2 \Sigma_{h-1} + \dots + D_h \Sigma_1) + \\ & \left. + \sum_{i=1}^k [e^{p_i t} \Psi(p_i) / p_i^{h+1} \psi'(p_i)] \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

где

$$\Sigma_m = \sum_{i=1}^k [p_i^m \psi'(p_i)]^{-1} = (-1)^m d_0^{-m} \lambda_m; \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= 1, \quad \lambda_2 = \lambda_1 \gamma_1, \quad \lambda_3 = \lambda_1 \gamma_2 + \lambda_2 \gamma_1, \quad \dots, \\ \lambda_m &= \lambda_1 \gamma_{m-1} + \lambda_2 \gamma_{m-2} + \lambda_3 \gamma_{m-3} + \dots + \lambda_{m-1} \gamma_1; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= d_1; \quad \gamma_2 = -d_0 d_2; \quad \gamma_3 = d_0^2 d_3; \dots, \\ \gamma_m &= d_0^{m-1} d_m (-1)^{m+1} \end{aligned} \quad (9)$$

и уже отброшены слагаемые, равные нулю.

В (6) от корней уравнения  $p_i$  зависит только последнее слагаемое в фигурных скобках. Это слагаемое, как и в [1], определяет ошибку

$$\Delta u_2 = (U_1 h! / t_u^h) \sum_{i=1}^k [e^{p_i t} \Psi(p_i) / p_i^{h+1} \psi'(p_i)]. \quad (10)$$

Поскольку она содержит затухающие экспоненты, то ошибка соответствующим выбором длительности питающего импульса может быть получена сколь угодно малой, так как экспоненциальная функция имеет показатель степени отрицательного знака ( $p_i$  бывают только отрицательные в пассивных электрических цепях) и относится к показательным функциям. В результате выражения (6)–(9) приемлемы для обсуждаемых ЧП (рис. 1) с любым большим количеством ЧН, не осложнены решением уравнений высоких степеней и отсутствием решений в общем виде уравнений выше четвертой степени.

В качестве частного примера обратимся к ЧП структуры  $a$  на рис. 1. Для него обобщенные величины через параметры элементов находятся из выражений:

$$\begin{aligned} D_0 &= R_1 R_3 R_5 R_8 (R_3 + R_4) (R_6 + R_7) (R_9 + R_{10}); \quad D_1 = L_1 R_5 R_8 \times \\ & \times (R_6 + R_7) (R_9 + R_{10}) [R_1 (R_3 + R_3 + R_4) + R_2 R_4] + L_2 R_1 R_2 \times \\ & \times R_8 (R_6 + R_{10}) [R_5 (R_3 + R_4 + R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_6 + R_7)] + \\ & + L_3 R_1 R_2 R_5 (R_3 + R_4) [R_8 (R_9 + R_{10}) + (R_6 + R_7) (R_8 + R_9 + R_{10})]; \\ D_2 &= L_1 L_2 R_8 (R_9 + R_{10}) [R_1 R_5 (R_3 + R_4 + R_6 + R_7) + R_1 (R_3 + \\ & + R_4) (R_6 + R_7) + R_2 (R_1 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7) + R_2 R_5 R_7] + \\ & + L_1 L_2 R_5 [R_1 (R_2 + R_3 + R_4) + R_2 R_4] [R_8 (R_9 + R_{10}) + (R_6 + \\ & + R_7) (R_8 + R_9 + R_{10})] + L_2 L_3 R_1 R_2 \left\{ R_8 (R_3 + R_4 + R_5) (R_9 + \right. \\ & \left. + R_{10}) + (R_8 + R_9 + R_{10}) [R_5 (R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + \right. \\ & \left. + R_7)] \right\}; \quad D_3 = L_1 L_2 L_3 \left[ (R_8 + R_9 + R_{10}) [R_1 R_5 (R_6 + R_7) + R_2 \times \right. \\ & \times (R_1 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)] + R_8 (R_9 + R_{10}) [R_1 (R_3 + R_4 + R_5) + \\ & + R_2 (R_1 + R_4)] + R_2 R_5 R_8 (R_9 + R_{10}) \right]; \quad d_0 = R_2 R_5 R_8 (R + R_1) (R_3 + \\ & + R_4) (R_6 + R_7) (R_9 + R_{10}); \quad d_1 = L_1 R_5 R_8 (R_6 + R_7) (R_9 + R_{10}) \times \\ & \times [(R + R_1) (R_2 + R_3 + R_4) + R_2 (R_3 + R_4)] + L_2 R_2 R_8 (R + R_1) \times \\ & \times (R_9 + R_{10}) [R_5 (R_3 + R_4 + R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_6 + R_7)] + \\ & + L_3 R_2 R_5 (R + R_1) (R_3 + R_4) [R_8 (R_9 + R_{10}) + (R_6 + R_7) (R_8 + \right. \\ & \left. + R_9 + R_{10})]; \quad d_2 = L_1 L_2 R_8 (R_9 + R_{10}) [R_5 (R + R_1 + R_2) (R_3 + \\ & + R_4 + R_6 + R_7) + (R + R_1 + R_2) (R_3 + R_4) (R_6 + R_7) + R_2 (R + \\ & + R_1) (R_5 + R_6 + R_7)] + L_1 L_3 R_5 [(R + R_1) R_1] (R_2 + R_3 + R_4) + \\ & + R_2 (R_3 + R_4)] [R_8 (R_9 + R_{10}) + (R_6 + R_7) (R_8 + R_9 + R_{10})] + \\ & + L_2 L_3 R_8 (R + R_1) \left\{ R_8 (R_3 + R_4 + R_5) (R_9 + R_{10}) + (R_8 + R_9 + \right. \\ & \left. + R_{10}) [R_5 (R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)] \right\}; \quad d_3 = L_1 \times \\ & \times L_2 L_3 (R_8 + R_9 + R_{10}) \left\{ R_5 (R + R_1 + R_2) (R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + \right. \\ & \left. + R_7) [(R + R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_2 (R + R_1)] \right\} + L_1 L_2 L_3 R_8 \times \\ & \times (R_9 + R_{10}) [R_2 R_5 + (R + R_1 + R_2) (R_3 + R_4)] + \\ & + (R + R_1) (R_2 + R_5)]. \end{aligned} \quad (11)$$

Используя выражения (6)–(9), получим, что при воз-

действии на ЧП импульса линейно изменяющегося напряжения ( $h=1$ ) выходное напряжение определяется выражением

$$u_2 = [U_1/t_n (R+R_1)^2 (R_3+R_4)] \left\{ tR_1 (R+R_1) (R_3+R_4) + L_1 (RR_4 + +R_1 R_3) + (R+R_1)^2 (R_3+R_4) \sum_{i=1}^3 [e^{p_i t} \Psi(p_i)/p_i^2 \psi'(p_i)] \right\}. \quad (12)$$

После окончания переходного процесса экспоненциальные слагаемые затухают практически до нуля, и выходное напряжение зависит от значений следующей совокупности параметров:  $L1, R, R1, R3$  и  $R4$  формул (11). Оно практически не зависит от остальных параметров цепи, несмотря на то, что на нее воздействует изменяющееся во времени напряжение.

В случае воздействия на ЧП структуры  $a$  на рис. 1 квадратичного ( $h=2$ ) импульса (1) выходное напряжение в соответствии с (6)–(9) описывается формулой

$$u_2 = \left\{ 2U_1/[t_n^2 R_2 (R+R_1)^3 (R_3+R_4)^2 (R_6+R_7)] \right\} \left\{ t^2 R_1 R_2 (R+ +R_1)^2 (R_3+R_4)^2 (R_6+R_7)/2 - tL_1 R_2 (R+R_1) (R_3+R_4) (R_6+R_7) \times \times (R_1 R_3 - RR_4) + L_1^2 (R_6+R_7) [(R+R_1) (R_2+R_3+R_4) + R_2 (R_3+R_4)] \times \times (R_1 R_3 - RR_4) + L_1 L_2 R_2 (R+R_1)^2 (R_3 R_7 - R_4 R_6) + R_2 (R+R_1)^3 \times \times (R_3+R_4)^2 (R_6+R_7) \sum_{i=1}^3 [e^{p_i t} \Psi(p_i)/p_i^2 \psi'(p_i)] \right\}, \quad (13)$$

из которой видно, что после окончания переходного процесса выходное напряжение ЧП зависит от значений новой совокупности параметров, куда входят все параметры предыдущей совокупности и добавляются  $L2, R2, R6$  и  $R7$ . Здесь и в дальнейшем примеры намеренно выбраны сравнительно простые, чтобы избежать чрезмерно громоздких математических выражений. Но они в полной мере раскрывают сущность излагаемого подхода в анализе рассматриваемых ЧП.

Выводы по ЧП (рис. 1) сделаны на основе большого числа частных решений путем обобщения, что нередко делается в цепях с повторяющимися ячейками, в однородных структурах, например, в лестничных структурах электрических цепей [8]. При воздействии на них прямоугольного ( $h=0$ ) импульса выходное напряжение во всех цепях после окончания переходного процесса зависит, очевидно, от значений сопротивлений  $R$  и  $R1$ . В случае импульсов линейно изменяющегося ( $h=1$ ) напряжения оно зависит от предыдущих параметров и добавляются в ЧП структуры  $a$  на рис. 1 параметры  $L1, L3$  и  $R4$  [совпадает с тем, что определяет формула (12)], в структуру  $b$  –  $C1, R3$  и  $R4$ , в структуру  $v$  –  $L1$  и  $R2$ , в структуру  $z$  –  $C1$  и  $R3$ . Если поступают квадратичные ( $h=2$ ) импульсы, то выходное напряжение определяется предыдущими параметрами и дополнительно к этому в ЧП структуры  $a$  –  $L2, R2, R6$  и  $R7$  [совпадает с тем, что определяет выражение (13)], в структуре  $b$  –  $C2, R2, R6$  и  $R7$ , в структуре  $v$  –  $L2, R3$  и  $R4$ , в структуре  $z$  –  $C2, R2$  и  $R5$ . Далее с возрастанием на каждую единицу показателя степени в математическом описании питающего импульса (1) совокупность

параметров, от которых зависит выходное напряжение после окончания переходного процесса, возрастает на четыре параметра в ЧП структур  $a$  и  $b$  (из последующей ЦН один реактивный параметр и два активных сопротивления и одно активное сопротивление из предыдущей ЦН) аналогично предыдущему варианту при  $h=2$ , а в ЧП структур  $v$  и  $z$  на три параметра (один реактивный параметр и одно активное сопротивление из последующей ЦН и одно активное сопротивление из предыдущей).

Реальные ЧП имеют конечное число элементов и соответственно ЦН. Начиная с некоторого, может быть, большого значения показателя степени в математическом описании питающего импульса, выходное напряжение после окончания переходного процесса зависит от значений всех параметров ЧП. Это значение равно  $\gamma+1$ , где  $\gamma$  – количество ЦН. При показателе степени, меньшем на единицу оно зависит от всех параметров, кроме одного активного сопротивления. В частности, для ЧП на рис. 1 при питающем импульсе с изменением напряжения по закону четвертой степени выходное напряжение после окончания переходного процесса зависит от значений всех параметров. А при кубическом импульсе оно не зависит только от значения активного сопротивления  $R8$  для ЧП структур  $a$  и  $b$ , от сопротивления  $R7$  в ЧП структуры  $v$  и от  $R6$  в структуре  $z$ .

Свойство рассматриваемых ЧП можно сформулировать следующим образом. При воздействии импульсов с изменением напряжения по закону степенных функций на ЧП определенных структур, в принципе, с неограниченным числом элементов выходное напряжение после окончания переходного процесса в выбранном интервале времени не зависит от значений параметров определенной совокупности элементов со сколь угодно малой заданной ошибкой, причем с возрастанием на единицу показателя степени в математическом описании питающего импульса число параметров, от которых не зависит в общем случае выходное напряжение, убывает на три или четыре единицы, среди которых один реактивный элемент и остальные – активные сопротивления.

На основе обсуждаемых ЧП изложенным в начале статьи путем можно построить труднодобаимое число вариантов МЦ с питанием импульсами сложной формы и с раздельным уравновешиванием только регулируемыми резисторами. Это объясняется неограниченным количеством элементов в объектах измерения и многообразием соединений этих элементов между собой. Получаемые мосты относят к многоплечим МЦ. Они пригодны для определения параметров двухполюсников с однородными реактивными элементами.

В качестве примера из [2] возьмем МЦ 9.5, заменим в ней резистивно индуктивную ветвь (по существу ЧП) на ЧП структуры  $a$  рис. 1 и получим в результате МЦ, изображенную на рис. 2. В ЧП (рис. 1), кроме сопротивлений  $R$  и  $R1$ , содержится произвольное количество ЦН. Число их в МЦ равно  $n-2$ , где  $n$  — количество параметров в схеме замещения объекта измерения.

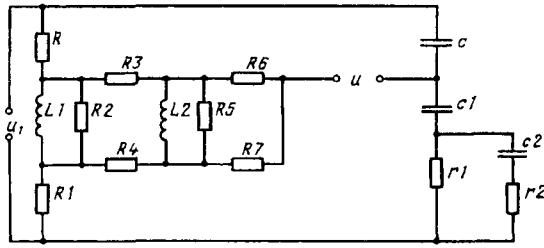


Рис. 2

При воздействии на МЦ (рис. 2) импульсов (1) выходное напряжение определяется известными обобщенными выражениями [2, 9]:

$$u = \frac{U_1 h!}{t_i h} \int_0^{t_i} \int_0^{t_i} \dots \left\{ \int_0^{t_i} \left[ \frac{A_1 B_1}{f(0)} + \sum_{i=1}^k \frac{F(p_i)}{p_i f'(p_i)} e^{p_i t_i} \right] dt \right\} \dots dt; \quad (14)$$

$$F(p) = A_1 B_1 + p(A_1 B_2 + A_2 B_3) + p^2(A_1 B_4 + A_2 B_5 + A_3 B_6) + p^3(A_1 B_7 + A_2 B_8 + A_3 B_9 + A_4 B_{10}) + p^4 B; \\ f(p) = [\psi(p)][\varphi(p)], \quad \psi(p) = d_0 + p d_1 + p^2 d_2, \\ \varphi(p) = a_0 + p a_1 + p^2 a_2.$$

$A_i=0$  представляют собой условия равновесия МЦ:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= c_1 R_1 - c R; \\ A_2 &= c_1 L_1 R_4 - c L_1 R_3 - c c_1 r_1 R(R_3 + R_4); \\ A_3 &= c_1 L_1 R_2 [L_2 R_7 + c_2 r_1 R_4 (R_6 + R_7)] - c L_1 R_2 [L_2 R_6 + c_2 r_1 R_3 \times (R_6 + R_7)] - c c_1 r_1 (R_6 + R_7) \{L_1 [R_2 R_3 + R(R_2 + R_3 + R_4)] + L_2 R R_2\}; \\ A_4 &= c_1 c_2 L_1 L_2 [R_2 R_5 R_7 (r_1 + r_2) + r_1 R_2 R_4 (R_5 + R_6 + R_7)] - c c_2 L_1 L_2 [R_2 R_5 R_6 (r_1 + r_2) + r_1 R_2 R_3 (R_5 + R_6 + R_7)] - c c_2 L_1 L_2 r_1 [R_2 R_5 R_6 + R R_5 (R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + R_7) [R_2 R_3 + R(R_2 + R_3 + R_4)]] - c c_1 c_2 r_1 r_2 R_5 (R_6 + R_7) \times \{L_1 [R_2 R_3 + R(R_2 + R_3 + R_4)] + L_2 R R_2\}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Остальные обобщенные величины для (14) находятся из формул:

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= R_2 R_5 (R_3 + R_4) (R_6 + R_7); \quad B_2 = R_5 (R_6 + R_7) [L_1 (R_2 + R_3 + R_4) + c_2 R_2 (r_1 + r_2) (R_3 + R_4)] + L_2 R_2 [R_5 (R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) \times (R_5 + R_6 + R_7)]; \quad B_3 = R_2 R_5 (R_6 + R_7); \quad B_4 = L_1 L_2 [R_5 (R_6 + R_7) + (R_2 + R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)] + c_2 (r_1 + r_2) \{L_1 R_5 (R_2 + R_3 + R_4) (R_6 + R_7) + L_2 R_2 [R_5 (R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)]\}; \\ B_5 &= R_2 [L_2 (R_5 + R_6 + R_7) + c_2 r_2 R_5 (R_6 + R_7)]; \quad B_7 = L_1 L_2 c_2 (r_1 + r_2) [R_5 (R_6 + R_7) + (R_2 + R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)]; \\ B_8 &= L_2 c_2 r_2 R_2 (R_5 + R_6 + R_7); \quad B_9 = 0; \quad B_{10} = -L_1 L_2 c c_1 c_2 r_1 r_2 \times \{R_2 R_5 R_6 + R R_5 (R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + R_7) [R_2 R_3 + R(R_2 + R_3 + R_4)]\}; \quad a_0 = c + c_1; \quad a_1 = c c_1 r_1 + c_2 (c + c_1) (r_1 + r_2); \quad a_2 = c c_1 \times c_2 r_1 r_2; \quad d_0 = R_2 R_5 (R + R_1) (R_3 + R_4) (R_6 + R_7); \quad d_1 = L_1 R_5 \times (R_6 + R_7) [R_2 (R + R_1 + R_3 + R_4) + (R + R_1) (R_3 + R_4)] + L_1 R_2 \times (R + R_1) [R_5 (R_6 + R_7) + (R_3 + R_4) (R_5 + R_6 + R_7)]; \quad d_2 = L_1 L_2 \times \{R_5 (R + R_1 + R_2) (R_6 + R_7) + (R_5 + R_6 + R_7) [R_2 (R_3 + R_4) + (R + R_1) (R_2 + R_3 + R_4)]\}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из (14) и эквивалентных формул для структуры (5) с учетом выполнения предыдущих условий равновесия вытекает, что для выполнения каждого условия равновесия следует приводить к нулю плоскую вершину импульсного напряжения неравновесия. При необходимости в качестве уравновешивающих элементов в МЦ (рис. 2) можно выбрать резисторы и индуктивные катушки: для первого уравновешивания (15) резисторы  $R$  или  $R1$  (прямоугольные питающие импульсы); для второго —  $L1, R3, R4$  (линейно изменяющиеся импульсы), при этом здесь и в дальнейшем ранее задействованные уравновешивающие элементы регулировать нельзя, так как это приведет к нарушению предыдущего условия равновесия и поэтому напряжение неравновесия не приведется к нулю (14); для третьего —  $L2, R2, R6, R7$  (квадратичные питающие импульсы) и для последнего, в данном случае четвертого, уравновешивания — всегда только один резистор, в частности  $R5$  (кубичные импульсы). В случае необходимости проводить очередное уравновешивание несколькими регулируемыми элементами допустимо выбрать требующееся их число: два, три в пределе четыре.

При уравновешивании только регулируемыми резисторами последовательность обращения к ним определяется условиями равновесия (15). Первое уравновешивание производится регулировкой резистора  $R$  или  $R1$ , или поочередной регулировкой обоих этих резисторов, второе —  $R3, R4$ , так как они не входят в предыдущее условие равновесия. Третье уравновешивание выполняется одним или несколькими резисторами из набора  $R1, R6, R7$ , параметры других элементов регулировать нельзя, потому что перестанут выполняться предыдущие условия равновесия. В четвертом условии (15) имеется только одно активное сопротивление  $R5$ , которое не входит в первые условия равновесия, его регулировкой выполняем это условие, т.е. реализуем четвертое уравновешивание. Уравновешивание — зависимое раздельное (14), (15) и соответствует положениям МЦ с импульсным питанием [2, 9]. После уравновешивания по четырем параметрам напряжение неравновесия содержит экспоненциальные всплески. Это объясняется тем, что величину  $B$  в (14), (16) нельзя привести к нулю. Но совокупность уже выполненных условий равновесия позволяет взять отсчет искомых параметров. Мостовая цепь в результате приводится к определенному состоянию, и ее можно считать квазиуравновешенной. Здесь, как и для других МЦ, для двухполюсников в объекте измерения, параметры которых однозначно не определяются, отсчет взять в общем случае не удается [10].

В качестве подтверждения малой составляющей погрешности от наличия экспоненциальных слагаемых в (6) приведем частный численный пример, подтвержденный экспериментальными результатами. В МЦ на рис. 2 для конечных значений диапазона измеряемых параметров  $c_i = 5 \cdot 10^{-9} \Phi$ ,  $r_i = 3 \cdot 10^3 \Omega$  длительности питающих импульсов  $t_i$  равны 200 мкс, а их амплитуде  $U_1 = 10$  В и частоте повторения 50 Гц соответствует значение относительной мультиплексной составляющей погрешности от экспоненциальных слагаемых равное  $14 \cdot 10^{-6}$  при уравновешивании первыми регулируемым резистором  $R1$ ,  $15,4 \cdot 10^{-6}$  — при регулировании  $R4$ ,  $17,2 \cdot 10^{-6}$  — при регулировании  $R7$  и  $19,3 \cdot 10^{-6}$  — при регулировании  $R5$ . Эти погрешности во много раз меньше других составляющих погрешности. В частности, при доверительной вероятности 0,95 ха-

рактерная для МЦ мультиплексивная составляющая погрешности подгонки отдельных элементов составляет  $1,91 \cdot 10^{-3}$ .

Использование ЧП (рис. 1) в МЦ улучшает возможность включения в один мост нескольких датчиков, измеряемым параметром которых (несущим информацию) является активное сопротивление. Это могут быть однотипные датчики, например тензодатчики, или разнотипные, например фотодатчики (фоторезисторы) термодатчики (терморезисторы) и др.

В частности, в МЦ 9,5 [2], использующую четыре вида питающих импульсов, можно включить два таких датчика. А в МЦ рис. 3, использующую те же питающие импульсы, допустимо включить четыре датчика, в качестве которых можно выбрать, например,  $r1$ ,  $r4$ ,  $r7$  и  $r5$ . Мостовая цепь на рис. 3 построена на основе двух одинаковых ЧП (рис. 1,

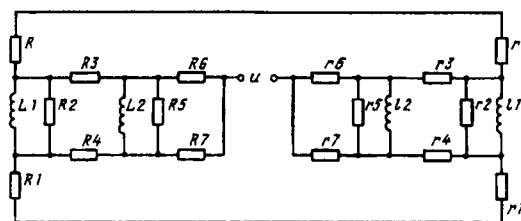


Рис. 3

структуре а). Эти ЧП соединены между собой параллельно, а выходы их образуют измерительную диагональ моста. В одном из ЧП расположены уравновешивающие элементы, а в другом — резистивные датчики. В качестве датчиков допустимо выбрать и другие относительно ранее приведенной комбинации резисторов:  $r1$ ,  $r3$ ,  $r6$  (или  $r2$ ) и  $r5$ . Напряжение неравновесия МЦ (рис. 3) описывается приведенными выше выражениями (14).

Условия равновесия, записанные для МЦ на рис. 3, подтверждают возможность включить в цепь четыре резистивных датчика и уравновешивать ее только регулируемыми резисторами. Последнее реализуется точно так же, как было описано для МЦ на рис. 2, и теми же резисторами. В общем случае число резистивных датчиков равно  $y+2$ . Мостовые цепи с резистивными датчиками содержат два одинаковых или различных ЧП, приведенных на рис. 1 структур. Имеется десять вариантов включения между собой этих структур. Число ЦН в двух ЧП таких МЦ должно быть одинаковым.

В рассмотренных ЧП определены состав и включение между собой элементов в ЦН, включение ЦН к начальной части цепи из двух резисторов и соединение между собой, определены выводы, образующие выход ЧП, найдено обобщенное математическое описание (6)–(9) ЧП, в фрагменты формул которого, кроме экспоненциальных слагаемых, не входят корни уравнения

определенены закономерность при определении совокупности параметров, от значений которых практически не зависит выходное напряжение после окончания переходного процесса при питающих импульсах с изменением напряжения по закону степенных функций. В соответствии с применением МЦ рассмотренные ЧП могут использоваться в устройствах сбора и первичной обработки информации систем автоматического управления и регулирования и информационных систем, в устройствах контроля и определения параметров многоэлементных двухполюсников и придают им положительные свойства: раздельное уравновешивание регулируемыми резисторами и при использовании одних и тех же форм питающих импульсов, возможность включения в одну МЦ большего числа резистивных датчиков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Передельский Г.И. О свойстве многоэлементных электрических цепей. — Электричество, 1989, № 2.
2. Передельский Г.И. Мостовые цепи с импульсным питанием. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Карапеев К.Б., Штамбергер Г.А. Обобщенная теория мостовых цепей переменного тока. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961.
4. Кнеллер В.Ю. Автоматическое измерение составляющих комплексного сопротивления. — М.: Энергия, 1967.
5. Пат. № 2103695 (РФ). Мостовой измеритель параметров пассивных двухполюсников / Г.И. Передельский, А.С. Романченко. Опубл. в БИ, 1998, № 3.
6. Передельский Г.И. О теории построения мостовых цепей для определения параметров четырехэлементных двухполюсников. — Измерительная техника, 1987, № 2.
7. Передельский Г.И., Нечаев И.А., Нечаева Н.В. Упрощение анализа измерительных цепей с многоэлементными двухполюсниками. — Измерительная техника, 1995, № 10.
8. Cuillemin E.A. Synthesis of passive networks. — New York: John Wiley & Sons, 1970.
9. Передельский Г.И. Раздельное уравновешивание мостовых цепей для изменения параметров многоэлементных двухполюсников. — Измерительная техника, 1984, № 6.
10. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

[29.10.98]

*Автор: Передельский Геннадий Иванович*  
*окончил в 1960 г. радиотехнический факультет Томского политехнического института. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию в Московском энергетическом институте по вопросам теории мостовых цепей в задачах измерения параметров двухполюсников. Профессор Орловского государственного технического университета.*

# Влияние переменного электрического поля на увлажнение полиэтиленовой кабельной изоляции

БЕЛОУСОВ Ф.А., КАНИСКИН В.А., САЖИН Б.И., СОЗОНОВ В.Н.

Экспериментально исследовано влияние переменного электрического поля на увлажнение полиэтиленовой кабельной изоляции. Измерения  $\operatorname{tg} \delta$  проведены методом диэлектрических потерь на частоте 1 кГц. Установлено, что переменное электрическое поле существенно ускоряет процесс сорбции воды полиэтиленовой изоляцией кабеля (более чем в 100 раз).

**Ключевые слова:** полиэтиленовая кабельная изоляция, переменное электрическое поле, сорбция воды, водные триинги, исследования

В работах [1, 2] показано, что в переменном неоднородном электрическом поле наблюдается значительный рост водных триингов (ВТ). В однородном и постоянном электрических полях рост ВТ незначителен либо отсутствует вообще. Переменное неоднородное электрическое поле ускоряет как увлажнение полиэтиленовой (ПЭ) изоляции на начальном этапе зарождения ВТ, так и скорость развития водного триинга, причем начальный этап увлажнения ПЭ изоляции исследован недостаточно и данная работа является экспериментальным исследованием в этой области. В статьях [3, 4] исследовано влияние переменного электрического поля на увлажнение кабельной ПЭ изоляции. Было установлено, что неоднородное электрическое поле с частотой 50 Гц существенно увеличивает скорость поглощения воды изоляцией. Это было обнаружено как косвенным способом — по изменению тангенса угла диэлектрических потерь энергии ( $\operatorname{tg} \delta$ ) ПЭ на отрезках кабеля, так и прямым — по увеличению массы поливинилбутиральной пленки.

В качестве образцов были использованы отрезки радиочастотного коаксиального кабеля марки РК-75-4-15 длиной 1 м со снятым внешним покровом — ПЭ оболочкой. Для измерений зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от времени использовали девять образцов, погруженных в дистиллированную воду. На внутренний проводник кабеля подавали напряжение 4, 6 и 10 кВ, внешний проводник (в виде оплетки) заземляли. После снятия высокого напряжения и кратковременного замыкания проводников с помощью прибора Р 589 на частоте 1 кГц производили измерения емкости  $C$  и  $\operatorname{tg} \delta$  у образцов. При неоднократных измерениях одного и того же образца кабеля при одинаковых условиях погрешность по емкости  $C$  составляет не более 3%, а по  $\operatorname{tg} \delta$  — 5%. При измерениях в одинаковых условиях всех

*The influence of an alternating electric field on moistening a polyethylene cable insulation is investigated experimentally. Measurements of  $\operatorname{tg} \delta$  have been carried out by the method of dielectric losses at the frequency of 1 kHz. It is established that an alternating electric field significantly accelerates the process of water sorption by a cable insulation (more than 100 times).*

**Key words:** polyethylene cable insulation, alternating electric field, water sorption, water treeing investigation

образцов максимальный разброс значений соответственно составлял: по емкости  $C$  — не более 13%, а по  $\operatorname{tg} \delta$  — 18%. Емкость образцов кабелей при экспериментах изменялась незначительно (менее 5%), поэтому об увлажнении ПЭ изоляции судили по изменению величины  $\operatorname{tg} \delta$ . Из рис. 1, а, на котором представлена зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  контрольных образцов от времени выдержки в воде,

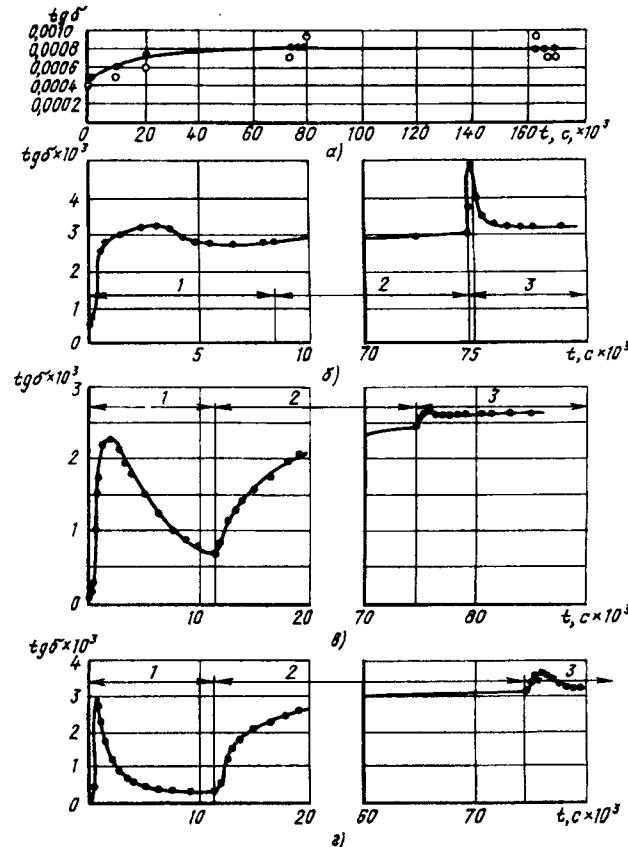


Рис. 1. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь энергии образцов кабелей в дистиллированной воде от времени: а — контрольные образцы без воздействия поля; б, в, г — воздействие переменного напряжения 4, 6 и 10 кВ соответственно. Участки зависимостей: 1 — воздействие поля; 2 — выдержка образцов без поля; 3 — повторное включение поля

видно, что без воздействия электрического поля при нахождении образцов кабелей в воде в течение  $180 \times 10^3$  с значение  $\operatorname{tg} \delta$  ПЭ практически не изменяется и составляет для различных образцов около  $(8 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ .

Иной характер процесса наблюдается при воздействии переменного электрического поля на образцы. Исходные образцы были разбиты на три группы по три образца, на которые соответственно подавали напряжение 4, 6 или 10 кВ. В зависимостях  $\operatorname{tg} \delta$  от времени на рис. 1, б, в, г можно выделить следующие участки:

1 — рост  $\operatorname{tg} \delta$  образцов под воздействием электрического поля до максимального значения с последующим снижением;

2 — увеличение  $\operatorname{tg} \delta$  после отключения электрического поля с последующим выходом на стационарный уровень;

3 — увеличение  $\operatorname{tg} \delta$  при повторном воздействии электрического поля увеличивает  $\operatorname{tg} \delta$  образцов.

Из рис. 1, б, в, г следует, что на участке 1 наблюдается максимум  $\operatorname{tg} \delta$ . Сравнительно высокое напряжение снижает энергию активации при движении молекул воды, как это наблюдается при изучении электропроводности [5] и механической прочности [6], и способствует «забросу» этих молекул в более глубокие ловушки, находясь в которых эти молекулы не принимают участия в процессе дипольной релаксации. При приложении переменного электрического поля релаксатору сообщается дополнительная энергия, достаточная для перехода через потенциальный барьер высотой  $W$ , вследствие этого увеличивается подвижность и эффективный коэффициент диффузии воды, что приводит к возрастанию  $\operatorname{tg} \delta$  (участок 1 рис. 1, б, в, г). При дальнейшем приложении напряжения возможно перераспределение концентрации релаксаторов — молекул воды между ловушками различной глубины, приводящее к увеличению числа релаксаторов, попавших в «глубокие» ловушки (ловушки с более высоким потенциальным барьером), где они «застрекают» и не принимают участия в дипольной релаксации. Если концентрация «свободных» релаксаторов не восполняется из-за дополнительной сорбции воды в ПЭ, то наблюдается снижение  $\operatorname{tg} \delta$  (участок 2, рис. 1, б, в, г).

При отключении напряжения происходит переход молекул воды из «глубоких» ловушек в более «мелкие», что одновременно с сорбцией воды в ПЭ приводит к росту  $\operatorname{tg} \delta$  (участок 2, рис. 1, б, в, г). Процессы сорбции, перераспределения молекул между ловушками различной глубины можно характеризовать величиной времени релаксации  $\tau$ :

$$\tau = \tau_0 \exp(W/KT), \quad (1)$$

где  $\tau_0 = 10^{-12}$  с;  $W$  — энергия активации;  $K$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура, К.

Если зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от времени на этапе роста  $\operatorname{tg} \delta$  на участке 1 описывается соотношением

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_H (1 - \exp(-t/\tau)), \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg} \delta_H$  — значение  $\operatorname{tg} \delta$  на стационарном уровне (участок 3, рис. 1, б, в, г), то зависимость

$$\ln(\operatorname{tg} \delta_H / (\operatorname{tg} \delta_H - \operatorname{tg} \delta)) = t/\tau \quad (3)$$

должна быть прямолинейной. Как видно из рис. 2, это в первом приближении выполняется. Рассчитанные по данным рис. 2 значения  $\tau$  приведены ниже:

Напряжение, кВ	10	6	4	
$\tau$ , мин	участок 1	372	570	738
	участок 2	4980	6660	9780

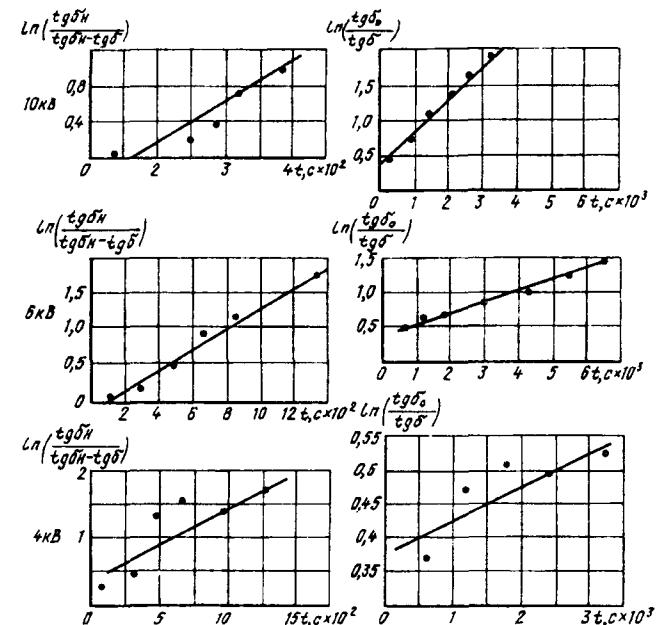


Рис. 2. Зависимость  $\ln(\operatorname{tg} \delta_H / (\operatorname{tg} \delta_H - \operatorname{tg} \delta))$  и  $\ln(\operatorname{tg} \delta_0 / \operatorname{tg} \delta)$  от времени при различных напряжениях для нахождения значения  $\tau$

Из этих данных видно, что время релаксации процесса сорбции воды уменьшается при воздействии электрического поля примерно в 13 раз, т.е. неоднородное электрическое поле соответственно увеличивает скорость сорбции, диффузию воды в ПЭ.

На этапе спада  $\operatorname{tg} \delta$  со временем значения  $\tau$  рассчитывали по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \exp(-t/\tau) \quad (4)$$

где  $\operatorname{tg} \delta_0$  находится экстраполяцией зависимости

$\operatorname{tg} \delta = f(t)$  до пересечения с осью ординат; значение  $\tau$  определялось по наклону прямолинейной зависимости  $\ln(\operatorname{tg} \delta_0 / \operatorname{tg} \delta) = f(t)$  (рис. 2).

Значения  $\operatorname{tg} \delta_0$  и времен релаксации, рассчитанные по (4):

$U, \text{ кВ}$	10	6	4
$\operatorname{tg} \delta_0$	0,038	0,034	0,029
$\tau, \text{ с}$	2520	5700	8760

Эти данные показывают, что время релаксации процесса перераспределения молекул воды между «глубокими» и «мелкими» ловушками уменьшается примерно в 3,5 раза при повышении напряжения от 4 до 10 кВ. Имея значения времен релаксации, оценим энергию активации для всех участков при различных значениях напряжений по следующему соотношению:

$$W = kT(\ln(\tau/\tau_0)). \quad (5)$$

Полученные значения энергии активации различных участков зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от времени приложения напряжения на образцы кабелей приведены в таблице.

Участок зависимости на рис. 1	Энергия активации, эВ, при приложении напряжения		
	10 кВ	6 кВ	4 кВ
1	0,84	0,85	0,86
2	0,81	0,90	0,94
3	0,90	0,91	—

Из таблицы видно, что с повышением переменного электрического поля энергия активации уменьшается и, следовательно, потенциальные барьеры релаксаторы преодолевают «легче», что ведет к более резкому возрастанию  $\operatorname{tg} \delta$  на участке 1 рис. 1, б, в, г. При воздействии неоднородного переменного электрического поля на ПЭ изоляцию кабеля значение  $\operatorname{tg} \delta$ , измеренное при частоте 1 кГц, вначале возрастает, а затем уменьшается со временем. Рост связан с сорбцией воды в ПЭ, а последующее уменьшение  $\operatorname{tg} \delta$  связано с «захватом» молекул воды в более глубокие ловушки под воздействием переменного электрического поля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Н.А., Канискин В.А., Кузнецов Д.И. и др. Водный триинг в кабельных полиэтиленовых композициях. — В кн.: Сборник статей НИИ «Севкабель». — Л.: Судостроение, 1989.
2. Канискин В.А., Кузнецов Д.И., Сажин Б.И., Середа Г.Г. Влияние частоты электрического поля и концентрации электролитов на скорость роста водного триинга в полимерных композициях. — Тезисы докладов на расширенное заседание научного Совета АН СССР «Электрофизические свойства диэлектриков при воздействии электромагнитных и акустических полей», 4–6 декабря 1991 г. Иванов.
3. Канискин В.А. Влияние электрического поля на процесс увлажнения электрической изоляции. — Электричество, 1991, № 10.
4. Белоусов Ф.А., Вердина Я.В., Канискин В.А. Влияние электрического поля на процесс увлажнения кабельной полиэтиленовой изоляции. — Изд-во СПГТУ, 1995.
5. Электрические свойства полимеров / Под ред. Б.И. Сажина. — Л.: Химия, 1986.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974.

[25.07.97]

*Авторы: Белоусов Федор Анатольевич окончил в 1996 г. Санкт-Петербургский государственный технический университет (СПГТУ), электромеханический факультет (ЭМФ) по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника». С 1996 г. аспирант СПГТУ.*

*Канискин Владимир Александрович окончил в 1961 г. ЭМФ Ленинградского политехнического института (ЛПИ). В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию в ЛПИ по теме «Электрические свойства напыленной полимерной изоляции». Доцент СПГТУ.*

*Сажин Борис Иванович окончил 1953 г. радиофизический факультет ЛПИ. В 1971 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Прохождение постоянного электрического тока через полимерные диэлектрики» в Институте высокомолекулярных соединений АН СССР. Профессор СПГТУ.*

*Созонов Владимир Николаевич окончил в 1997 г. ЭМФ СПГТУ, по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника», аспирант СПГТУ.*

#### 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.

# Фазовая погрешность измерительных трансформаторных преобразователей

ЕРМУРАТСКИЙ П.В.

Проведен анализ систематических фазовых погрешностей воздушных трансформаторов, применяемых в измерительных цепях для формирования напряжения, сдвинутого по фазе относительно тока на  $\pi/2$ . Источниками погрешностей являются сопротивления обмоток, распределенные межвитковые и межобмоточные емкости, конечное значение сопротивления нагрузки. Обсуждены способы снижения и учета этих погрешностей, их влияние на последовательное активное сопротивление в схеме замещения измеряемого двухполюсника.

**Ключевые слова:** трансформаторы, измерения, погрешности, сдвиг фаз, распределенные емкости

При измерении активных и реактивных компонент синусоидальных напряжений с помощью векторных вольтметров, компенсаторов переменного тока, а также для измерения параметров схем замещения пассивных двухполюсников часто требуется получить напряжение, сдвинутое по фазе  $90^\circ$  относительно тока или другого напряжения [1, 2, 3]. Такую возможность дает, например, воздушный трансформатор, напряжение на вторичной обмотки которого в режиме холостого хода сдвинуто относительно тока в первичной обмотке на  $\pi/2$ . Целью настоящей статьи является расчет систематической погрешности  $\delta = \pi/2 - \varphi$ , обусловленной паразитными распределенными емкостями, сопротивлениями обмоток и током нагрузки. Знание и учет этой погрешности существенно повышает точность измерений и расширяет область применения трансформаторного преобразователя.

Точный учет влияния распределительных параметров трансформатора может быть осуществлен путем расчета электромагнитного поля по уравнениям Максвелла. Однако сложность задания граничных условий, определяемых конструкцией трансформатора и прежде всего конфигурацией обмоток и их взаимным расположением, позволяет получить решение лишь для довольно простых случаев, например, для кольцевых токов. Поэтому здесь принимается, что распределенные сопротивления обмоток и их емкости заменяются эквивалентными сосредоточенными, значения которых определяются экспериментально путем прямых или косвенных измерений.

Расчетная схема замещения трансформатора изображена на рис. 1. Здесь  $R_1$  и  $R_2$  — активные

An analysis of systematic phase errors of air transformers used in measuring circuits for shaping voltage dephased with respect to current at  $\pi/2$  is carried out. Sources of errors are winding resistances, distributed interturn and interwinding capacitances and the finite value of a load resistance. Ways and methods for reducing and taking into account these errors and their influence on a series resistance in an equivalent circuit of a two-terminal, which is measured, are discussed.

**Key words:** transformers, measuring, errors, phase displacement, distributed capacitance

сопротивления обмоток;  $C_1$  и  $C_2$  — межвитковые емкости обмоток, включающие также емкость монтажа;  $C_{12}$  — межобмоточная емкость;  $L_1$ ,  $L_2$  — индуктивности обмоток;  $M$  — взаимная индуктивность.

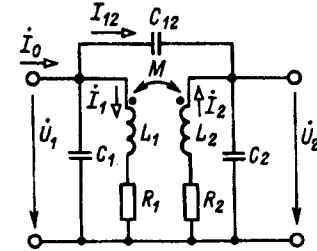


Рис. 1. Расчетная схема замещения измерительного трансформаторного преобразователя

Система уравнений для режима холостого хода

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 (R_1 + jX_1) - j\omega M I_2; \\ U_2 &= I_1 j\omega M - I_2 (R_2 + jX_2) = (I_2 + I_{12}) / (j\omega C_2); \\ I_0 &= I_1 + I_{12} + j\omega C_1 U_1; \\ I_{12} &= (U_1 - U_2) j\omega C_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Точное решение этой системы относительно напряжения  $U_2$ :

$$\begin{aligned} U_2 &= I_0 Z_{21}; \\ Z_{21} &= R_{21} + jX_{21} = j\omega M (1 + dC_{12}/M) / [1 + 2\omega^2 MC_{12} + \\ &+ j\omega (C_1 + C_{12}) (R_1 + jX_1) + j\omega (C_2 + C_{12}) (R_2 + jX_2) - \\ &- d\omega^2 (C_1 + C_{12}) (C_2 + C_{12}) + d\omega^2 C_{12}^2], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$d = (R_1 + jX_1) (R_2 + jX_2) + (j\omega M)^2.$$

№ трансформатора	M, мГн	L <sub>1</sub> , L <sub>2</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , Ом	C <sub>1</sub> , C <sub>2</sub> , пФ	C <sub>12</sub> × 3, пФ	T, нс	ω × 10 <sup>-5</sup>	R <sub>21</sub> , мОм	X <sub>21</sub> , Ом	Значение δ × 10 <sup>3</sup>	
										точное	приближенное
1	12,35	12,41 12,76	6,78 7,03	2550 2557	13000	34,2	292 29,2 1,0 2,92	3,61 394 2280 -5540	36,09 381,7 3436 -862	0,100033 1,0318 6,634 6,42	0,1 1,0 3,42 10,0
2	6,25	6,55 6,25	4,53 4,46	1000 1050	12000	8,39	0,119 1,19 2,0	7,47 1047 7280	74,65 916 2620	0,100125 1,143 2,77	0,1 1,0 1,67
3	1,64	1,65 1,80	2,43 2,64	280 285	5330	2,28	0,4384 4,384 7,00	7,235 1555 110000	72,5 1110 10800	0,100276 1,395 10,14	0,1 1,0 1,6
4	0,47	0,496 0,520	1,26 1,33	90 87	1930	0,095	6,28 10,4 20,0	19,3 62,6 495	30,6 544 1450	0,0631 0,115 0,341	0,060031 0,1 0,191
5	0,075	0,085 0,122	2,13 2,26	40 45	550	-0,212	4,50 6,28 9,00 36	-3,395 -6,65 -13,8 -318	33,8 47,26 67,9 299	-0,1004 -0,14068 -0,2033 -1,063	-0,1 -0,1396 -0,2 -0,8

Отсюда фазовая погрешность трансформаторного преобразователя

$$\delta = \operatorname{arctg} [\operatorname{Re}(\underline{Z}_{21}) / \operatorname{Im}(\underline{Z}_{21})] = \operatorname{arctg}(R_{21}/X_{21}). \quad (3)$$

Учитывая малость C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> и C<sub>12</sub> а также пренебрегая в (2) слагаемыми второго порядка малости, можно получить в первом приближении:

$$X_{21} = \omega M; \quad R_{21} = \omega^2 M \left\{ R_1 C_1 + R_2 C_2 + C_{12} [R_1 + R_2 - (R_1 L_2 + R_2 L_1)/M] \right\}; \quad (4)$$

$$\delta = \operatorname{tg} \delta = R_{21}/X_{21} = \omega \left\{ R_1 C_1 + R_2 C_2 + C_{12} [R_1 + R_2 - (R_1 L_2 + R_2 L_1)/M] \right\}. \quad (5)$$

Интересно отметить два момента: во-первых, даже в режиме холостого хода активное сопротивление вторичной обмотки влияет на фазовую погрешность так же, как и сопротивление первичной; во-вторых, третье слагаемое отрицательно и пропорционально произведению межобмоточной емкости и индуктивности рассеяния обмоток, так что с увеличением коэффициента связи один из сомножителей — емкость C<sub>12</sub> — увеличивается, а второй — уменьшается, т.е. вклад этого слагаемого в фазовую погрешность слабо зависит от конструкции трансформатора. Это слагаемое можно выразить через коэффициент связи между обмотками  $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ . Оно равно  $C_{12}(R_1 + R_2)(1 - k)/k$ . Если принять, что C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub>, то (3) и (4) можно упростить:

$$R_{21} = \omega^2 M (R_1 + R_2) [C_1 + C_2 - C_{12} (1 - k)/k] = \omega M T; \quad (6)$$

$$\delta = \operatorname{tg} \delta = R_{21}/X_{21} = \omega (R_1 + R_2) \times [C_1 + C_2 - C_{12} (1 - k)/k] = \omega T. \quad (7)$$

Для ряда опытных образцов торOIDальных трансформаторов с бифилярной намоткой обмоток в таблице приведены значения параметров их схем замещения, параметров R<sub>21</sub>, X<sub>21</sub> и T, точное (3) и приближенное (7) значения фазовых погрешностей δ и частоты ω. Из табличных данных видно, что на низких частотах фазовая погрешность весьма мала: для трансформатора № 1 на частоте 50 Гц она составляет всего 10<sup>-5</sup> рад. Точные и приближенные значения систематических фазовых погрешностей хорошо совпадают до частоты  $\omega = 0,01/T$ .

Влияние сопротивления нагрузки вторичной обмотки трансформатора можно проанализировать, применив принцип эквивалентного генератора. Рассмотрим измерительную цепь из [2], изображенную на рис. 2. Первичная обмотка трансформатора подключена к генератору тока I<sub>0</sub> и измеряемому конденсатору C с параметрами последовательной схемы замещения R<sub>s</sub> и C<sub>s</sub>. Нагрузка — входное сопротивление вольтметра — подключена ко вторичной обмотке и конденсатору. Изменением M, L или частоты f добиваются совпадения по фазе тока I<sub>0</sub> и напряжения на входе вольтметра U<sub>v</sub>. При этом реактивная составляющая напряжения на кон-

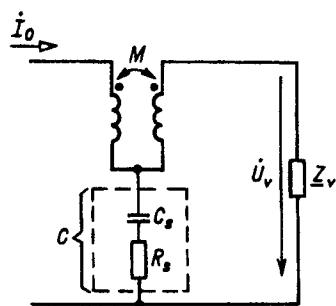


Рис. 2. Схема измерения параметра конденсатора с помощью измерительного трансформаторного преобразователя

денсаторе  $\dot{U}_{cs} = \dot{I}_0 / (j\omega C_s)$  становится равна и противоположна по фазе напряжению на вторичной обмотке трансформатора  $\dot{U}_2 = \dot{I}_0 / (j\omega M)$ . Тогда сопротивление  $R_s = U_v / I_0$ , а емкость  $C_s = I_0 / (\omega U_2)$ .

Параметры эквивалентного генератора:

$$\dot{E} = \dot{U}_{2x} + \dot{I}_0 (R_s + 1) / (j\omega C_s); \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{bx} = (R_2 + jX_2) + R_s - j/\omega C_s; \quad (9)$$

напряжение на входе вольтметра

$$\dot{U}_v = \dot{E} \underline{Z}_v / (\underline{Z}_{bx} + \underline{Z}_v). \quad (10)$$

Для рассмотренной схемы включения измерительного трансформаторного преобразователя  $\underline{Z}_{bx} \ll \underline{Z}_v$  и  $U_v = \dot{E}$ , т.е. практически вся фазовая погрешность связана с паразитными емкостями обмоток (5).

В качестве примера подтверждения полученных результатов рассмотрим тороидальный воздушный трансформатор с измеренными с помощью моста переменного тока на частоте 1 кГц параметрами:  $L_1 = 12,41$  мГн,  $L_2 = 12,76$  мГн,  $M = 12,35$  мГн,  $R_1 = 6,78$  Ом,  $R_2 = 7,03$  Ом,  $C_{12} = 12,92$  нФ,  $C_1 = C_2 = 2,55$  нФ. На частоте  $f = 500$  Гц из расчета по (4) имеем значения:  $R_{21} = 3,8$  мОм,  $X_{21} = 38,78$  Ом и  $U_v = 3,8$  мВ. Путем измерения по схеме рис. 2 пленочного бескорпусного конденсатора с полипропиленовым диэлектриком емкостью 8,2 мкФ при токе  $I_0 = 1$  А получено значение  $U_v = 7,5$  мВ, что соответствует  $R_s = 7,5$  мОм. Независимое измерение этого же сопротивления калориметрическим методом дало 5 мОм. Отсюда следует, что доля  $R_s$ , обусловленная фазовой погрешностью трансформаторного преобразователя, составляет 2,5 мОм, что согласуется с расчетами, приведенными в настоящей статье.

**Выводы.** 1. Распределенные паразитные емкости измерительных воздушных трансформаторных преобразователей вносят фазовые погрешности, соизмеримые с углом потерь высокодобротных конденсаторов, поэтому их оценка и учет необходимы при проведении измерений параметров таких конденсаторов.

2. У трансформаторов с высоким коэффициентом связи между обмотками, например при бифилярной их намотке, основную долю в фазовую погрешность вносят межвитковые емкости, тогда как при уменьшении индуктивной связи возрастает влияние межобмоточных емкостей, при этом фазовая погрешность может стать отрицательной. Можно сформулировать задачу оптимального по минимуму фазовой погрешности проектирования конструкции трансформатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байда Л.И., Добротворский Н.С., Душин Н.М. и др. Электрические измерения. Л.: Энергия, 1980.

2. А.с. № 1651234 (СССР). Устройство для измерения активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления / В.В. Ермуратский, П.В. Ермуратский. Опубл. в БИ, 1991, № 19.

3. А.с. № 1018045 (СССР). Устройство для измерения активной составляющей комплексного сопротивления / В.П. Берзан, В.В. Ермуратский, П.В. Ермуратский и др. Опубл. в БИ, 1983, № 31.

[28.02.97]

*Автор: Ермуратский Петр Васильевич* окончил в 1962 г. факультет автоматики и вычислительной техники Московского энергетического института (МЭИ). В 1997 г. в МЭИ защитил докторскую диссертацию по теме «Вероятностно-детерминированное моделирование электротехнических материалов и устройств». Заведующий кафедрой электротехники, электроники и микропроцессорной техники Московской государственной академии тонкой химической технологии.

### 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.

# Динамическая модель электромагнитного измерительного трансформатора с учетом гистерезиса и некоторые прикладные следствия

СОКОЛИК Л.И.

Для устранения влияния погрешности ТТ на устройства защиты и автоматики применялись различные методы. Настоящая статья дает ключ для поворота направления — от генерации ошибок к полной их коррекции. Действительно, имеется детерминированная зависимость  $i_2(i_1)$ . Но если физически невозможно подать во вторичную обмотку ТТ искаженный вторичный ток и получить в первичной обмотке истинное значение первичного тока, то возможно реализовать обратную зависимость  $i_2(i_1)$  посредством цифрового (или аналогового) моделирования.

Ключевые слова: коррекция погрешности трансформатора тока, измерение постоянного тока и напряжения

Благодаря простоте и надежности электромагнитные измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) традиционно являются единственными источниками информации о токах и напряжениях в элементах энергосистем для устройств релейной защиты и электроавтоматики в установившихся и переходных режимах. Однако ТТ в установившемся и, особенно, в переходном режимах короткого замыкания (КЗ) имеют известные значительные погрешности, которые с ростом мощности энергосистем и токов КЗ стали серьезной помехой успешному функционированию релейной защиты и фиксирующих приборов.

С помощью математического моделирования возможно не только определить величину и причину погрешности ТТ, но и уменьшить или устраниить ее. Математической основой этого подхода служит известное формальное описание ТТ:

$$\left. \begin{array}{l} i_1 w_1 - i_2 w_2 = Hl; \\ w_2 s dB/dt = L di_2/dt + Ri_2; \\ H = f(B), \end{array} \right\} \quad (1)$$

где  $i_1, i_2$  — первичный и вторичный токи;  $w_1, w_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток;  $L, R$  — индуктивность и активное сопротивление вторичной цепи;  $l, s$  — длина средней силовой линии и площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника;  $B, H$  — магнитная индукция и напряженность магнитного поля в сердечнике;  $t$  — реальное время.

Функция  $H(B)$  описывает среднюю линию

*In order to eliminate the influence of the instrumental error of a current transformer on the automatic and protection equipment various methods are used. This paper gives a key to change the direction: from generation of errors to their total correction. Indeed, there is a determinate function  $i_2(i_1)$ . While it is practically impossible to supply a distorted secondary current to the secondary winding of the current transformer so as to obtain the true value of the primary current in the primary winding, one can implement the inverse function  $i_2(i_1)$  by means of digital or analog modelling.*

Ключевые слова: current transformer, error, correction, direct current, d.c. voltage, measurement

симметричной предельной петли гистерезиса. Ее можно аппроксимировать полиномом нечетных степеней с разбивкой на участки или без этого, или функцией гиперболического синуса от магнитной индукции. Оба представления близки, так как при компьютерном расчете гиперболический синус вычисляется как ряд нечетных степеней.

Цифровое моделирование по (1) требует решения дифференциального и алгебраического уравнений. Последнее характеризуется известными значительными трудностями, которые можно преодолеть с помощью эффективного метода секущих (хорд), известного также как метод Вегстейна [1]. Однако при этом очень заметно усложняется и увеличивается моделирующая программа. Значительного упрощения программной реализации цифровой модели ТТ и приближения ее к реальности можно достичь путем учета гистерезиса в сердечнике.

Известно [2], что

$$F(B, dB/dt, d^2B/dt^2, \dots, H, dH/dt \dots) = 0. \quad (2)$$

На кафедре электрических станций Белорусского политехнического института была предложена более простая приблизительная формула:

$$dB/dt = c(H - f(B)), \quad (3)$$

где  $f(B)$  — та же функция, что и в (1);  $c$  — константа аппроксимации, учитывающая жесткость ферромагнитного сердечника (коэрцитивность) и потери в нем.

Заменив в (1) последнее уравнение на (3)

и проделав очевидные преобразования, получим

$$\left. \begin{aligned} dB/dt &= c (i_1 w_1 / L - i_2 w_2 / L - f(B)) \\ di_2 / dt &= (w_2 s dB / dt) / L - R i_2 / L \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Теперь численное решение этих двух дифференциальных уравнений, разрешенных относительно производных, не вызывает затруднений. Соответствующая программа проста и коротка, о чем свидетельствует листинг на рис. 1.

```
REAL I1,I1M,I2M,I2,L,I1J
DATA W1,W2,S,CL,L,R/2.,80.,00023.,238.,001,1.0/
*      C1,C2,C3/1.76,119.9,3.01/
*      T,I2,B,H,M,K,J/0.,0.,0.,00001,5000,59,60/
*      G,TA,I1M,I2M/1.57,.01,1000.,-1000./
DO 100 I=1,M
I1=I1M*SIN(314.159*T+G)+I2M*EXP(-T/TA)
H1=I1*W1/CL-12*W2/CL
IF(I1.NE.0)P=100*I1J/I1
IE(I1.NE.0)P2=100*(I2*W2/W1)/I1
K=K+1
IF (K.NE.J)GO TO 10
T1J=I1J/(W2/W1)
T1I=I1J/(W2/W1)
WRITE(3,1)T,I1,I1J,P,I2,P2,T1I,,T1J
1 FORMAT(1X,F7.5,,2F11.3,2X,F6.2,F9.3,2X,F6.2,2F9.4)
K=0
10 FB=C2*SINH(C3*B)
F1=C1*(H1-FB)
F2=F1*W2*S/L-I2*R/L
B=B+F1*H
I2=I2+F2*H
T=T+H
CALL FENIX(I,H,I2,I1J,BJ)
100 CONTINUE
STOP
END
```

Рис. 1. Программа, моделирующая ТТ

В этой программе применен как самостоятельный метод Эйлера (прямоугольников), являющийся непременным компонентом более сложных методов. Погрешность метода Эйлера удовлетворительно невелика при достаточно и не слишком малом шаге интегрирования. Различные варианты исправлений этого метода [1], например метод трапеций второго порядка Рунге—Кутта, и методы более высоких порядков также могут быть использованы. Тогда появляется возможность контролировать погрешность в ходе решения и менять шаг интегрирования по условию ограничения погрешности, сравнивая результаты вычислений на каждом шаге по Эйлеру и конечный. Результат расчета по программе, моделирующей ТТ, представлен кривой 1 на рис. 2. Первичный ток — кривая 2 задан синусоидальной и апериодической составляющих. Токи

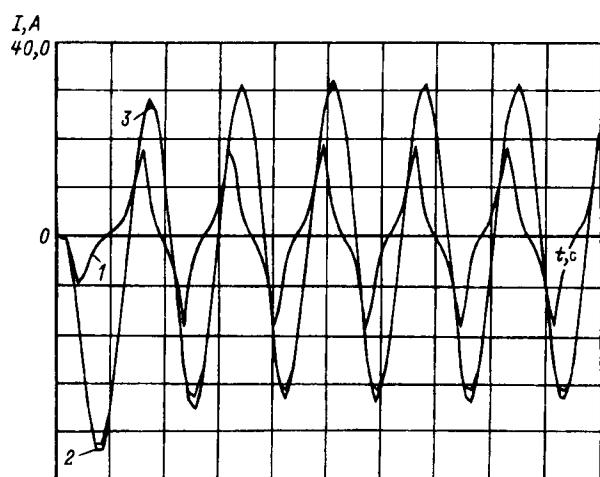


Рис. 2. Кривые токов, полученные в результате «математического эксперимента

приведены к вторичной цепи. Вид заданного первичного тока обычен при переходном процессе КЗ в цепях электрических систем. Вид вторичного тока, искаженного погрешностью, весьма характерен, причем значения мгновенной погрешности превосходят 90%.

Для уменьшения погрешности ТТ и ее влияния на измерительные защитные и автоматические устройства применяется ряд приемов, способов и методов. Например, в связи с довольно широким внедрением микропроцессорных устройств, используются методы цифровой фильтрации, позволяющие сгладить кривую вторичного тока. Однако только описанные адекватные модели ТТ открывают путь к полной коррекции погрешностей. Действительно в математическом описании ТТ содержится (и физически существует) детерминированная зависимость  $i_2(i_1)$ , к которой, несомненно, имеется и обратная зависимость  $i_1(i_2)$ . Физически реализовать обратную зависимость если и возможно, то нерационально. Математическая реализация осуществима как одновременно с процессом трансформации ТТ в реальном времени, так и с запоминанием массива мгновенных значений вторичного тока и последующей обработкой. Листинг программы, реализующей зависимость  $i_1(i_2)$ , т.е. восстанавливающей первоначальный истинный первичный ток, представлен на рис. 3, а результат ее работы — на рис. 2, кривая 3.

В «математическом эксперименте» обе программы: моделирующая (рис. 1) и корректирующая (рис. 3) использовались совместно, что видно из их тестов. В те моменты, когда погрешность превышает 90%, точность коррекции более 98%, причем кривая 3 (рис. 2) «восстановленного» первичного тока практически совпадает с первоначально заданным первичным то-

```

SUBROUTINE FENIX(I,H,12,I1,B)
REAL I1,I2,L,M,M1,M2,N
IF(I.GT.1)GO TO 1
DATA W1,W2,S,CL,L,R/2.,80.,00023.,238.,001,1.0/
*      C1,C2,C3,BO,Y0/1.76,119.9,3.01.,0.,0/
BC=CL/W1
M=1/(W2*S)
M1=M*R
M2=M*L
N=W2/W1
1  Y0=Y0+M1*I2*H
B=Y0+M2*I2
H1=C2*SINH(C3*B)
I1=H1*BC+I2*N
RETURN
END

```

Рис. 3. Корректирующая программа, реализующая зависимость  $i_1$  ( $i_2$ )

ком. Действие программы коррекции можно уподобить некоему фильтру, но коррекция гораздо эффективнее цифровой фильтрации и нисколько ей не противоречит.

Сущностью алгоритма коррекции является отслеживание индукции в сердечнике, а знание индукции всегда было основой для измерения постоянного тока схемами как с датчиком Холла, так и с магнитным усилителем. Поэтому несколько неожиданно оказалось, что программа коррекции позволяет с помощью обычного электромагнитного ТТ измерять большой постоянный ток, а распространив эту идею на ТН — и высокое постоянное напряжение. В «математическом эксперименте» точность замера постоянного тока составляла через 0,01 с от включения толчком 99,42%, через 0,02 с — 98,78%, 0,04 с — 98,24%, 0,15 с — 96,86%. В корректирующей программе использовался метод интегрирования Адамса—Башфорта.

Методы цифрового моделирования стали преобладающими, однако алгоритмы весьма наглядны в терминах аналоговых решающих блоков. На рис. 4 представлен подобный алгоритм измерения постоянного напряжения с помощью обычного электромагнитного ТН [4]. Здесь алгоритмизованы следующие уравнения математического описания:

$$dB/dt = (u_2 + i_2 R_2 + L_2 di_2/dt)/w_2 s;$$

$$B = (\int u_2 dt + R_2 \int i_2 dt + L_2 i_2)/w_2 s;$$

$$H = (1/c) dB/dt + f(B);$$

$$i_1 = Hl/w_1 + i_2 w_2/w_1;$$

$$u_2 = i_1 R_1 + L_1 di_1/dt + w_1 s dB/dt,$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  — активные сопротивления цепей

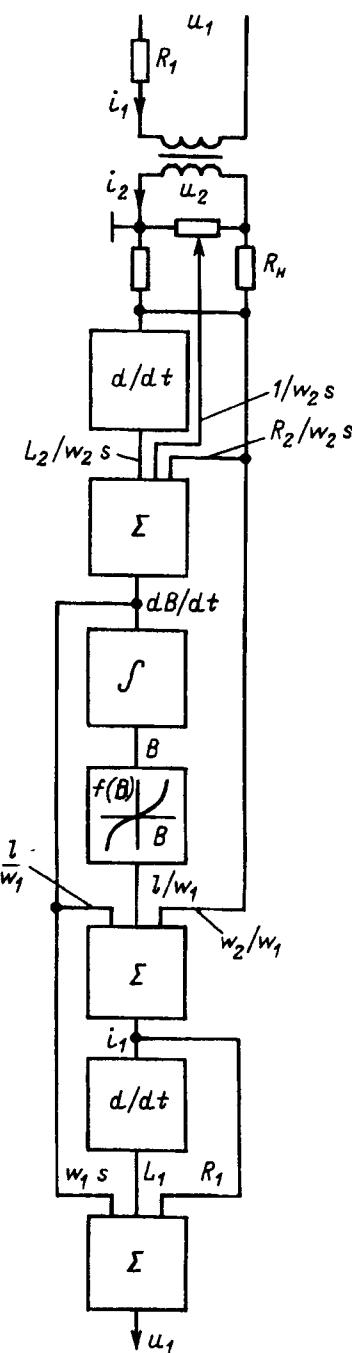


Рис. 4. Алгоритм в терминах аналоговых решающих блоков для измерения высокого постоянного напряжения с помощью обычного электромагнитного ТН

первичной и вторичной обмоток;  $L_1$ ,  $L_2$  — индуктивности цепей первичной и вторичной обмоток, включающие индуктивности рассеяния обмоток.

Остальные обозначения ясны из предыдущего изложения и рис. 4, на котором вводам суммирующих блоков приписаны соответствующие масштабные коэффициенты. Варьируя этот общий алгоритм, можно получить частные алгоритмы для решения следующих прикладных за-

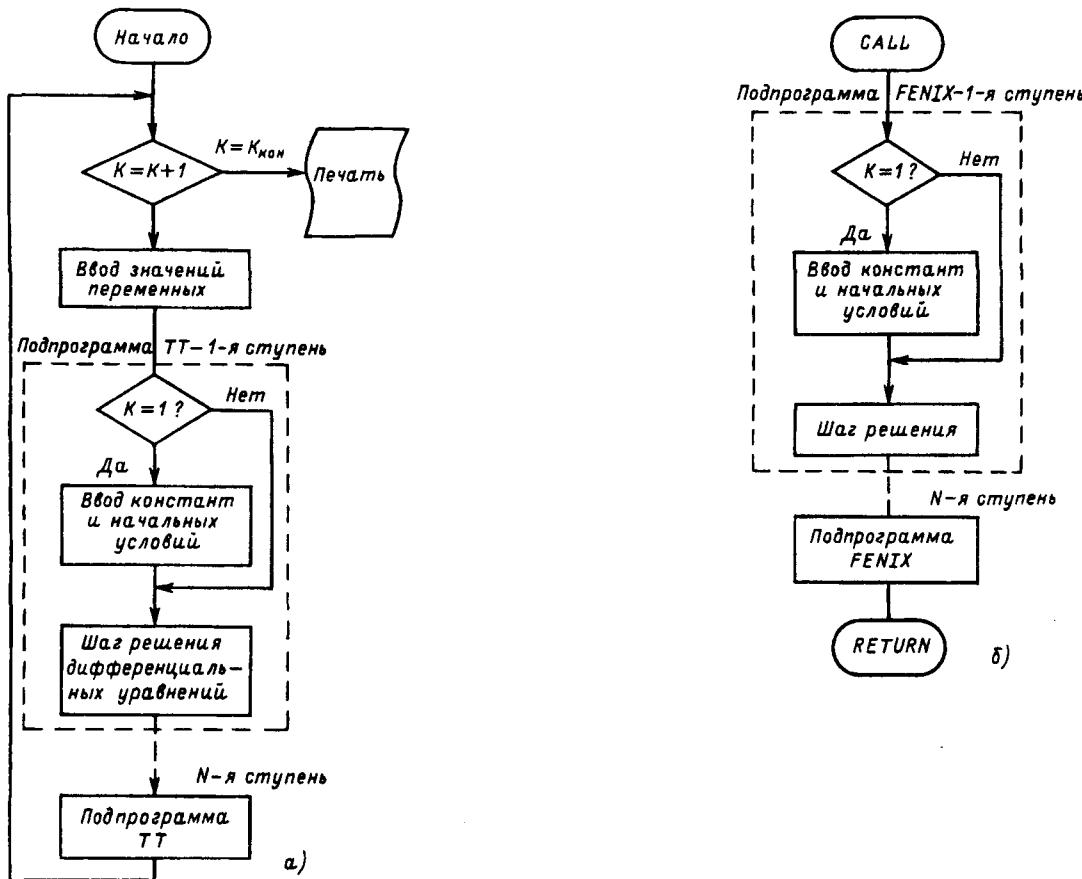


Рис. 5. Алгоритм программы моделирования каскадного ТТ с учетом гистерезиса (а) и алгоритм программы коррекции его (б)

дач: измерение погрешности ТТ, измерение остаточной индукции в сердечнике, получение гистерезисных петель для построения реальной зависимости  $H(B)$  и другие. Практической целью этих построений может быть диагностика состояния измерительного трансформатора и получение необходимых для моделирования и коррекции параметров и магнитной характеристики. Алгоритм цифровой динамической модели каскадного ТТ представлен на рис. 5,а, а на рис. 5,б — соответствующий корректирующий алгоритм.

В заключение следует отметить, что как коррекция погрешности ТТ, так и другие из упомянутых приложений могут быть уже сегодня эффективно использованы в современных компьютерных (микропроцессорных) измерительных и защитных устройствах и системах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАН. — М.: Мир, 1977.
2. Поливанов К.М. Ферромагнетики. Основы теории технического применения. — М.: Госэнергоиздат, 1957.
3. Соколик Л.И. Математическая модель трансформатора тока с учетом гистерезиса. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1982, № 9.
4. А.с. № 1339681 (СССР). Устройство для коррекции погрешности одноступенчатого измерительного трансформатора / Л.И. Соколик. — Опубл. в БИ, 1987.

[30.10.97]

*Автор: Соколик Леонид Иосифович окончил энергетический факультет Белорусского политехнического института (БПИ) в 1960 г. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Дифференциально-фазная защита сопротивленных элементов электрических систем» в БПИ. Главный инспектор концерна «Белэнерго», Белоруссия.*

## Молниезащита. Часть III\*

ЛАРИОНОВ В.П.

**Молниезащита зданий и промышленных сооружений.** Молниезащита промышленных сооружений, общественных и жилых зданий осуществляется в соответствии со строительными нормами (см. «Электричество», № 4, 1999, [6]). В зависимости от степени опасности поражения молнией и выбора необходимых средств защиты все здания и сооружения классифицируются по трем категориям.

К I категории относятся здания и сооружения, в которых хранятся и перерабатываются в открытом виде взрывчатые вещества или внутри которых длительно сохраняются или систематически возникают смеси газов, паров или пыли горючих веществ с воздухом или другими окислителями, способные взорваться от электрической искры.

Защита таких объектов от молний осуществляется отдельно стоящими молниеотводами. Могут также использоваться молниеотводы, устанавливаемые на здании, но изолированно от него (рис. 23). В этом случае должны быть обеспечены необходимые изоляционные расстояния между молниеотводом и зданием по воздуху, в земле и по изолирующей опоре молниеотвода, которые определяются на основании расчета потенциалов в соответствующих точках молниеотвода, возникающих при ударе в него

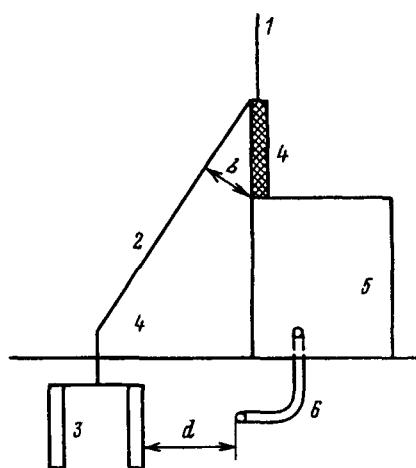


Рис. 23. Изолированный от сооружения молниеотвод: 1 — молниеприемник; 2 — токоотвод; 3 — заземлитель; 4 — изолятор молниеприемника; 5 — сооружение; 6 — подземная коммуникация

\* Продолжение. Начало см. «Электричество», № 4, 7, 1999.

молний с предельными параметрами.

Высота молниеотводов (стержневых или троцовых) должна обеспечивать зону защиты с минимальной вероятностью прорыва молнии (до 0,5%).

Если сооружения имеют газоотводные трубы или вентиляционные устройства, через которые могут выбрасываться взрывоопасные смеси горючих газов и паров, то молниеотводы должны располагаться так, чтобы их молниеприемники находились вне взрывоопасной зоны. Размеры зон взрывоопасности, подлежащих защите, указаны в табл. 5.

Таблица 5

Избыточное давление внутри установки, кПа	Плотность газа	Размер зон взрывоопасности от обреза трубы, м	
		по вертикали	по горизонтали
Не более 5	Тяжелее воздуха	1,0	2
5—25	То же	2,5	5
Не более 25	Легче воздуха	2,5	5
25—50	Любая	4,0	8

Здания и сооружения, относящиеся к I категории, защищаются от проникновения в них опасных импульсов напряжения и от электромагнитного влияния молний.

При ударах молний непосредственно в провода воздушных линий (электрических, телефонных, радиотрансляционных), а также вследствие электромагнитной индукции при ударах молний в землю на проводах возникают импульсы высокого напряжения. Проникая по проводам в здания и сооружения, они вызывают разряды на заземленные части, что может привести к тяжелым последствиям. Вследствие этого во взрывоопасные и пожароопасные здания ввод воздушных линий любого назначения не допускается. Вместо них должны применяться подземные кабельные линии.

Вследствие электростатической и электромагнитной индукции при разрядах молний может возникнуть искрение внутри взрывоопасных объектов. Для предотвращения его необходимо заземлить все протяженные металлические конструкции: крыши, фермы, балки, каркасы, внутренние трубопроводы, металлические корпуса

оборудования. Для этой цели на взрывоопасных объектах предусматривается специальное заземление защиты от вторичных воздействий молний, которое выполняется в виде замкнутого контура, охватывающего весь защищаемый объект. Сопротивление заземления этого контура не нормируется. К защитному контуру допускается присоединение подземных металлических коммуникаций и защитного заземления электроустановок. Расстояние между заземлителями молниеотводов и заземлителем защиты от вторичных воздействий молний определяется по (34)\*.

Протяженные металлические конструкции (трубопроводы, кабели и пр.) внутри взрывоопасных зданий должны быть соединены между собой в местах сближений (при расстоянии в месте сближения до 10 см) и присоединены через каждые 20–30 м к заземлению защиты от вторичных воздействий. Хорошие контакты (с сопротивлением не более 0,03 Ом) должны быть созданы в местах соединения труб или других деталей протяженных устройств. При фланцевых соединениях труб хороший контакт обеспечивается нормальной затяжкой шести болтов. В соединениях, где не может быть обеспечен надежный контакт, необходима установка перемычек, например из стальной проволоки диаметром 5–6 мм. Все металлические устройства, образующие петлевой контур, должны быть замкнуты перемычкой на конце петли.

Ко II категории относятся здания и сооружения, в которых взрывчатые или легковоспламеняющиеся вещества хранятсяочно закупоренными, а взрывоопасные смеси газов, паров или пылей с воздухом могут возникать только во время аварий или неисправностей. Защита объектов II категории осуществляется как отдельно стоящими молниеотводами (для хранилищ взрывчатых веществ), так и молниеотводами, устанавливаемыми на самом сооружении. Объекты, относящиеся ко II категории, могут не защищаться от вторичных воздействий молний (электростатической и электромагнитной индукции), а электроснабжение их может производиться по воздушным линиям, которые подключаются к объекту через кабели длиной не менее 50 м.

Все прочие здания и сооружения, удар молний в которые может вызвать пожар, механические разрушения и поражения людей и животных, относятся к III категории. Они могут защищаться как отдельно стоящими молниеотводами, так и молниезащитными устройствами, устанавливаемыми на самом защитном объекте. Защита от вторичных воздействий молний для зданий III ка-

тегории не требуется. Если к объекту подходят воздушные линии, то необходима защита от проникновения импульсов высокого напряжения.

**Особенности молниезащиты высоких объектов.** Высокие объекты (телебашни, высотные дома и пр.) достаточно часто поражаются молнией. По данным наблюдений Останкинская телевизионная башня (высота 540 м) поражается в среднем 30 раз в год, при этом в 1–3 случаях точки удара бывают заметно ниже ее вершины, на боковых выступающих элементах. Высотные дома Москвы поражаются 1–2 раза в год.

Целью защиты от молний высоких объектов является обеспечение безопасности людей, предохранение от разрушений внешних непроводящих частей объекта, обеспечение безаварийной работы электрооборудования и средств связи.

Защита высоких объектов осуществляется с помощью молниеприемников, устанавливаемых на самом объекте. Токоотводом может служить металлический или железобетонный каркас здания или сооружения. Следует предусматривать надежное соединение во время строительства стальной арматуры железобетонных деталей каркаса. Для предотвращения разрушений керамической облицовки или каких-либо других непроводящих элементов в местах возможных поражений молнией должны быть установлены молниеприемники, соединенные с каркасом здания. В качестве таких молниеприемников могут быть использованы как конструктивные элементы здания (парапеты, перила балконов, пожарные лестницы и т.д.), так и специально проложенные стальные проводники. Следует иметь в виду, что объекты высотой более 100 м могут поражаться молнией не только в вершину, но и в боковые выступающие части.

К каркасу объекта, являющемуся токоотводом, для выравнивания потенциалов по этажам на разных горизонтальных уровнях (через каждые 10–15 м) должны быть присоединены все внутренние трубопроводы, протяженные металлические элементы (например каркасы лифтов), а также металлические экраны электропроводки и оболочки кабелей. Каркас объекта через каждые 20–30 м по его периметру присоединяется к заземляющему контуру.

Для защиты электрооборудования и установок связи осуществляются следующие основные мероприятия: все сети низкого напряжения как внутри, так и снаружи объекта прокладываются в стальных трубах, которые через каждые 10–15 м соединяются с каркасом; кожухи всех электроаппаратов, а также сердечники и нейтрали трансформаторов присоединяются к каркасу; оболочки входящих в объект кабелей различного назначения присоединяются в местах входа к

\* См. «Электричество», 1999, № 7.

каркасу или к заземляющему контуру.

Заземляющий контур должен охватывать объект по всему периметру и иметь сопротивление растеканию тока 0,5 Ом. Последнее, как правило, не вызывает затруднений, поскольку к контуру присоединяются подземные трубопроводы и обсадные трубы буровых скважин, используемых с целью получения данных по геологическому строению выбранной для строительства площадки.

**Молниезащита электроэнергетических установок.** Наиболее часто подвержены ударом молнии воздушные линии электропередачи. Общая длина линий номинальных напряжений 35–1150 кВ у нас в стране достигла почти 800 тыс. км, а протяженность воздушных линий более низкого номинального напряжения исчисляется несколькими миллионами километров.

Возникающие на линиях электропередачи при ударах молнии импульсы перенапряжений, распространяясь по линиям, достигают подстанций и могут представлять опасность для установленного там электрооборудования. Помимо этого возможны и удары молнии в подстанции.

Таким образом, защите от молнии подлежат воздушные линии электропередачи, а также подстанции от прямых ударов молнии и от импульсов грозовых перенапряжений, приходящих на подстанцию по воздушным линиям.

**Молниезащита воздушных линий электропередачи.** Воздушные линии электропередачи испытывают ежегодно десятки ударов молнии в каждые 100 км линии. Поражение молнией фазового провода, сопровождающееся прохождением большого тока, создает на проводе такое высокое импульсное напряжение, что практически невозможно создать изоляцию, которая могла бы его выдержать. Поэтому в большинстве случаев линии на металлических опорах имеют один или два заземленных троса, подвешиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя удары молнии. Однако наличие тросов не исключает возможности появления высоких потенциалов на вершине металлической опоры при прямых ударах в нее молнии даже при малых импульсных сопротивлениях заземления опоры. Высокий потенциал на опоре может стать причиной разряда с опоры на фазный провод (обратное перекрытие). Наличие тросов не исключает, хотя и с очень малой вероятностью, ударов молнии в фазные провода.

Число перекрытий линейной изоляции меньше числа ударов молнии в линию, поскольку для перекрытия изоляции необходимо определенное напряжение, которое зависит от значения тока молнии и электрических параметров линии. Например, при малом импульсном сопротив-

лении заземления металлической опоры обратное перекрытие может произойти только при достаточно большом токе молнии. В то же время поражение молнией фазного провода может привести к перекрытию при очень небольшом токе, однако вероятность прорыва молнии через трошковую защиту невелика.

Вероятность перекрытия  $p_{\text{пер}}$  изоляции линии можно оценить исходя из параметров линии, импульсной прочности гирлянд изоляторов и вероятности токов молнии. Число перекрытий линейной изоляции определяется как

$$n_{\text{пер}} = n_{\text{уд}} p_{\text{пер}}.$$

По пути перекрытия изоляции линии проходит ток промышленной частоты — ток короткого замыкания на землю. Если дуга короткого замыкания горит устойчиво, то происходит отключение линии. Если линия не оборудована устройством автоматического повторного включения (АПВ) или действие АПВ неуспешно, то возникает перерыв в электроснабжении потребителей.

Длительность тока молнии мала (примерно 100 мкс) по сравнению с полупериодом напряжения промышленной частоты (10 000 мкс). Немаловажную роль играет фаза рабочего напряжения в момент удара молнии. При малом мгновенном значении рабочего напряжения и достаточно большом пути импульсного перекрытия не создаются условия для устойчивого горения дуги промышленной частоты. В инженерных расчетах принято оценивать вероятность перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу по средней напряженности вдоль пути перекрытий при наибольшем рабочем напряжении  $E_{\text{ср}} = U_{\text{наиб.раб}} / l_{\text{пер}}$ . Для линий на деревянных опорах и длинных воздушных промежутков вероятность возникновения устойчивой дуги определяется по формуле

$$\eta = (1,6E_{\text{ср}} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (37)$$

где  $E_{\text{ср}}$  — средняя напряженность (действующее значение), кВ/м.

Если  $\eta$  по (37) получается меньше 0,1 или больше 0,9, то в расчетах принимаются эти предельные значения.

Для линий на металлических опорах при номинальных напряжениях до 220 кВ принимают  $\eta = 0,7$  и при номинальных напряжениях 330 кВ и выше  $\eta = 1,0$ .

Показателем грозоупорности воздушных линий служит число отключений на 100 км линий в районе со 100 грозовыми часами в году:

$$n_{\text{откл}} = 4h_{\text{ср}} p_{\text{пер}} \eta, \quad (38)$$

где  $h_{\text{ср}}$  — средняя высота подвеса провода или троса.

На линиях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, часто используются металлические или железобетонные опоры. Применение грозозащитных тросов на таких линиях нецелесообразно, поскольку вследствие малой электрической прочности изоляции линии практически любой удар молнии в трос приводит к обратному перекрытию с троса на провод. Поэтому наиболее эффективными мерами, повышающими грозоупорность таких линий, являются оборудование их АПВ и установка дугогасящего реактора, уменьшающего ток дуги однофазного замыкания на землю и увеличивающего вероятность самопроизвольного погасания дуги.

Таким образом, возможны два различных пути уменьшения числа грозовых отключений линий: уменьшение вероятности перекрытия и уменьшение вероятности перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу тока короткого замыкания. Первый метод реализуется подвеской тросовых молниеотводов и созданием малого импульсного сопротивления заземления опор. При этом, с одной стороны, резко снижается вероятность непосредственного поражения молнией фазных проводов и, с другой — снижается импульсное напряжение на изоляции при ударах в опоры и тросы. Второй метод осуществляется или при удлинении пути перекрытия (использование изоляционных свойств дерева на линиях с деревянными опорами), что приводит к снижению средней рабочей напряженности, или с помощью дугогасящих реакторов в сетях 6–35 кВ, что дает значительное увеличение вероятности самопроизвольного погасания дуги замыкания на землю.

Исходя из условий надежности электроснабжения, допустимое число отключений воздушных линий в год принимают равным:

$$n_{\text{откл.доп}} = N_{\text{доп}} / (1 - \beta_{\text{АПВ}}), \quad (39)$$

где  $N_{\text{доп}}$  — допустимое число перерывов электроснабжения в год ( $N_{\text{доп}} \leq 0,1$  при отсутствии резервирования и  $N_{\text{доп}} \leq 1,0$  при наличии резервирования);  $\beta_{\text{АПВ}}$  — коэффициент успешности АПВ, равный 0,8–0,9 для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах.

Допустимое число отключений принимается в зависимости от типа выключателя равным 1÷4, поскольку более частая работа выключателей усложняет их эксплуатацию (требуются внеплановые ревизии).

*Грозоупорность линий без тросов*<sup>1</sup>. При прямом ударе молнии в провод ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводе определяется как

$$U = \frac{I_M Z}{2}, \quad (40)$$

где  $Z$  — волновое сопротивление провода, которое в среднем, с учетом импульсной короны, может быть принято равным 300 Ом.

При коронировании увеличивается емкость провода и соответственно уменьшается его волновое сопротивление.

На линии с металлическими опорами импульс перенапряжения с амплитудой  $U$  воздействует на изоляцию провода на опоре. При токах молнии порядка 5–10 кА, т.е. в большинстве грозовых разрядов в линию, создаются перенапряжения, достаточные для перекрытия гирлянды изоляторов.

На линиях с номинальным напряжением до 220 кВ наряду с металлическими и железобетонными используются деревянные опоры.

Древесина обладает изоляционными свойствами, поэтому, например, участок деревянной траверсы между точкой подвеса гирлянды и заzemляющим спуском на опорах с тросами может рассматриваться как дополнительная изоляция провода относительно земли. Точно так же участок траверсы между точками закрепления двух гирлянд на опорах без тросов является дополнительной междуфазной изоляцией (см. рис. 20 — «Электричество», 1999, № 7).

Изоляционные свойства дерева в значительной степени зависят от его состояния. Хорошо высушенная древесина обладает относительно высокой электрической прочностью. Однако вследствие пористости и высокой гигроскопичности она всегда содержит большое количество влаги (15–40%). Увлажненность древесины сильно зависит от атмосферных условий и может изменяться в достаточно широких пределах. При этом в широком диапазоне изменяется и ее электрическая прочность. Наиболее низкое разрядное напряжение имеет дерево, поверхность которого смачивается ливневым дождем.

Для ориентировочных расчетов дополнительную импульсную прочность, создаваемую деревянной траверсой, принимают равной 70 кВ на 1 м пути разряда по этой траверсе.

На линиях с деревянными опорами (рис. 24) перекрытие прежде всего происходит между про-

<sup>1</sup> См. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Учебник для вузов / В.В. Вазуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь, под общ. ред. В.П. Ларионова. 3-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

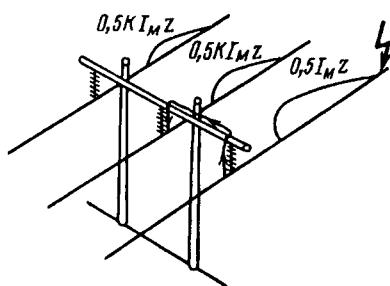


Рис. 24. Импульсы грозовых перенапряжений при ударе молнии в провод линии на деревянных опорах

водами по пути гирлянда — траверса — гирлянда. Импульс на пораженном проводе индуцирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффициентом электромагнитной связи  $k$ . Между проводами возникает напряжение

$$U = \frac{I_M Z}{2} (1 - k), \quad (41)$$

где  $k$  — коэффициент связи между проводами с учетом импульсной короны, равный  $0,25 \div 0,4$ .

Вероятность перекрытия линейной изоляции  $p_{\text{пер}}$  рассчитывается по критическому значению тока молнии, которое определяется из условий равенства воздействующего напряжения  $U$  и импульсного разрядного напряжения изоляции  $U_{50\%}$  по формулам: для ВЛ на металлических и железобетонных опорах

$$I_{\text{кр}} = \frac{2U_{50\%}}{Z}, \quad (42)$$

для ВЛ на деревянных опорах

$$I_{\text{кр}} = \frac{2U_{50\%}}{Z(1 - k)}. \quad (43)$$

Малое число отключений линий на деревянных опорах без тросов обеспечивается обычно за счет низкого значения коэффициента перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу  $\eta$ . Очевидно, что в случае металлических опор разрядный промежуток уменьшается до длины одной гирлянды, что вызывает существенное увеличение как коэффициента  $\eta$ , так и вероятности перекрытия изоляции  $p_{\text{пер}}$ . Поэтому линии 110 кВ и выше на металлических опорах без тросов в районах со средней или большой интенсивностью грозовой деятельности имели бы недопустимо большое число отключений. Как правило, такие линии защищаются тросовыми молниеотводами по всей длине.

Несколько по-иному обстоит дело с линиями 35 кВ на металлических опорах, работающих в системе с изолированной нейтралью, особенно если в ней применены дугогасящие аппараты. В таких системах однофазные перекрытия изо-

ляции не приводят к отключению линии, так как дуга емкостного тока в большинстве случаев гаснет в результате действия дугогасящего реактора, а коэффициент перехода в силовую дугу  $\eta \approx 0$  независимо от значения  $E_{\text{ср}}$ . Поэтому отключения линий 35 кВ за счет грозовых поражений могут происходить только в случае двухфазных или трехфазных перекрытий.

После перекрытия изоляции пораженного провода в путь тока вместо волнового сопротивления провода  $Z/2$  включается значительно меньшее сопротивление заземления опоры  $R_i$ . Если разряд молнии произошел в провод на небольшом расстоянии от опоры, через заземлитель проходит практически полный ток молнии и опора приобретает потенциал, приблизительно равный  $I_M R_i$ . На соседнем проводе наводится потенциал  $kI_M R_i$ . Перекрытие изоляции второго провода произойдет, если

$$I_{\text{кр}} \geq \frac{U_{50\%}}{R_i(1 - k)}. \quad (44)$$

Отсюда следует, что вероятность перекрытия  $p_{\text{пер}}$  тем меньше, чем меньше сопротивление  $R_i$  (или больше критическое значение тока молнии). Поэтому на линиях 35 кВ на металлических опорах без тросов целесообразно применять дополнительные заземлители для уменьшения сопротивления заземления опор.

Очевидно, что наибольшие перенапряжения на линиях без тросов возникают при прямом поражении линии молнией. Тем не менее определенную роль играют и удары молнии вблизи линии. Такие удары приводят к появлению индуцированных напряжений, которые на фазных проводах имеют электрическую и магнитную составляющие:

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{и.э}} + U_{\text{и.м}}. \quad (45)$$

Заряды лидерного канала молнии связывают на проводе заряды противоположного знака (рис. 25). Электрическое поле связанных зарядов

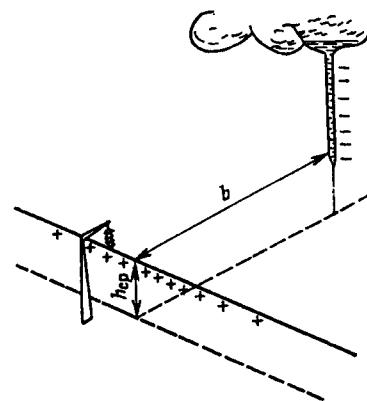


Рис. 25. К оценке индуцированных перенапряжений

уравновешивается полем лидера, поэтому потенциал провода во время лидерной стадии равен нулю (рабочее напряжение не учитывается). Во время главного разряда заряды лидеранейтрализуются, при этом связанные на проводе заряды освобождаются, что сопровождается повышением потенциала провода и образованием импульсов напряжения, распространяющихся по проводу в обе стороны. Так возникает электрическая составляющая индуцированного напряжения.

Изменение магнитного поля при главном разряде приводит к возникновению магнитной составляющей индуцированного напряжения в петле опора — гирлянда изоляторов — провод — земля.

Максимальное значение индуцированного напряжения можно оценить по формуле

$$U_{\text{инд}} \approx 30 \frac{h_{\text{ср}}}{b} I_{\text{м}}. \quad (46)$$

Расчеты показывают, что индуцированные перенапряжения могут превышать импульсное разрядное изоляции линий 35 кВ 1–2 раза в год, а для воздушных линий напряжением 110 кВ и выше они не имеют существенного значения.

*Грозоупорность линий, защищенных тросами*<sup>2</sup>.  
Грозовые отключения воздушных линий с тросами могут происходить по следующим причинам:

удар молнии в трос в середине пролета и перекрытие воздушного промежутка трос—провод;

прорыв молнии через тросовую защиту, т.е. поражение провода;

удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод.

Расчеты и опыт эксплуатации линий показывают, что вероятность пробоя воздушного промежутка между тросом и проводом при ударе молнии в трос пренебрежимо мала и с нею можно не считаться, если расстояние трос—провод составляет не менее 2% длины пролета между опорами линии. Минимальные расстояния между тросом и проводом в середине пролета по вертикали в соответствии с ПУЭ\*\* должны быть следующими:

Длина пролета, м	100	150	200	300	400	500	600	700
Расстояние трос—провод, м	2	3,2	4	5,5	7	8,5	10	11,5

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, т.е. поражение фазного провода, принято определять в соответствии с опытом эксплуатации по электрической формуле

$$\lg p_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (47)$$

<sup>2</sup> См. сноску 1.

\*\* Правила устройств электроустановок. 6-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

где  $h_{\text{оп}}$  — высота опоры, м;  $\alpha$  — угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Угол защиты характеризует экранирующее действие тросов и при высоте опор до 30 м в соответствии с рис. 6 или 7 (см. «Электричество», 1999, № 4) должен быть не более 30°.

Долю ударов молнии в опоры (в трос вблизи опор) от общего числа поражений линии можно оценить как  $4h_{\text{оп}}/l_{\text{п}}$ , где  $h_{\text{оп}}$  — высота опоры, а  $l_{\text{п}}$  — длина пролета. Тогда число ударов в опоры

$$n_{\text{оп}} = n_{\text{уд}} \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}}}, \quad (48)$$

где  $n_{\text{уд}}$  — число ударов молнии в линию.

Обратное перекрытие линейной изоляции с опоры на провод фазы может произойти, если напряжение на изоляции достигнет ее импульсного разрядного напряжения или превысит его.

Упрощенно вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору можно определить по значению критического тока:

$$I_{\text{кр}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta h_{\text{оп}}}, \quad (49)$$

где  $\delta = 0,15$  для линий с двумя тросами и 0,3 для линий с одним тросом.

Очевидно, что при двух тросах доля тока в опоре меньше, чем при одном тросе, и критическое значение тока молнии выше. Увеличение высоты опоры, а значит и ее индуктивности, приводит к росту напряжения на гирлянде изоляторов и вследствие этого — к уменьшению критического тока, что также отражает формула (49).

Упрощенная методика может быть использована для оценки числа отключений воздушных линий напряжением до 500 кВ при сопротивлениях заземлений опор до 30 Ом.

Таким образом, удельное число грозовых отключений линий с тросами можно оценить по формуле

$$h_{\text{откл}} = 4h_{\text{ср}} \left( \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}}} p_{\text{оп}} + p_{\alpha} p_{\text{пр}} \right), \quad (50)$$

где  $p_{\alpha}$  — вероятность прорыва молнии на провод, определяемая по (47);  $p_{\text{пр}}$  — вероятность перекрытия изоляции линии при ударе молнии в провод, определяется по (42);  $p_{\text{оп}}$  — вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору [см. (49)].

Для достижения приемлемых показателей грозоупорности линий [см. (39)] для грунтов с различными удельными сопротивлениями нормируются следующие значения сопротивления заземления опор при промышленной частоте тока:

$\rho$ , Ом·м	100	100–150	500–1000	Более 1000
$R$ , Ом	До 10	До 15	До 20	До 30

При токах молнии сопротивления сосредоточенных заземлителей получаются несколько

меньшими из-за искрового эффекта. В горных районах (скальные грунты) сопротивления заземления могут получаться более высокими, чем приведенные ранее, но благодаря уменьшению токов молний по сравнению с равнинной местностью число отключений может оказаться приемлемым.

**Молниезащита подстанций.** Защита открытых распределительных устройств подстанций высокого напряжения от прямых ударов молний осуществляется с помощью стержневых молниевводов в соответствии с ранее приведенными рекомендациями (см. «Электричество», 1999, № 4, 7). Молниеприемники целесообразно устанавливать на порталах (кроме трансформаторных), прожекторных мачтах и крышах зданий. Металлоконструкции порталов и мачт при этом используются в качестве токоотводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем. Следует иметь в виду, что возможность установки молниевводов на порталах подстанций 110 кВ и ниже должна быть проверена по указаниям, приведенным в разделе «Допустимые расстояния между молниевводом и защищаемым объектом» (см. Часть II — «Электричество», 1999, № 7).

Заземлители подстанций с целью выравнивания потенциалов по их территории при аварийных замыканиях на землю и обеспечения таким образом электробезопасности персонала выполняются в виде сетки, образуемой горизонтально расположенными в земле полосами, которыми соединяются вертикальные электроды. К заземлителю присоединяются все металлоконструкции (порталы, мачты) и металлические корпуса электрооборудования (баки трансформаторов, масляных выключателей и т.п.). В соответствии с нормами стационарное сопротивление заземления для подстанций 110 кВ и выше не должно превышать 0,5 Ом.

Сопротивление таких протяженных заземлителей в виде сетки при прохождении токов молний обычно возрастает, поэтому для его уменьшения в местах присоединения токоотводов к заземляющему контуру подстанции устанавливаются дополнительные сосредоточенные заземлители в виде вертикальных электродов.

На подстанциях 35 кВ нейтрали трансформаторов присоединяются к заземлителю через дугогасящий реактор. В этом случае необходимое значение стационарного сопротивления заземления определяют исходя из того, что при прохождении через заземлитель увеличенного на 25% номинального тока дугогасящего реактора потенциал заземлителя не должен превышать 125 В. Однако сопротивление заземления подстанции не должно превышать 10 Ом.

Подстанционные здания и сооружения защи-

щаются путем заземления металлической кровли или, если крыша неметаллическая, посредством сетки размером  $5 \times 5$  м<sup>2</sup> из стальной проволоки диаметром 8 мм, которая располагается на крыше и присоединяется к заземлению.

По экономическим соображениям уровень изоляции подстанционного оборудования устанавливается ниже уровня изоляции линии. Поэтому импульсы напряжения, образующиеся при ударах молний в линию и имеющие наибольшую амплитуду, равную импульсному разрядному напряжению линейной изоляции (или установленного на подходе к подстанции трубчатого разрядника), представляют опасность для подстанционного электрооборудования.

Основным средством защиты электрооборудования служат высоконелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и вентильные разрядники (РВ). В сочетании с мероприятиями, осуществляемыми на подходе линии к подстанции, защитные аппараты (ЗА) позволяют ограничить грозовые перенапряжения до допустимых для оборудования значений.

Характеристики ЗА и допустимые импульсные напряжения на изоляции оборудования  $U_{\text{доп}}$  связаны соотношением

$$U_{\text{доп}} \geq U_{\text{ост}} + \Delta U_{\text{k}}, \quad (51)$$

где  $U_{\text{ост}}$  — остающееся на нелинейном резисторе ЗА напряжение при наибольшем допустимом токе в резисторе;  $\Delta U_{\text{k}}$  — так называемый координационный интервал.

Координационный интервал учитывает повышение напряжения на защищаемом оборудовании по отношению к напряжению на ЗА, зависящее от их взаимного удаления и от крутизны фронта импульса грозового перенапряжения, набегающего на подстанцию.

Допустимая крутизна импульса  $a_{\text{доп}}$  и расстояния  $l$  между ЗА и защищаемым оборудованием связаны соотношением

$$\Delta U_{\text{k}} = 2a_{\text{доп}} l/v, \quad (52)$$

где  $v$  — скорость распространения импульса, составляющая при коронировании проводов примерно 250 м/мкс.

Если из конструктивных соображений установлено значение  $l$ , то для соблюдения координационного интервала необходимо, чтобы на входе подстанции грозовой импульс имел в соответствии с (52) крутизну фронта не выше определенного значения. Достигается это с помощью защищенного подхода к подстанции (называемого также опасной зоной).

На защищенном подходе особенно тщательно выполняются требования молниезащиты: снижение сопротивлений заземлителя опор и умень-

шение углов защиты тросов. Целью этих мероприятий является уменьшение вероятностей прорыва молнии через тросовую защиту и обратных перекрытий при ударах в опоры в пределах защищенного подхода к подстанции. При прохождении импульса напряжения по защищенному подходу вследствие действия импульсной короны происходит удлинение его фронта, т.е. снижение крутизны фронта импульса, набегающего на подстанцию.

Принимая в месте удара молнии в качестве расчетного импульс с вертикальным фронтом, бесконечно длинным спадом и амплитудой, определяемой волт-секундной характеристикой линейной изоляции, находим необходимую длину защищенного подхода:

$$l_{\text{подх}} = \frac{UK}{a_{\text{доп}} \left( 0,5 + \frac{0,008U}{h_{\text{ср}}} \right)}, \quad (53)$$

где  $U$  — амплитуда импульса, кВ;  $a_{\text{доп}}$  — допустимая крутизна, кВ/ мкс;  $h_{\text{ср}}$  — средняя высота подвеса провода, м;  $K$  — коэффициент, равный 1; 1,2 и 1,5 при числе проводов в фазе соответственно 1, 2 и 3.

На рис. 26,а показана схема защищенного подхода, когда подходящая к подстанции линия выполнена на деревянных опорах. Трос подвешивается только в пределах защищенного подхода. Так как на деревянных опорах от тросов к заземлителям прокладываются по стойкам токоотводящие спуски, прочность изоляции опоры относительно земли существенно снижается. В этом случае первая подтросовая опора является местом с ослабленной изоляцией, и для того чтобы не ухудшить грозоупорность линии, в начале защищенного подхода на каждой фазе устанавливают трубчатые разрядники  $PT1$ . В конце подхода иногда устанавливают второй комплект трубчатых разрядников  $PT2$ , который служит для защиты разомкнутого линейного выключателя.

Если линия выполнена на металлических или железобетонных опорах и защищена тросами по

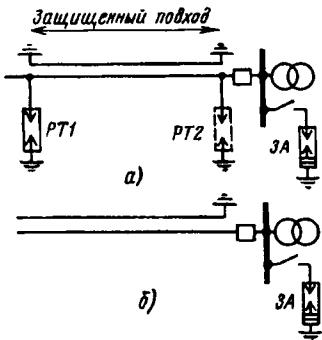


Рис. 26. Защищенные подходы воздушных линий к подстанции: а — линия на деревянных опорах; б — линия на металлических или железобетонных опорах

всей длине, то трубчатые разрядники на подходе не устанавливаются (рис. 26,б).

На подстанциях 110—500 кВ длиной защищенного подхода при обычно встречающихся расстояниях от ЗА до защищаемого оборудования составляет 1—4 км.

Эффективность защиты подстанции определяется двумя составляющими, связанными с прямыми ударами молнии и с набегающими на подстанцию грозовыми импульсами.

Эффективность защиты от прямых ударов молнии оценивается годовым числом  $\beta_1$  прорывов молнии в зону защиты и обратных перекрытий при ударах в молниеотводы:

$$\beta_1 = n_{\text{уд}} \frac{D_r}{100} (\psi + p_{\text{оп}}), \quad (54)$$

где  $n_{\text{уд}}$  — число ударов молнии в подстанцию за 100 грозовых часов [(1, 5)];  $D_r$  — число грозовых часов в году;  $\psi \approx 10^{-3}$  — вероятность прорыва молнии в зону защиты;  $p_{\text{оп}}$  — вероятность перекрытия изоляции при ударе в молниеотвод.

При установке молниеотводов на порталах подстанции в (54) наибольшее значение имеет  $p_{\text{оп}}$ , поскольку молниеотводы поражаются при  $\psi = 10^{-3}$  в 1000 раз чаще, чем токоведущие части.

Эффективность защиты от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих на подстанцию по воздушным линиям, характеризуется средним числом опасных перенапряжений  $\beta_2$ , возникающих на подстанции за год:

$$\beta_2 = 4h \frac{D_r}{100} \frac{ml_{\text{подх}}}{100} \left( p_{\alpha} + \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}}} p_{\text{оп}} \right), \quad (55)$$

где  $m$  — число отходящих от подстанции воздушных линий;  $l_{\text{подх}}$  — длина защищенного подхода (опасной зоны);  $p_{\alpha}$  — вероятность удара молнии в фазные провода на подходе [см. (47)];  $p_{\text{оп}}$  — вероятность перекрытия изоляции при ударах молнии в опоры в пределах защищенного подхода [см. (49)].

Напомним, что на подходах уменьшаются защитные углы троса  $\alpha$  и снижаются сопротивления заземления опор  $R_i$ .

Показателем эффективности защиты подстанции (грозоупорности) служит число лет ее безаварийной работы:

$$T = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2}. \quad (56)$$

Расчетные значения  $T$  современных подстанций составляют сотни лет, т.е. на порядок превышают расчетные сроки службы электрооборудования подстанций.

(Окончание следует)

# Хроника

## **Владимир Михайлович Терехов**

*(К 70-летию со дня рождения)*

Исполнилось 70 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора Владимира Михайловича Терехова, видного ученого и педагога, специалиста в области автоматизированного электропривода.

Вся жизнь Владимира Михайловича связана с Московским энергетическим институтом, факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта которого он окончил в 1953 г. Работая на кафедре автоматизированного электропривода, он в 1958 г. защитил кандидатскую диссертацию.

Первые научные работы В.М. Терехова посвящены исследованиям электроприводов общепромышленных механизмов, проблемам массового регулируемого электропривода. Основное направление его научной деятельности в последующие годы — разработка и исследование высокоточных следящих электроприводов. Особенno впечатляет выполненная юбиляром многокритериальная оптимизация работы уникальных антенных и солнечных установок, успешно ис-



пользуемая проектными и наладочными организациями.

В последнее время профессор В.М. Терехов много внимания уделяет новейшим алгоритмам управления электроприводами, в частности использованию нечеткой логики в задачах построения эффективных систем электропривода.

Под руководством В.М. Терехова выполнено и защищено восемь кандидатских диссертаций. Список его научных трудов содержит более ста наименований, в том числе две монографии.

Многолетний и очень плодотворный период деятельности Владимира Михайловича связан с педагогической рабо-

той, подготовкой инженеров не только для России, но и для многих стран мира. Следует особенно отметить учебно-методическую разработку и постановку курса по системам управления электроприводов. Он автор и соавтор трех учебников, четырех учебных пособий по основным вопросам теории управления электроприводами, их применению в народном хозяйстве. Эти работы исключительно эффективны в учебном процессе и широко используются в вузах России и за рубежом.

В.М. Терехов ведет большую общественно-научную и методическую работу. Длительное время он был членом редакционного Совета МЭИ, работал в деканате факультета повышения квалификации преподавателей МЭИ, является членом диссертационных советов, членом редколлегии журнала «Промышленная энергетика».

Поздравляя прекрасного ученого, обаятельного и милого человека Владимира Михайловича Терехова с юбилеем, желаем ему оптимизма и новых творческих успехов.

# Елена Александровна Конюхова

(К 60-летию со дня рождения)

Елена Александровна Конюхова родилась в Архангельске. После окончания в 1961 г. Дальневосточного политехнического института (г. Владивосток) поступила в аспирантуру кафедры электроэнергетических систем Московского энергетического института и начала заниматься исследованиями качества электроэнергии. В 1965 г. защитила кандидатскую диссертацию по статистической и экономической оценке качества напряжения в городских электрических сетях.

С 1967 г. Елена Александровна работала доцентом на кафедре внутризаводского электроснабжения, а с 1976 г. — на кафедре общей электроэнергетики, с 1990 г. по настоящее время она трудится на кафедре электроснабжения промышленных предприятий МЭИ.

Е.А. Конюхова была научным руководителем ряда исследовательских работ, связанных с промышленным электроснабжением. Особенно тесно кафедра сотрудничала с Управлением главного энергетика Автозавода им. Лихачева (АМО ЗИЛ). Теоретические и практические разработки, проведен-



ные Е.А. Конюховой в системе электроснабжения как в целом по заводу, так и по его подразделениям, позволили создать новую оригинальную методику выбора режимов напряжений на предприятии.

Внедрение результатов этих разработок ощутимо снизило потребление активной мощности и энергии в системе электроснабжения АМО ЗИЛ без дополнительных капиталовложений.

В 1998 г. Е.А. Конюхова успешно защитила докторскую диссертацию «Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации ре-

активной мощности». В процессе работы над этой сложной проблемой был решен ряд принципиальных вопросов, связанных с определением параметров режимов цеховых электрических сетей низкого напряжения с учетом статических характеристик электроприемников. Энергосбыт Мосэнерго рекомендует к широкому применению методику выбора параметров режимов промышленных предприятий, созданную Е.А. Конюховой.

Основные положения научно-исследовательских работ Е.А. Конюховой отражены в более чем 30 статьях, опубликованных в центральных научных журналах.

В течение 35 лет Е.А. Конюхова успешно сочетает научную деятельность с педагогической работой. Под ее научным руководством шесть специалистов стали кандидатами наук и успешно работают как в России, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Основательно и доходчиво написанные Е.А. Конюховой учебные и методические пособия пользуются неизменной популярностью у студентов и аспирантов.

# Вячеслав Алексеевич Кузнецов

(К 60-летию со дня рождения)

Исполнилось 60 лет со дня рождения известного ученого в области электромеханики, академика Международной электротехнической академии, профессора университета Висконсин-Мэдисон (США), заведующего кафедрой электромеханики Московского энергетического института (технического университета), доктора технических наук, профессора Вячеслава Алексеевича Кузнецова.

В.А. Кузнецов родился в Москве. Окончив в 1962 г. МЭИ, принял участие в разработке и создании уникального гидрогенератора мощностью 16,9 МВ·А напряжением 121 кВ, установленного и успешно испытанного на Сходненской ГЭС. В процессе этой работы им были рассчитаны и спроектированы оригинальные дуговые модели частей ротора и статора гидрогенератора, позволившие решить проблемы оптимизации демпферной системы, успешно проведены эксперименты по тензометрированию усилий в зубчатых структурах электрических машин.

В 1965–1968 гг. В.А. Кузнецов обучался в аспирантуре МЭИ. Им были созданы новые типы математических моделей электрических машин на основе резистивных сеток с нелинейными элементами, что позволило воспроизвести магнитные поля и характеристики синхронных машин в полуавтоматическом режиме. В 1969 г. он защитил кандидатскую дис-



сертацию «Моделирование синхронных машин в установившихся режимах». В 1973–1974 гг. Вячеслав Алексеевич проходил стажировку в Лондонском университете, в Империал колледже, работая с профессором Э. Лейтвейтом.

С 1968 г. В.А. Кузнецов преподает в МЭИ, последовательно занимая должности ассистента, старшего преподавателя, доцента, профессора. С 1989 г. он заведует кафедрой электромеханики МЭИ. С 1969 по 1976 гг. был заместителем декана электромеханического факультета, проводил большую работу по формированию учебного процесса, созданию новых учебных планов.

В 1990 г. В.А. Кузнецов защитил докторскую диссертацию «Универсальный метод расчета магнитных полей и процессов в электрических машинах». Он руководил рядом научно-исследовательских работ

по разнообразным тематикам — от разработки и исследования вентильных реактивных двигателей до создания сканера межпланетной станции. В последние годы Вячеслав Алексеевич уделяет большое внимание созданию и применению специальных новых методов расчета магнитных полей, характеристик и процессов в электрических машинах, сопрягаемых с полупроводниковыми преобразователями. При его активном участии сформулированы принципы создания универсального численного метода анализа электромеханических преобразователей совместно с предвключеными элементами. Под его руководством выполнены и защищены 10 кандидатских и одна докторская диссертации. Он автор более 100 печатных работ, соавтор двух монографий, последнего издания «Электротехнического справочника» (1998 г.).

В.А. Кузнецов — председатель двух советов по присуждению кандидатских и докторских диссертаций, председатель Учебно-методического Совета Минобразования России по специальности 1801, организатор и участник международных и отечественных научных конференций.

В.А. Кузнецов имеет широкую международную известность, приглашался для научной и педагогической работы в Великобританию, Нидерланды, Норвегию, США, КНР.

## Георгий Васильевич Зевеке

На 92-м году жизни скончался профессор кафедры теоретических основ электротехники Московского энергетического института Георгий Васильевич Зевеке, крупный ученый, талантливый педагог высшей школы, внесший вклад в электротехнику, российскую систему электротехнического образования.

Георгий Васильевич родился в Москве в семье инженера-механика. В 1923 г. поступил на механический факультет Нижегородского государственного университета, который окончил в 1929 г., получив диплом инженера-механика по специальности теплосиловых электрических станций и котельных установок. Начал работать техником на Горьковской районной электрической станции в Балахне, но вскоре был назначен младшим инженером, затем инженером электролаборатории, заведующим электростанцией. С 1930 г. Г.В. Зевеке начал преподавательскую деятельность в Балахнинском электротехникуме: читал студентам математику и физику, физические основы электротехники, теорию переменных токов, электрические машины, технику высоких напряжений, руководил дипломным проектированием, работал заведующим электротехническим отделением техникума и заместителем заведующего его учебной частью.

С января 1934 г. Г.В. Зевеке — старший инженер электротехника ОРГРЭС в Москве. Работая в ОРГРЭС, он провел пуск и наладку электрической части ряда электростанций, занимался научно-исследовательской работой по автоматическому регулированию возбуждения ге-



нераторов и релейной защите, был членом комиссий Наркомата электростанций по расследованию системных аварий, обучал инженеров наладке автоматических регуляторов на всех основных электростанциях.

Результаты проведенных Г.В. Зевеке в этот период работ были обобщены и опубликованы в статьях и инструкциях. Они были посвящены исследованию различных типов защит генераторов и линий, режимов трансформаторов, автоматического регулирования; были глубоко рассмотрены переходные процессы в генераторах с учетом действия автоматических регуляторов, особенности различных систем защит.

В январе 1943 г. Г.В. Зевеке был переведен из ОРГРЭС в технический отдел Народного комиссариата электростанций, где систематизировал свою предыдущую работу: составил типовую инструкцию по автоматическому регулированию возбуждения генераторов, ряд информационных писем по релейной защите и автоматическому регулированию возбуждения, руководящие указания по релейной защите. В марте

1943 г. он защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Анализ релейных защит синхронных генераторов».

В ноябре 1943 г. Г.В. Зевеке перешел на работу в МЭИ на кафедру релейной защиты, а с мая 1944 г. начал преподавание на кафедре теоретических основ электротехники, где проработал до ухода на пенсию в 1977 г.

В МЭИ ярко проявился научно-педагогический талант Г.В. Зевеке. Его блестящие лекции привлекали не только студентов, но и аспирантов и преподавателей. Он был строгим, требовательным и одновременно справедливым преподавателем, не жалевшим сил и времени для студентов. Его уважали за широкую эрудицию и высокую интеллигентность, тактичность и внимательность.

Много времени Георгий Васильевич уделял молодым преподавателям, вел постоянные методические семинары, преподавал на факультете повышения квалификации. Георгий Васильевич широко известен как соавтор получивших широкое признание задачников и учебников по ТОЭ, издававшихся и переиздававшихся авторскими коллективами под руководством К.А. Круга, К.М. Поливанова, П.А. Ионкина. Последний учебник по теории электрических цепей был опубликован Г.В. Зевеке в соавторстве с П.А. Ионкиным, С.В. Страховым и А.В. Нетушилом уже после ухода на пенсию в 1989 г.

Человек огромного личного обаяния, многосторонних интересов, Г.В. Зевеке навечно вписал свое имя в историю московской электротехнической школы. Память о нем навсегда сохранится в сердцах его коллег и учеников.

Представительство РАО "ЕЭС России" по управлению акционерными обществами  
Уральской части России "Уралэнерго"  
ОАО "Башкирэнерго"

Центр "РИД"

**19-22 октября**

Республиканский выставочный комплекс

Республики Башкортостан

Место проведения: г. Уфа - столица Башкортостана

ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА



**УРАЛЭНЕРГО-99**

**ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:**

теплотехническое оборудование; котлы, горелки, котельное и вспомогательное оборудование, теплообменные аппараты; турбогенераторы, турбины, компрессоры, вспомогательное оборудование; теплофикационные магистральные системы и техника их соединения; оборудование для электростанций и подстанций, для организации сетей распределения, передачи и производства электроэнергии; энергосбережение; экологические аспекты энергетики; продукция кабельного производства; электроинструменты; осветительное оборудование

**АДРЕС ОРГКОМИТЕТА: ООО Центр "РИД"**  
450000, Республика Башкортостан, Уфа, а/я 1360 А  
Тел.: (3472) 22-48-57, 22-46-66, тел/факс: (3472) 22-37-05, 22-54-12  
E-mail: rid@poikc.bashnet.ru

**Адреса редакции: 103012 Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10**

**т 924-24-80, 928-88-69; факс 315-0698**  
**101000 Москва, Главный почтамт, а/я № 648**

**Художественный редактор Т.А. Дворецкова**

Сдано в набор 19.07.99. Подписано в печать 20.08.99. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Тираж 1000 экз.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 9. Заказ 242 Цена свободная

**Свидетельство о регистрации № 0110272 от 8 февраля 1993 г.  
Министерства печати и информации Российской Федерации**

**ЗАО «Знак», 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10  
Отпечатано в типографии МЭИ  
111250 Москва, ул. Красноказарменная, д. 13**

Если Вы работаете в области энергетики или электротехники,  
позаботьтесь о том,  
чтобы Ваши предприятие, 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 АО «Международная книга», фирма «Периодика»  
(117049, Б. Якиманка, 39, тел. 238-4967, факс 238-4634)