

ISSN 0013-5860





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

№ 11 НОЯБРЬ 1999

УЧРЕДИТЕЛИ

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

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ИВАНОВ В.Н., ЧИБИРКИН В.В., МА-
КАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М.,
ЩЕРБАКОВ В.Г., КОВАЛЕВ Ф.И. (пред-
седатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПО-
ДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВС-
КИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОREN-
ЦЕВ С.Н.

Издатель: ЗАО "Знак"
103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Евгеньев Г.Б., Кобелев А.С., Кузьмин Б.В., Крючков А.А. Перспективы использования новой технологии автоматизированного решения инженерных задач для проектирования электрических машин	1
Кухарский М.П. Подогрев воздуха в межреберных каналах серийных электродвигателей	12
Афонин В.И. Разработка и исследование независимой вентиляции лифтовых двигателей	14
Дмитренко Ю.И., Ковалев Е.Б., Ландкоф Л.Б., Макаров К.Д. Некоторые вопросы разработки и испытания высокоиспользованных электродвигателей для угольных комбайнов	18
Логинова Е.Ю. Моделирование нестационарных тепловых полей в тяговой электрической машине	21

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Зборовский И.А., Деев Л.П. Экономичный силовой трансформатор для электропоезда	25
Долгополов А.Г. Системы автоматической настройки компенсации для дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием	30

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Андранинов М.В., Родионов Р.В. Определение параметров фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов	37
--	----

ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ

Месенжник Я.З., Новиков Д.В., Пироговский Р.А. Технико-экономические характеристики специальных высоковольтных кабелей нового поколения для электропитания погружных нефтеподъемников	41
---	----

КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Семенова И.А., Геча Э.Я., Рязанов И.Б. О продольной герметичности кабелей с водопоглощающим материалом	47
--	----

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Ёлшин А.И., Казанский В.М., Клесов В.И. Безопасные индукционные электронагреватели для отопления и горячего водоснабжения	50
---	----

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Рудаков М.Л., Федорова И.Г. Выбор электромагнитных экранов высокочастотных установок для нагрева диэлектриков ...	53
---	----

ИССЛЕДОВАНИЯ

Мустафаев Р.И., Гашимова А.Р. Статистические характеристики ветроэлектрических установок с асинхронным генератором при регулировании подводимого к статору генератора напряжения	59
--	----

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Перспективы использования новой технологии автоматизированного решения инженерных задач для проектирования электрических машин

ЕВГЕНЬЕВ Г.Б., доктор техн.наук (МГТУ им.Н.Э.Баумана), КОБЕЛЕВ А.С., канд.техн.наук (ОАО «НИПТИЭМ»), КУЗЬМИН Б.В., КРЮЧКОВ А.А. (ЗАО «ЦИТ СПРУТ»)

Проведен анализ ныне существующего уровня автоматизации проектно-конструкторских и технологических работ на заводах-производителях асинхронных двигателей. Выявлены причины низкого уровня реальной автоматизации инженерной деятельности. Для ускорения решения проблемы автоматизации производства предложено использовать интеллектуальные САПР-продукты, моделирующие собственно процесс проектирования и способные порождать объектно-ориентированные САПР конкретных производств.

В нынешнее кризисное время совершенно очевидно, что без автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства, автоматизированного управления ресурсами предприятия и производством в целом выжить предприятию в условиях острой конкуренции и ограниченного фонда заработной платы весьма сложно. Можно лишь напомнить известные слова: кто не думает об автоматизации производства, тот либо ничего не проектирует и не выпускает, либо безнадежно отстал от научно-технического прогресса.

В этой и, надеемся, последующих публикациях мы познакомим читателя-электротехника с довольно известной среди специалистов САПР, хорошо зарекомендовавшей себя в машиностроении, мебельном производстве, архитектуре и других областях инженерной деятельности — интегрированной инструментальной системой автоматизированного проектирования «СПРУТ» (разработка компании «СПРУТ-ТЕХНОЛОГИЯ»). Система «СПРУТ» представляет собой операционную среду с полным набором инструментальных средств для компьютеризации инженерной деятельности, начиная от создания конструкторских САПР и заканчивая глобальными многофункциональными системами комплексной автоматизации производства.

Первый шаг в созидании автоматизированного управления производством — внедрение конструкторской САПР. Поэтому знакомство с возможностями системы «СПРУТ» мы начинаем с анализа: насколько она эффективна на конкретном производстве. Ограничимся спецификой тех предприятий,

которые связаны с производством асинхронных электрических машин (ЭМ).

Нужна ли конструкторская САПР заводам — производителям электрических машин?

К настоящему времени процесс реструктуризации подотрасли электротехнической промышленности, занимающейся производством асинхронных двигателей (АД), в основном завершен. Среди установившихся новаций и экономических тенденций, имеющих прямое или опосредованное влияние на проблему САПР АД, назовем следующие:

— сокращение численности работающих на электротехнических заводах России в 1,5—3 раза;

— растущая конкуренция за рынки сбыта между ведущими заводами при продолжающемся экономическом кризисе;

— стремление заводов резко увеличить номенклатуру выпускаемых двигателей, в том числе освоить производство двигателей, выпускавшихся бывшими республиками СССР;

— появление договоров на разработку и изготовление небольших партий наукоемких двигателей (например, для спецтехники), которыми в период плановой экономики занимались исключительно НИИ;

— ужесточившиеся требования заказчиков к срокам выполнения таких договоров;

— резкое сокращение (практически на порядок) научно-технических кадров, работающих в отраслевых НИИ электромашиностроения;

— практически полная потеря связи с отраслевыми НИИ, находящимися на территории ближнего зарубежья (поскольку мно-

гие из них, прежде всего в республиках Закавказья, попросту прекратили свое существование как научные центры;

— усиление конструкторских отделов либо КБ заводов за счет перетока части высококвалифицированных кадров из НИИ при одновременном общем сокращении численности заводских конструкторов;

— наличие на крупных заводах немалого количества слабо используемой вычислительной техники.

В условиях жесткой конкуренции налицо стремление заводов-лидеров производить «все для всех с большей рентабельностью, чем у конкурента», либо по меньшей мере, быть ведущим поставщиком в широком сегменте рынка АД. Осваиваются новые высоты вращения; новые модификации (малошумные, с повышенной надежностью, с повышенной точностью изготовления, со специальными электромеханическими характеристиками). Заводы, ранее выпускавшие двигатели общепромышленного назначения и их модификации, осваивают новые направления, выходящие за рамки понятия «модификация» с точки зрения количества изменений по сравнению с общепромышленной конструкцией: взрывозащищенные, крановые, рольганговые и т.д.

Итак, современная рыночная экономика требует быстрого, качественного, экономичного, выполняемого собственными силами проектирования, причем объем проектных работ существенно возрос. Уникальные решения, появляющиеся в процессе проектирования, нужно нормализовать, параметризовать, обобщать, формировать в виде баз данных и баз знаний для эффективного использования в технически сходных задачах. Возникает и проблема приобретения математического обеспечения, поддерживающего проектирование той или иной группы электрических машин (программы расчета однофазных АД, АД с фазным ротором, расчета динамических режимов АД для сложных режимов работы и т.д.), а также организации этого обеспечения на едином информационном поле. Все это говорит не просто о желательности, а о насущной необходимости САПР АД. На возражения оппонентов, что конструкторские работы на заводе занимают лишь малую долику времени по сравнению с организацией собственно производства АД, можно лишь ответить: а зачем ограничиваться внедрением только конструкторской САПР?

Причины разрыва между теорией САПР ЭМ и использованием САПР ЭМ в производстве

Пропасть между мощными теоретическими исследованиями в области САПР ЭМ, проводившимися зарубежными и отечественными учеными все восьмидесятые годы; например [1—5], и тем, что из наработанного реализовано на Российских заводах, можно описать простой сентенцией: теория вообще есть, а использования вообще нет.

Можно назвать следующие причины, приведшие к столь плачевой ситуации:

1. Экономический кризис, наступивший как раз в период, когда логика работ в области САПР ЭМ подразумевала передачу наработок из академических лабораторий и НИИ в производство и их адаптацию в условиях конкретных предприятий.

2. Человеческий фактор: имеющиеся в конструкторских подразделениях кадры, с одной стороны, не обладают достаточными знаниями в области вычислительной техники и, с другой стороны, не хотят вносить принципиальные изменения в организацию выполнения проектных работ. Не последнюю роль играет опасение потерять рабочее место, поскольку САПР часть рутинной ручной работы берет на себя.

3. Однако самой существенной причиной, на наш взгляд, являлось отсутствие удобной объектно-ориентированной операционной среды, используя которую можно было бы соединить имеющиеся наработки в интегрированную САПР АД, использующую единую информационную платформу.

Иными словами, первый столп САПР АД — объектно-ориентированное математическое обеспечение (концептуальные основы автоматического проектирования АД; методики всевозможных расчетов; наработки в области графической формализации узлов, деталей и элементов деталей АД; базы данных, необходимые в процессе проектирования и т.п.) — был создан и ныне декларируется как самодостаточный. Исключение составляют, на первый взгляд, только слабые наработки в области параметризации узлов и деталей ЭМ.

Глобальная концепция проектирования АД с перечнем основных знаний, которые могут быть использованы при проектировании (программы расчета, базы данных, базы знаний) может иметь вид, представленный на рис.1.

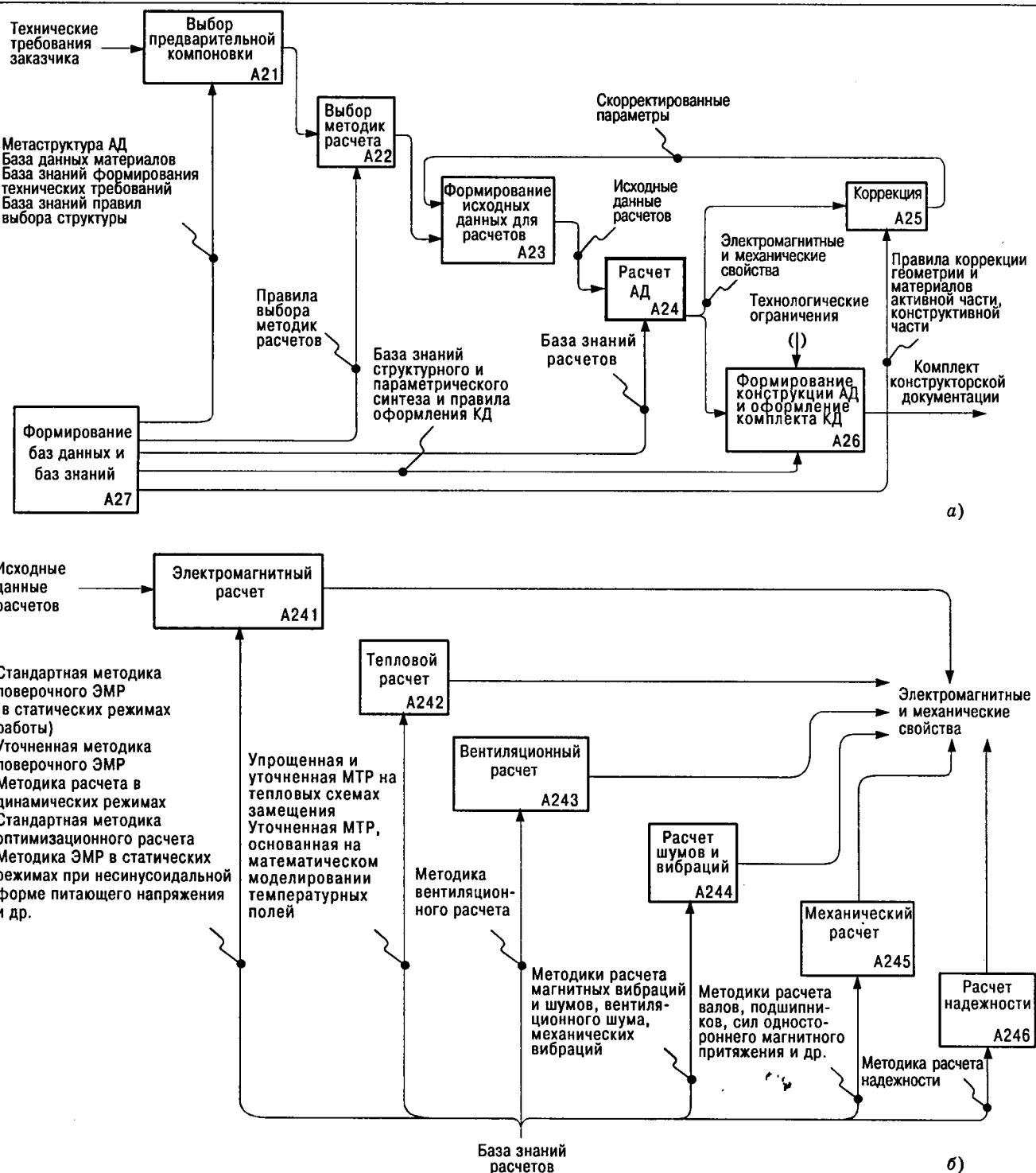


Рис.1. Этапы проектирования АД с основным перечнем баз данных и баз знаний (а) и перечень основных методик расчета, используемых при проектировании АД (б)

Второй же столп САПР — инструментальное и информационное компьютерное обеспечение (собственно ВТ с соответствующей периферией, операционная система, наличие мощных графических редакторов, «объектно-дружелюбный» интерфейс и т.п.) — существенно отставал от первого. Лишь в последнее время с появлением таких программных продуктов, как AutoCAD R14, Autodesk

Mechanical Desktop, Pro/ENGINEER положение начало несколько меняться.

Именно поэтому, как правило, арсенал математического обеспечения конструкторских подразделений электротехнических заводов и НИИ представляет собой разрозненные методики расчета ЭМ, написанные в разное время, под разные ЭВМ, на разных версиях разных, ныне устаревших языков програм-

мирования. Они не имеют надлежащего сервиса, трудно дополняемы и модифицируемы, не охвачены единым методологическим подходом. Архивы предприятий представляют собой сотни полурастянутых папок с комплектами чертежей, по которым удобно изучать историю завода, но их трудно использовать в повседневном проектировании.

Самодостаточность собственно математического обеспечения САПР АД вне компьютерной инструментальной среды иллюзорна, поскольку операционная среда, с одной стороны, неизбежно налагает свои ограничения и диктует свои правила. Система «СПРУТ» при проектировании физического объекта, в нашем случае АД, требует его представления в виде особой мета-модели, удобной для процедур анализа и синтеза в соответствующих подсистемах «СПРУТ». Построение мета-модели предваряется представлением физического объекта в виде объекта-функции (рис.2). Объект-функция и мета-модель физического объекта являются фундаментом концептуального проектирования в системе «СПРУТ». С другой стороны, система будет подсказывать свои решения, особенно при активном интеллектуальном интерфейсе. К примеру, реализованная как элемент САПР интеллектная последовательность поверочных электромагнитных расчетов АД в интерактивном режиме позволит в большинстве случаев отказаться от громоздких оптимизационных расчетов (тех самых задач, с которых, собственно, и начинался САПР ЭМ).

Вывод прост: с технической точки зрения внедрение САПР АД на электротехнических предприятиях связано с изысканием и приобретением интегральной операционной среды, способной органично впитать, упорядочить, дополнить и интерпретировать «под себя» имеющееся математическое обеспечение САПР АД. При этом помимо уже существующего математического обеспечения требуется разработка концептуального проектирования в конкретной САПР.

Недостатки существующих инженерных САПР

Прежде всего отметим, что нам неизвестно ни одной отечественной объектно-ориентированной интегрирующей инструментальной компьютерной системы, созданной **специально** для автоматизированного проектирования электрических машин, имеющей основной набор соответствующих подсистем

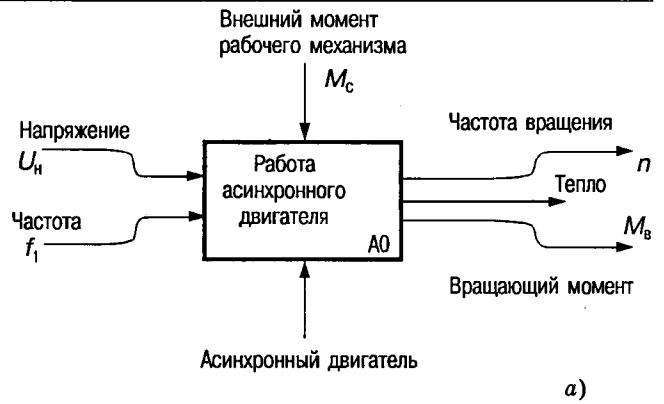
(автоматизированный анализ ТУ, интеллектуальная интерактивная система различных расчетов, автоматизированная подготовка КД с параметризацией основных узлов и деталей, твердотельное моделирование с проверкой АД на собираемость, подсистема технолога-электромашиностроителя и т.д.), и применяемой на заводах подотрасли. По крайней мере, ведущие электротехнические и компьютерные журналы о таковых не сообщают.

Но, быть может, на рынке САПР-продуктов существует универсальная инженерная САПР, содержащая, среди прочей информации, основные знания о проектировании электрических машин и способная послужить инструментом интеллектуального проектирования АД? Ответ неоптимистичен. Существующие универсальные инженерные «САПР», настойчиво предлагаемые на рынке компьютерных программ, вовсе не являются системами АПР, поскольку они не автоматизируют процесс проектирования и тем более производства. В упомянутых САПР-продуктах предлагается замена обычного кульмана компьютерным кульманом, упрощается обработка неграфической документации, возможно подсоединение внешних исполняемых модулей и это — почти все (таков перечень возможностей «легких и средних» САПР, например AutoCAD). А инженер, как принимал все решения в процессе проектирования «головой», так и принимает. Пусть даже трехмерная графика позволяет создать твердотельные модели деталей, узлов и двигателя в целом, проверяя его на собираемость; пусть модуль «Технология» продемонстрирует анимационную модель процесса обработки детали (такие возможности имеются в «тяжелых» САПР, например в Pro/ENGINEER). Все равно это весьма далеко от реального автоматического проектирования, ибо в этих системах выпадает ключевое звено — компьютеризация собственно интеллектуальной инженерной деятельности.

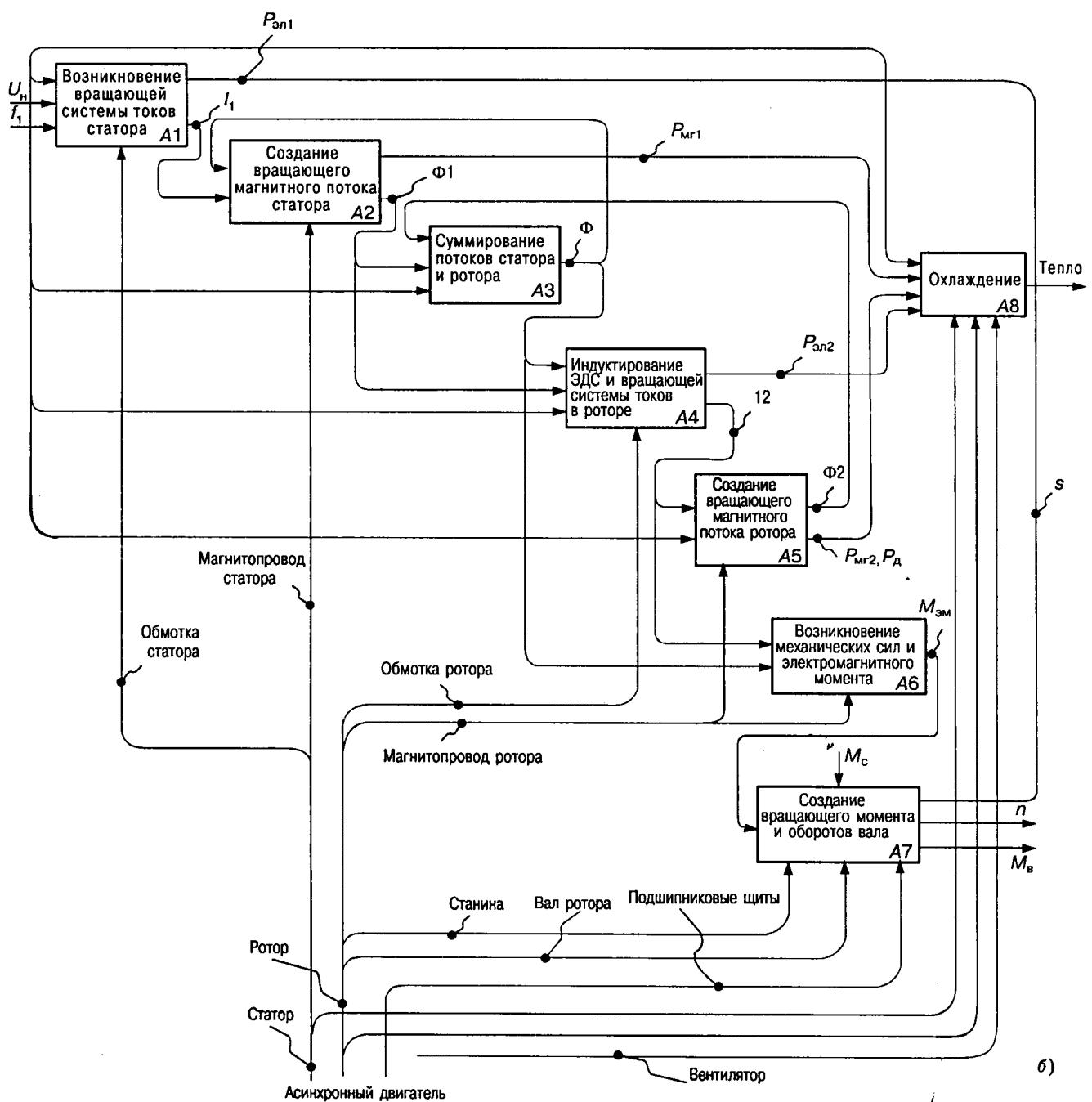
Повторим и подчеркнем: с приобретением САПР-продукта почти все решения продолжает принимать человек, а не машина. Для проектирования — это решения простейшие (на уровне лаборанта); простые (на уровне техника-чертежника); требующие средней квалификации (инженера-конструктора 3 и 2-й категорий) и, разумеется, ключевые, высокопрофессиональные решения, требующие высокой и высшей квалификации.

И если на уровне графики эти системы

все же поднимаются до уровня рядового инженера (например, автоматическое внесение изменений в соответствующие чертежи), то на уровне работы с неграфическими БЗ все остается без изменения. Например, нет программ автоматического уменьшения поля поиска решений при анализе ТЗ (поскольку это «слишком» объектно-ориентированная задача). Нет программ, динамически меняющих и автоматически предлагающих набор средств по достижению искомого результата в процессе интерактивной работы



a)



б)

Рис.2. Представление трехфазного симметричного асинхронного двигателя как «объект-функция»

проектировщика. Тем более нет динамики меняющихся весовых коэффициентов значимости тех или иных инженерных решений. Попросту говоря, методы проектирования с помощью искусственного интеллекта в этих системах практически не задействованы. Более того, в теории электрических машин упомянутые вопросы совершенно недостаточно разработаны и «на бумаге». Скорее всего оттого, что их проблематично разработать без точного представления о возможностях инструментального компьютерного обеспечения, в котором будут реализованы эти методы. Последнее еще раз говорит об иллюзорной самодостаточности математического обеспечения САПР АД.

Неразрешимая проблема коммерческих продуктов под гордым названием «Универсальная интегрированная инженерная САПР» заключается в том, что практически невозможно в принципе создать закрытую (т.е. недоступную пользователю для объектно-ориентированной настройки и органической адаптации под свое конкретное производство) систему, которая бы решала интеллектуальные задачи для всех производств или даже для производств родственных отраслей. Слишком велик и специфичен интеллектуальный багаж конкретного предприятия; суммарный багаж десятков и сотен предприятий никакая система не обобщит и не потянет. Однако, старясь быть универсальными, «тяжелые» САПР пытаются вобрать в себя как можно больше функций, которые почти никогда не используются в конкретных условиях проектирования даже на 20%.

«Тяжелую универсальную САПР» можно уподобить заводу-гиганту, способному производить 1000 видов различных изделий. Технологические процессы на заводе — жесткие или почти жесткие. Предприниматель, нуждающийся только в 20 видах изделий, покупает завод в надежде, что все они заводом выпускаются или могут выпускаться. Вскоре обнаруживается, что завод выпускает только 5 из необходимых 20 изделий, еще 5 он может освоить, а вот остальные 10 не может освоить в принципе, несмотря на свой гигантизм. И тогда разочарованный предприниматель вынужден пристраивать к заводу десяток мастерских, кустарно выпускающих остальные 10 наименований (доморощенные объектно-ориентированные мини-САПР). Либо покупать эти 10 изделий где-

то на стороне (т.е. использовать иные фирменные программные продукты и приложения). Самое парадоксальное в этой ситуации в том, что остальные 995 видов изделий, которые может выпускать завод, предпринимателю никогда не понадобятся, следовательно, большая часть вложенных средств истрачена напрасно. Переходя от сравнений к конкретике, отметим, что в условиях электротехнического производства такие мощные системы как, например, Pro/ENGINEER, едва ли будут использоваться более, чем на 30—40%, в то время как в них не содержатся собственно методы расчетного проектирования АД, тем более с помощью элементов искусственного интеллекта.

Есть ли альтернатива компьютерным кульманам и переизбыточным САПР-гигантам?

Наука САПРостроения отвечает — ЕСТЬ.

Существуют два пути.

Первый путь, когда группа высококвалифицированных специалистов, долгие годы работая на крупном производстве, разрабатывает систему автоматизации только своего конкретного производства. Система развивается, «живет» вместе с этим производством, впитывая в себя новые идеи, технические и технологические решения ведущих специалистов-производственников, с одной стороны, и базируясь на лучших достижениях из мира компьютерного обеспечения (CAD, CAM, CAPP, RAD-технологий), с другой. Ведущие специалисты производства эксперты путем определяют, какие из решений можно поручить компьютеру, а какие (являющиеся уникальными) оставить за человеком. Свои соображения они передают специалистам-программистам и те наращивают САПР предприятия.

Первый путь хорош и имеет лишь один недостаток. Большинство отечественных предприятий совершенно не охвачено комплексной автоматизацией и не приспособлено (структурно, технически, психологически, финансово) к ней, т.е. автоматизацию нужно начинать с нуля: с автоматизации процесса проектирования изделий, автоматизированного технологического контроля разработанных комплектов КД и т.д. Но кто будет заниматься разработкой реальных САПР на отечественных предприятиях? Ясно, что в нынешний кризисный период мало кто из руководителей может позволить содержать группу высококлассных программистов для

многолетней работы по созданию САПР под свое предприятие. Выхода нет?

Выход есть через второй путь: приобретение предприятием системы, которая, во-первых, специально предназначена для создания интегрированных интеллектуальных индивидуальных САПР под конкретное предприятие и, во-вторых, ориентирована на специалистов-прикладников этого конкретного предприятия (т.е. не требует введения в штат предприятия специалистов-программистов САПР). После приобретения такой системы все остальное происходит по первому сценарию: система быстро и эффективно заполняется знаниями о проектировании и производстве номенклатуры изделий конкретного предприятия, причем благодаря полной открытости и дружелюбности интерфейса, процесс настройки системы под предприятие делается своими сотрудниками самостоятельно. Лишь на первых порах требуются небольшие консультации разработчика. Развивая сравнение, приведенное в конце предыдущего раздела, уподобим систему, генерирующую индивидуальные САПР, современному заводу с чрезвычайно гибкой и многофункциональной технологией, способному в сжатые сроки организовать выпуск требуемых 20, либо немного более 20 изделий (т.е. без особых излишеств, но и без напрасно вложенных капиталов). Самое главное: если потребуется полностью сменить номенклатуру изделий — гибкая технология позволит это успешно осуществить.

Что же это за чудо-система? Единственной отечественной разработкой, позволяющей генерировать специализированные САПР для автоматизации инженерной деятельности предприятий самого разного профиля, включая электротехнические, является интегрированная инструментальная система автоматизированного проектирования «СПРУТ»

О составе комплекса «СПРУТ»

Эта статья не ставит задачу полного описания возможностей системы «СПРУТ». Во-первых, эта задача специальных компьютерных журналов, во-вторых, она перманентно решается с учетом появления новых результатов и обновления версий, например, [7—11]. Наша перспективная цель — знакомство с системой «СПРУТ» через призму со-

здания электротехнического приложения к ней и открывающимися новыми возможностями проектирования АД с использованием этой новейшей компьютерной технологии. Собственно использованию системы при проектировании АД будут посвящены последующие публикации.

Рассмотрим общую архитектуру комплекса «СПРУТ» весьма кратко. Инструментальные средства «СПРУТ» можно разделить на языковые и интерактивные, состав которых представлен на рис.3.

Языковые средства, в свою очередь, состоят из универсальных и специализированных подсистем.

Подсистемы «СПРУТ» представляют собой собственные языки сверхвысокого уровня 4-го поколения с управляемой проблемной ориентацией. Синтаксис языков максимально приближен к проблемным областям их применения и не требует квалификации в программировании. Подсистемы «СПРУТ» предназначены для разработки объектно-ориентированных приложений.

Базовый язык содержит основной набор операторов алгоритмических языков (арифметические, логические и строковые операторы присваивания, операторы циклов, условных и безусловных переходов, операторы работы с подпрограммами и процедурами, запуска внешних задач, ввода-вывода и т.п.). Общее количество операторов-функций всех подсистем превышает 600.

В базовом языке имеются операторы подключения и отключения специализированных проблемно-ориентированных подсистем «СПРУТ». Добавив такой оператор, можно подключить к работе, например, подсистему двухмерного моделирования и расчетов, что дает возможность использовать все ее функции.

SPRUT MONITOR — базовая подсистема языка «СПРУТ». В ней содержатся логические операторы, операторы передачи управления, математические функции, функции работы со строками.

SGR — подсистема базовой графики. Предназначена для вывода геометрических элементов и текста на различные типы и модели устройств графического вывода.

SETS — подсистема структур данных. Позволяет создавать объекты сложной структуры и манипулировать ими при синтезе сложных систем как единым целым.

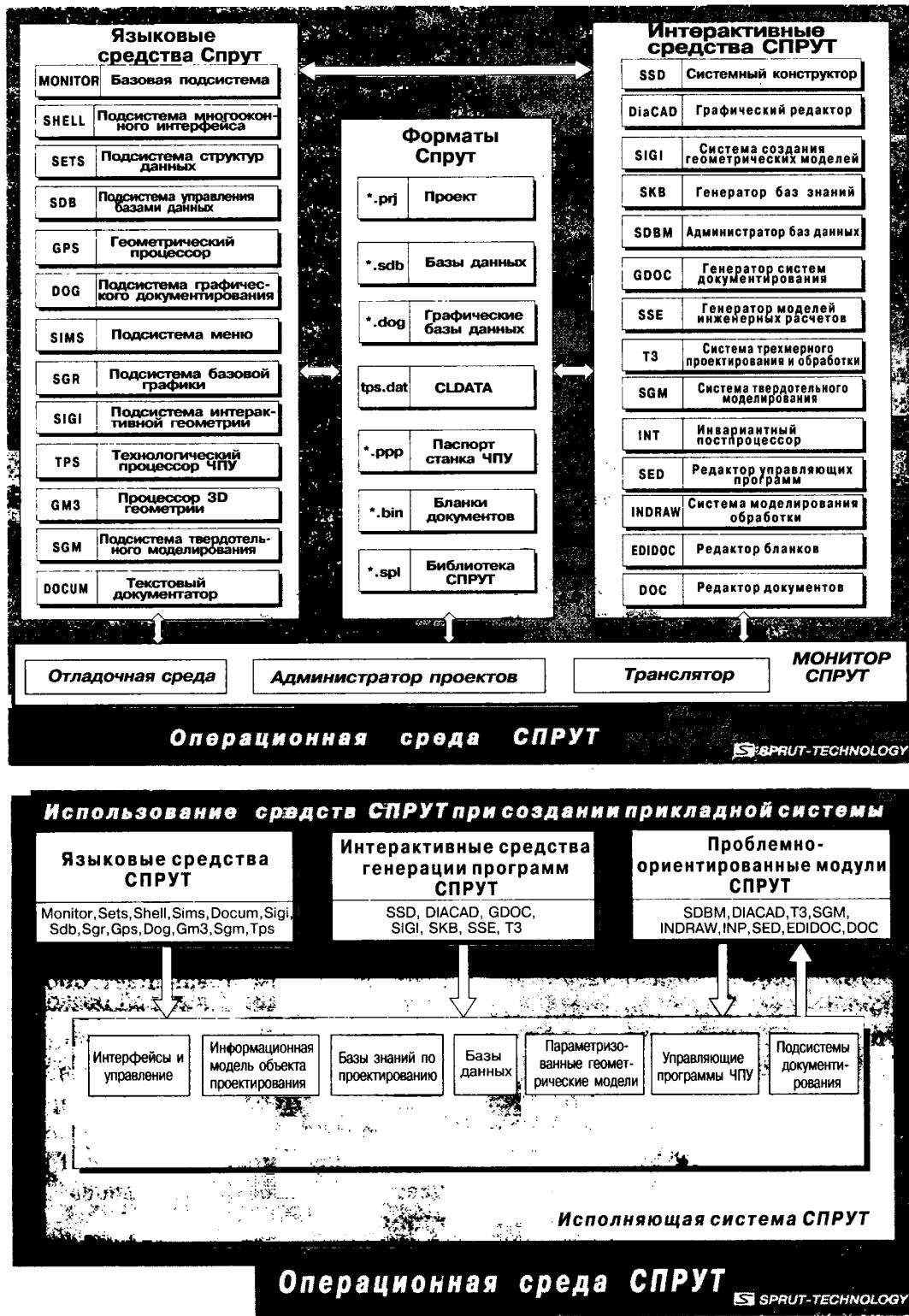


Рис.3. Состав комплекса «СПРУТ»

SHELL — подсистема многооконного интерфейса. Предназначена для создания пользовательских интерфейсов в программах проектирования и к функциям подсистем пакета «СПРУТ».

SBD — подсистема управления базами данных. Предназначена для создания и использования в программах проектирования

различных баз данных. По типу сохраняемых данных СУБД поддерживает реляционную модель.

GPS — подсистема геометрического 2D процессора. Предназначена для построения плоской геометрии и выполнения геометрических расчетов, связанных с определением на плоскости геометрических объектов,

расчетом параметров их взаимного расположения, модификаций этих объектов и создания геометрических моделей.

DOG — подсистема графического документирования. Предназначена для создания чертежей как результата программ автоматизированного проектирования и организации работ с графическими объектами в базах данных.

SIGI — подсистема интерактивного ввода 2D геометрии. Обеспечивает интерактивный интерфейс к функциям подсистемы «Геометрический процессор». Работа с геометрическими объектами ведется на экране в многооконном режиме. За счет глубокой интеграции со всеми подсистемами пакета на ее основе можно создавать специализированные оболочки локальных САПР.

SGM — подсистема твердотельного моделирования. Является объектно-ориентированным геометрическим ядром моделирования, разработанным для использования как базовой геометрии внутри трехмерных прикладных программ моделирования.

TPS — технологический процессор ЧПУ. Предназначен для описания процесса обработки детали на станке с ЧПУ, реализует набор функций по расчету траектории движения инструмента при различных его перемещениях и выполнение технологических команд. Позволяет выполнять 2D и 3D обработку контуров и поверхностей с учетом формы режущего инструмента.

SBD — подсистема управления базами данных. Предназначена для создания и использования в программах проектирования различных баз данных. По типу сохраняемых данных СУБД поддерживает реляционную модель.

Некоторые интерактивные инструментальные средства «СПРУТ».

Система интерактивного проектирования экранных форм SSD. В процессе работы с этой системой пользователь в интерактивном режиме (т.е. не программируя) создает структуру, скелет и даже лицо своей прикладной САПР-программы. Иными словами, занимается глобальной компоновкой и компьютерным дизайном прикладной САПР.

Графическая подсистема DiaCAD имеет максимально дружественный интерфейс для создания двумерных геометрических моделей, чертежей и манипуляции их элементами. В среде DiaCAD можно создавать иерархические графические базы данных (напри-

мер, БД «сборочный чертеж АД»; БД «статор обмотанный»; БД «статор необмотанный» и т.п.); компоновать новый чертеж из имеющихся фрагментов (выбирать нужные детали из БД «вал»; БД «бочка ротора»; БД «подшипниковый щит»; БД «станина» и т.д.); пополнять в процессе эксплуатации базы данных новыми решениями. Среда графического редактирования имеет возможность интеллектуального редактирования, когда система автоматически откорректирует весь чертеж, если изменяется какой-либо размер. Интеллектуальное редактирование особенно удобно для нередких в электромашиностроении случаев, когда заказывается модификация АД одной высоты вращения (в которой, например, вал и подшипниковые щиты разрабатывались заново), затем заказывается функционально идентичная модификация другой высоты вращения. Интеллектуальное редактирование здесь срабатывает дважды: во-первых, вновь разработанные детали появятся во всех необходимых чертежах (например, вал в чертеже «ротор в сборе» и сборочном чертеже); во-вторых, идеи, воплощенные при разработке новых деталей для первого габарита, параметрически воплотятся в разработку другого габарита. В результате за счет накопления знаний и материализации опыта в 5—10 раз сокращается трудоемкость повторного выполнения аналогичной работы.

Генератор экспертных систем — подсистема SKB предназначен для компьютеризации инженерных знаний. Система SKB позволяет инженерам осуществлять компьютеризацию своих знаний без помощи программистов.

О каких инженерных знаниях идет речь? Практически о всех формах и разновидностях, начиная от легко формализуемых, заканчивая трудно формализуемыми, полуэвристическими знаниями. В основу системы заложены методы искусственного интеллекта. Пользователю предоставляется возможность самому вводить свои знания в компьютер в форме, максимально приближенной к той, что используется в инженерных книгах и методиках. Пользователь описывает элементы знаний (правила) с указанием условий их использования, а система самостоятельно решает, когда и как их нужно применять для решения конкретной задачи проектирования.

Подсистема SKB в числе других задач позволяет сохранять уникальный опыт ведущих специалистов, в том числе и не владеющих компьютером. Руководителям предприятий хорошо известна проблема: ведущие специалисты, покидая организацию, уносят с собой бесценное сокровище — фирменный инженерный опыт, не вошедший в руководства по проектированию и методики расчета. Например, специалист, долго трудившийся над оптимизацией однофазных АД, хорошо «чувствует», в каком случае для обеспечения роста пускового момента более эффективным окажется уменьшение сечения стержня ротора или короткозамыкающего кольца, в каком — увеличение удельного сопротивления заливки, в каком — увеличение емкости пускового конденсатора, в каком — увеличение числа витков вспомогательной фазы. С уходом специалист уносит с собой высокопрофессиональное ощущение объекта проектирования, ощущения, о котором мы не прочтем ни в одном учебнике. Подсистема SKB позволяет избежать потери уникальных знаний, сохраняя их в виде естественно формируемых модулей и методов [10].

Фрагмент интерфейса подсистемы SKB показан на рис.4

Генератор инженерных расчетов — подсистема SSE. На основе механизма электронных таблиц заложена возможность пошаговой отладки и последующего автоматизированного формирования расчетных моделей. Особенно эффективно применение SSE при описании функционально-параметрических связей в сборочных чертежах и реализации инженерных расчетов в конструкторских САПР.

Генератор систем тексто-графического документирования — подсистема SGD — это комплекс средств автоматизации создания и заполнения разнообразных документов (спецификаций, маршрутных, операционных карт и т.д.).

Помимо названных интерактивных средств к таковым в системе «СПУРТ» относится целый набор других программ и утилит.

Следует также упомянуть такие прикладные средства «СПУРТ», как среда технologa, среда технолога-программиста, подсистемы для подготовки управляющих программ для различных типов станков с ЧПУ и др. В среде технолога создается система техно-

логической подготовки производства. Программный комплекс позволяет по результатам анализа объектов производства и классификации технологических решений создать проектно-зависимую базу данных и базу знаний правил выбора технологических решений в зависимости от входных условий. Конечный продукт здесь — маршрутно-операционная технология.

Беглый взгляд на перечень подсистем и интерактивных инструментальных средств говорит об их полноте с точки зрения расчетчиков-, конструкторов- и технологов-электромашиностроителей.

Выводы

1. Увеличение номенклатуры выпускаемых электротехнических изделий, необходимость уменьшения сроков их постановки на производство, повышенные требования к экономичности и сокращение работающего персонала диктуют необходимость внедрения в производство комплексной системы конструкторско-технологического САПР.

2. Основной технической причиной задержки внедрения на заводах — производителях электрических машин комплексной системы автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства является отсутствие на них единой интегрированной мета-инструментальной среды, способной обобщить, развить и реально перевести в «автоматизированное русло» богатейший опыт ведущих специалистов-электромашиностроителей.

3. Современные универсальные системы АПР не решают задач компьютеризации инженерной деятельности на уровне экспертиных решений, поскольку не используют методы искусственного интеллекта. Несмотря на переизбыточность функциональных возможностей «тяжелых» САПР, они не учитывают особенностей конкретных производств, с другой стороны конкретному производству и не нужна функциональная перенасыщенность САПР, поэтому «тяжелые» весьма дорогие САПР используются на производствах максимум на 20%.

4. Существующий богатый математический арсенал в области САПР АД нельзя считать самодостаточным, поскольку его полнота может быть относительно завершенной при привязке к конкретной компьютерной мета-инструментальной системе.

5. Наиболее экономически целесообразным вариантом реализации опыта и потреб-

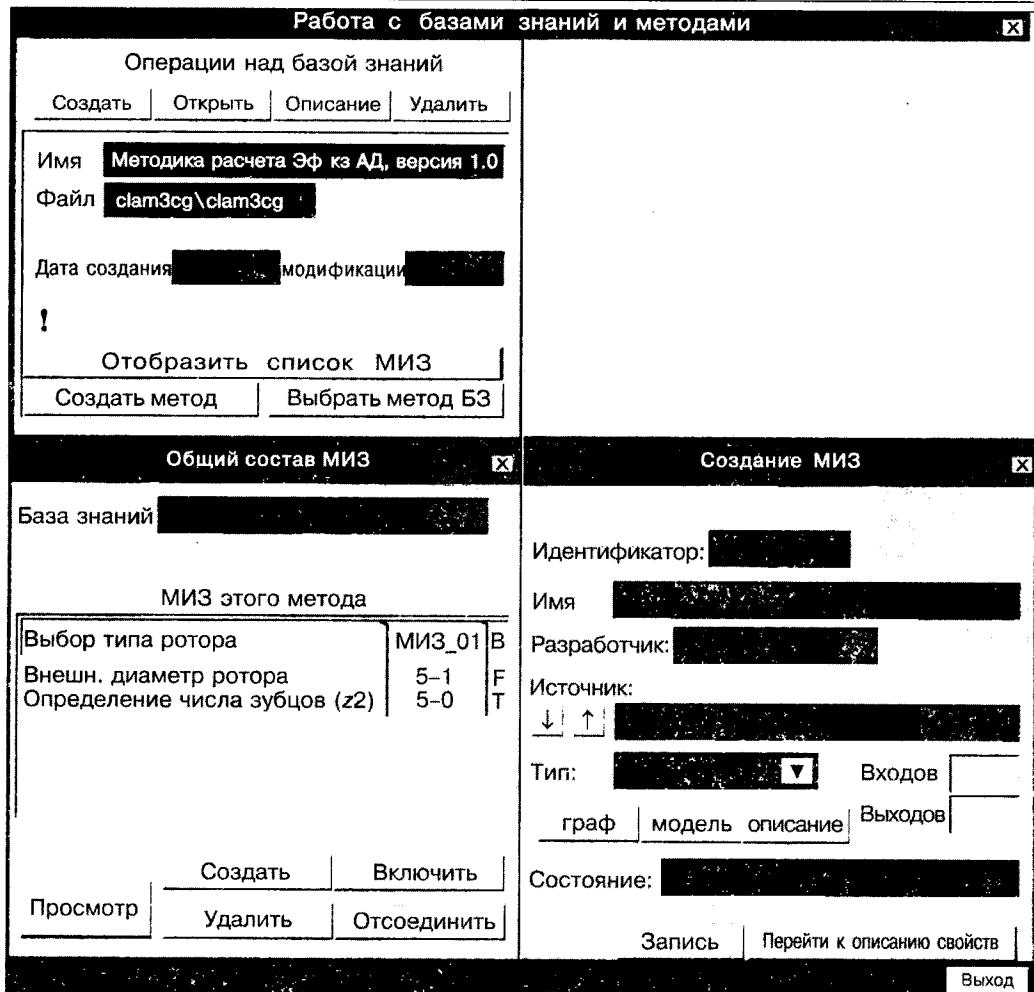


Рис.4. Фрагмент интерфейса подсистемы SKB

ностей предприятия с позиций САПР является приобретение открытой мета-инструментальной системы, способной генерировать объектно-ориентированные САПР под конкретное производство.

6. Единственной отечественной разработкой, не имеющей зарубежных аналогов, позволяющей генерировать объектно-ориентированные САПР для конкретных предприятий, является система «СПРУТ». Интегрированная инструментальная система автоматизированного проектирования «СПРУТ» содержит полный набор средств автоматизации инженерного труда и позволяет осуществить автоматизацию как отдельных аспектов инженерной деятельности (конструкторское, технологическое проектирование), так и комплексную автоматизацию производства в целом.

7. Стоимость инструментальных средств системы «СПРУТ» значительно ниже функционально аналогичных средств, представленных на рынке САПР (в тех подсистемах,

где таковые аналоги имеются).

Система не предъявляет высоких требований к производительности компьютеров.

8. Работа с системой не требует специальных знаний в области системного и прикладного программирования и специально ориентирована на ее использование специалистами-прикладниками конкретных предприятий. Время обучения персонала работе с системой весьма непродолжительно.

9. Принципиальное качество «СПРУТ» — это открытая, саморазвивающаяся система. При появлении на предприятии новых производств и технических решений средства их автоматизации можно создавать как самостоятельные или интегрированные САПР в среде «СПРУТ» независимо от разработчиков компании «СПРУТ—ТЕХНОЛОГИЯ».

10. Главное преимущество работы в среде «СПРУТ» при появлении новых объектов проектирования: инженер концентрирует свое внимание не на рутинной работе программирования процесса проектирования, а

на концептуальной формализации задачи проектирования нового объекта.

11. Вновь созданные САПР в среде «СПРУТ» пользователями-прикладниками конкретных предприятий становятся интеллектуальной собственностью данных предприятий и могут представлять интерес на рынке САПР-продукции.

12. Работа с системой принципиально сокращает сроки приобретения реальных навыков проектирования у молодых специалистов.

Список литературы

1. Терзян А.А. Автоматизированное проектирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Кулон Ж.-Л., Сабонадье Ж.-К. САПР в электротехнике. М.: Мир, 1988.
3. Кулон Ж.-Л., Сабонадье Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989.

4. Аветисян Д.А. Основы автоматизированного проектирования электромеханических преобразователей. М.: Высшая школа, 1988.

5. Орлов И.Н., Маслов С.И. Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств. М.: Энергоатомиздат, 1989.

6. Тазов Г.В., Хрущев В.В. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

7. Крючков А. Новая технология автоматизированного решения инженерных задач// Компьютер-Пресс. 1997. № 3. С. 234—242.

8. Печенкин А. Система конструкторско-технологической подготовки производства//Компьютер-Пресс. 1997. № 2. С. 244—248.

9. Евгеньев Г. Новые горизонты проектирования — от концептуального до технологического// Компьютер-Пресс. 1997. № 6. С. 226—231.

10. Евгеньев Г., Безбородов В. Компьютеризация инженерных знаний//САПР и графика, декабрь, 1977. С. 69—74.

11. Крючков А., Евгеньев Г. Еще раз о прогрессивных технологиях автоматизации предприятий//САПР и графика. 1998. № 3. С. 58—64.

Подогрев воздуха в межреберных каналах серийных электродвигателей

КУХАРСКИЙ М.П., канд.техн.наук

ВНИПТИЭМ

Выполнен анализ факторов, определяющих подогрев воздуха в межреберных каналах станины. У каждой из выделенных групп серийных двигателей имеется индивидуальный уровень подогрева. Метод расчета необходимого количества воздуха по значению подогрева воздуха можно применять при разработке серийных асинхронных двигателей подобной конструкции.

Работы по совершенствованию охлаждения электродвигателей закрытого исполнения сводятся по существу к обеспечению допустимого перегрева активных узлов машин при минимальном расходе охлаждающего воздуха. Минимальный расход обеспечивается в том случае, если при прохождении воздуха по межреберным каналам станины количество воспринимаемого им тепла соответствует его теплоемкости. При этом между температурой воздуха на входе и на выходе из каналов возникает перепад температур или как его называют подогрев воздуха ΔT . Степень подогрева воздуха в межреберных каналах определяется соотношением между значением греющих потерь и количеством протекающего воздуха и описывается формулой [1]:

$$\Delta T = \frac{\Sigma P}{c_p Q} = \frac{P_2(1 - \eta)}{c_p Q}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где ΣP — греющие потери двигателя, кВт; η — КПД двигателя; P_2 — мощность двигателя, кВт; Q — количество необходимого воздуха, $\text{м}^3/\text{s}$; c_p — удельная объемная теплоемкость воздуха при заданной температуре, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{С}^\circ)$.

Теплоемкость воздуха слабо зависит от температуры и может приниматься постоянной и равной $1020 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{С}^\circ)$ (при температуре 40°C).

На серийных двигателях с увеличением габарита машины возрастает не только ее мощность и греющие потери, но также ее КПД и количество воздуха, поступающего на охлаждение машины. В связи с этим актуальным становится вопрос о том, как меняются значения всех этих параметров с изменением габарита машины.

Далее этот вопрос рассматривается на примере двух- и четырехполюсных общепромышленных асинхронных двигателей серии

Таблица 1

Параметры двигателей 4А старших габаритов и результаты измерений расхода воздуха

2p = 2								2p = 4							
H, мм	P ₂ , кВт	η	ΣP, кВт	Q, м ³ /с	ΔT, °C	Q _p ', м ³ /с	Q _p /Q	P ₂ , кВт	η	ΣP, кВт	Q, м ³ /с	ΔT, °C	Q _p ', м ³ /с	Q _p /Q	
250	90	0,920	7,20	0,950	7,45	0,880	0,93	90	0,930	6,30	0,706	8,75	0,666	0,865	
225	55	0,910	4,95	0,610	8,95	0,605	0,99	55	0,925	4,10	0,498	8,10	0,435	0,870	
200	37	0,900	3,70	0,476	7,60	0,410	0,86	37	0,910	3,32	0,323	10,10	0,350	1,08	
180	30	0,905	2,85	0,355	7,85	0,350	0,99	30	0,910	2,70	0,273	9,70	0,285	1,04	
160	18,5	8,885	2,13	0,233	8,90	0,260	1,11	18,5	0,900	1,95	0,187	9,70	0,195	1,03	

 $\Delta T_{cp} = 8^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{cp} = 9,67^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Параметры двигателей серии 4А младших габаритов и результаты измерений расхода воздуха

2p = 2								2p = 4							
H, мм	P ₂ , кВт	η	ΣP, кВт	Q, м ³ /с	ΔT, °C	Q _p ', м ³ /с	Q _p /Q	P ₂ , кВт	η	ΣP, кВт	Q, м ³ /с	ΔT, °C	Q _p ', м ³ /с	Q _p /Q	
100	5,5	0,875	0,690	0,066	10,55	0,070	1,06	4,00	0,840	0,660	0,044	14,2	0,0493	1,120	
90	3,0	0,845	0,450	0,050	9,15	0,047	0,94	2,20	0,800	0,440	0,036	12,0	0,0340	0,920	
80Б	2,2	0,830	0,373	0,039	9,40	0,038	0,97	1,50	0,770	0,345	0,029	13,0	0,0266	0,985	
71Б	1,1	0,770	0,225	0,029	9,30	0,025	0,96	0,75	0,720	0,210	0,0176	11,6	0,0162	0,920	

 $\Delta T_{cp} = 9,6^{\circ}\text{C}$ $\Delta T_{cp} = 12,7^{\circ}\text{C}$

4А габаритов 250—160 и 100—71 мм. Верхний отрезок серии разрабатывался ВНИПТИЭМ (г. Владимир), нижний — Харьковским электромеханическим заводом при участии лаборатории ОЛАТЭМА Харьковского авиационного института. При разработке двигателей каждого отрезка удалось более или менее оптимизировать системы их охлаждения и соблюсти принцип геометрического подобия конструкции двигателей разных габаритов. Расход воздуха для их охлаждения определялся в аэродинамических камерах с наддувом во ВНИПТИЭМ и ОЛАТЭМА.

Из табл.1 видно, что на отрезке 250—160 мм с уменьшением мощности двигателей в 4,3 раза греющие потери уменьшаются в 3,5 раза, но одновременно в 4 раза уменьшается количество подаваемого на охлаждение воздуха, причем эти зависимости имеют линейный характер. Иначе говоря, количество подаваемого воздуха прямо пропорционально греющим потерям на всем отрезке серии. Влияние других факторов, кроме скорости вращения, находится, очевидно, в пределах точности измерений.

У двигателей габаритов 100—71 мм (табл.2) с уменьшением греющих потерь в 3,5 раза расход воздуха снижается в 2,3—2,5 раза, т.е. меньше, чем в первом случае. Это различие между двигателями старших

и младших габаритов объясняется, по-видимому, тем, что у первых значительная доля тепла отводится от станины не конвекцией, а радиацией, значение которой определяется площадью поверхности теплоотдачи и разностью температур, а не расходом воздуха. Кроме того, точность определения расхода воздуха и размер выборки меньше, чем в предыдущем случае.

Эти данные позволили рассчитать по формуле (1) подогрев воздуха на всех двигателях габаритов 250—160 и 100—71 мм разной полюсности, а также значение среднего подогрева для каждого отрезка и полюсности ΔT_{cp} . Как видно, в пределах каждой группы двигателей подогрев воздуха не зависит от габарита двигателя и является постоянным. Отклонения от среднего по группе значения подогрева, как правило, не превышают 1°C. Этот интересный результат экспериментально получен здесь впервые и указывает на высокую степень оптимизации параметров вентиляционных систем, особенно на двигателях старших габаритов, а также на удовлетворительное соблюдение принципа геометрического подобия в пределах каждой группы двигателей.

Каждая из рассматриваемых групп двигателей имеет свой уровень подогрева воздуха. Эти уровни различаются максимально в 1,6 раза. У двухполюсных двигателей

они ниже, чем у четырехполюсных, что естественно, поскольку у первых большие расход и скорость воздуха. Разница в уровнях подогрева воздуха между двух- и четырехполюсными двигателями младших габаритов больше, чем у двигателей старших габаритов. Это, очевидно, обусловлено тем, что на двигателях младших габаритов разной полюсности применяются вентиляторы одинакового диаметра, а на двигателях старших габаритов у двухполюсных машин диаметры вентиляторов меньше, чем у четырехполюсных.

Знание средних значений в пределах групп подогревов позволяет в случае необходимости рассчитывать количество воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$) для любых двигателей соответствующих габаритов по формуле:

$$Q_p = \frac{p_2(1 - \eta)}{c_p \Delta T_{cp}} . \quad (2)$$

В табл. 1 и 2 приведены значения расчетных расходов воздуха Q_p при соответствующих средних подогревах ΔT_{cp} , а также отношения расчетных расходов к фактическим. Для всех групп двигателей расхождение между этими значениями составляет в среднем 6%, что соизмеримо с точностью определения расходов воздуха на аэродинамических камерах. Методика фактически учитывает совершенство конструкции вентиляционного узла, поскольку улучшение конструкции всегда сопровождается повышением КПД вентилятора и, соответственно, двига-

теля. Так, у двигателей более совершенной серии АИР с вентиляционным узлом улучшенной конструкции (диаметр вентиляторного кожуха меньше диаметра оребрения станины [2]) необходимый и достаточный расход воздуха оказался на 15—25% меньше, чем у двигателей серии 4А [3], что и подтвердили расчеты по данной методике. При этом потребляемая на охлаждение мощность уменьшилась более, чем в 2 раза. Очевидно, полученные значения средних подогревов можно использовать при расчетах количества воздуха, необходимого для охлаждения закрытых асинхронных двигателей новых серий, частотно-регулируемых двигателей с независимой вентиляцией и т.п. Единственным серьезным условием применения этого метода является соблюдение более или менее полного геометрического подобия конструкции станин всех систем охлаждения или с двигателями серии 4А, или, лучше с двигателями улучшенной серии АИР.

Список литературы

- Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэrodinamika и теплопередача в электрических машинах. М.: Энергия, 1974.
- Пат. RU2040846 С1./Г.М.Ефимов, М.П.Кухарский, С.В.Мартынов. Вращающаяся электрическая машина с воздушным охлаждением//Открытия. Изобретения. 1995. № 21.
- Кухарский М.П., Кривошеев Б.Н. Структура воздушного потока в межреберных каналах станины//Электротехника. 1991. № 5.

Разработка и исследование независимой вентиляции лифтовых двигателей

АФОНИН В.И., канд.техн.наук

ОАО «ВЭМЗ»

Двухскоростные асинхронные лифтовые двигатели (в дальнейшем именуемые двигатели), работающие в условиях повторно-кратковременного режима с большим числом включений и электрическим торможением, дополнительными маховыми массами и статической нагрузкой на валу требуют интенсивного охлаждения. В зависимости от числа включений и продолжительности работы в двигателях применяется самовентиляция или принудительное охлаждение с помощью вентиляторов-наездников (независимая вентиляция).

Как показали опыты, принудительная система воздушного охлаждения является эффективной и обладает большими преимуществами по сравнению с самовентиляцией.

В табл. 1 приведены значения требуемого для лифтового двигателя расхода охлаждающего воздуха и расчетные аэродинамические сопротивления двигателей.

При этом количество воздуха в случае принудительного охлаждения обеспечивается приводным двигателем с частотой вращения 25 с^{-1} .

При работе лифтовых двигателей большая

Таблица 1

Габарит	Расход охлаждающего воздуха, м ³ /с		Сопротивление, Па·с ² м ⁶
	до 150 вкл/ч (самовентиляция)	свыше 150 вкл/ч (независимая)	
160	0,060	0,110	10000
180	0,065	0,160	10000
200	0,090	0,220	5000
225	0,125	0,360	4000
250	0,135	0,420	2000

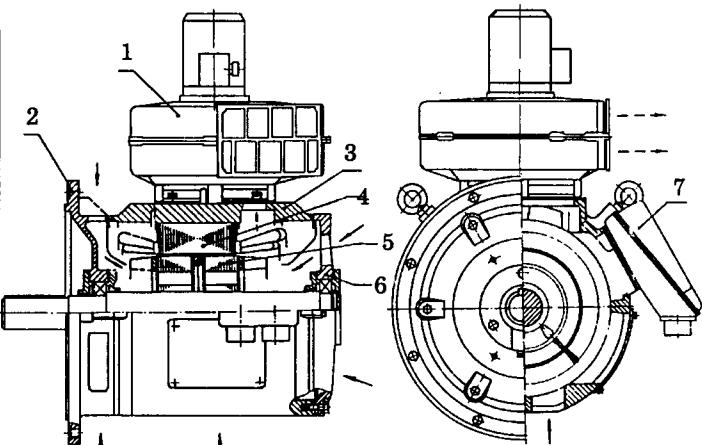


Рис.1. Лифтовый двигатель с принудительной вытяжной симметричной вентиляцией:

1 — вентилятор-наездник; 2 — щит подшипниковый фланцевый; 3 — станина; 4 — статор с обмоткой; 5 — ротор; 6 — щит подшипниковый задний; 7 — вводное устройство

часть тепла выделяется в роторе. Наблюдения показали, что перепад температуры воздуха между входом и выходом достигает максимума в момент пуска после очередной остановки двигателя. В период остановки двигателя тепло от активных частей отдается неподвижному воздуху слабо и после температур в активных частях выравнивается. С пуском двигателя из него выходит воздух, нагретый во время остановки, а теплоотдача улучшается при высокой температуре поверхности активных частей. Очевидно, что система охлаждения должна предотвращать перегрев воздуха и интенсифицировать теплоотдачу от активных частей двигателя во время остановок. Эти условия наиболее полно выполняются при радиальной симметричной всасывающей системе охлаждения с дополнительным вентилятором-наездником, обеспечивающим охлаждение во время остановок двигателя и интенсификацию охлаждения во время его работы.

Схема вентиляции. На лифтовых двигателях габаритов 180 и более целесообразно применять систему принудительного охлаждения по рис.1. Сплошными стрелками показано направление входа охлаждающего воздуха, а пунктирными — выхода. Охлаждающий воздух всасывается внутрь двигателя через окна в подшипниковых щитах и в нижней части станины, омывает сердечник статора и лобовые части обмоток статора, проходит по каналам между сердечником статора и станиной в камеру вентилятора-наездника и выбрасывается им из электродвигателя.

Конструкция вентиляторов. Ориентируясь на конструкции вентиляторов-наездников современных лифтовых двигателей [1] спроектирован и испытан ряд колес одинаковой двухдисковой конструкции (рис.2) с диаметром D_h по внешним кромкам лопа-

ток, диаметром D_{bh} по внутренним и с различной формой лопаток и их пространственной ориентацией. Отношение D_h/D_{bh} принимается в пределах 1,25—1,45. Лопатки трапециевидной формы, профилированные и обладают большой прочностью на изгиб.

Расчет вентиляторов произведен по методике, изложенной в [2—4]. Диск на входе воздуха выполнен в форме кольца, имеет диаметр большой D_{bh} , и, связывая лопатки, уменьшает их вибрацию. Входной патрубок выполнен цилиндрическим и заведен внутрь колеса (на $0,01D_h$), что способствует ориентации воздушного потока в нужном направлении и уменьшению потерь в вентиляторе. Ширина центробежного вентилятора при выбранном по конструктивным соображениям диаметре вентилятора D_h может быть ориентировочно определена по формуле:

$$B = \frac{1 \div 1,2}{D_h \sqrt{Z}},$$

где Z — аэродинамическое сопротивление двигателя.

Для ориентировочного выбора числа лопаток может быть рекомендована формула:

$$N_l = (4 \div 6) \frac{D_h}{D_h - D_{bh}}.$$

Рекомендуемые значения основных размеров узлов независимой вентиляции лифтовых двигателей габаритов 160—250 приведены в табл.2.

Кожухи для всех колес имеют одинаковую, геометрически подобную форму (рис.2)

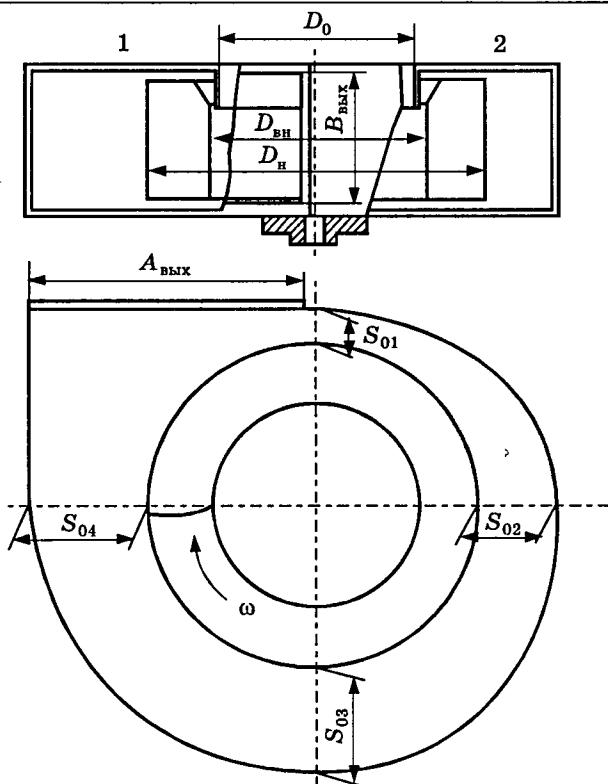


Рис.2. Геометрия центробежного вентилятора:
1 — колесо; 2 — корпус

с раскрытием спирали на входе $S_{04}=0,45D_n$. При определении размеров спирали кожуха руководствовались следующими эмпирическими формулами: $S_{01}=0,09+0,10$; $S_{02}=0,20+0,22$; $S_{03}=0,32+0,35$; $S_{04}=0,43+0,46$. Диаметр отверстия для входа воздуха выбирается равным $D_0 \approx 0,95D_{вн}$. Сечение отверстия для выхода охлаждающего воздуха (из вентилятора) должно быть, как минимум, на 15—20% больше сечения входа воздуха (в вентилятор).

На стадии проектных работ были изготовлены образцы вентиляторов-наездников для двигателей габаритов 180, 225 и 250 мм.

Вентиляторы отличались размерами колеса, формой лопаток, а также частотой вращения.

Исследование вентиляторов проводилось по методике, изложенной ниже¹.

Методика испытаний. Испытания вентиляторов-наездников лифтовых двигателей проводились с помощью калиброванного вентилятора с коллектором. На аэродинамической установке с поддувом была предварительно снята напорная характеристика вентилятора с коллектором диаметром 100 мм, установленным на входе (кривая 2, на рис.3).

При испытании на всасывание между двигателем и вентилятором устанавливалась небольшая промежуточная камера со штуцером для измерения давления и в нее вводился коллектор калиброванного вентилятора. Через штуцер на камере измерялось разряжение, создаваемое вентилятором за счет аэродинамического сопротивления двигателя (H_2). На коллекторе измерялось суммарное разряжение, создаваемое в машине и в коллекторе (H_1). Чтобы узнать разряжение, создаваемое коллектором и определяющее расход через него, нужно из разряжения на коллекторе вычесть разряжение в камере:

$$H_v = H_1 - H_2.$$

В нашем случае за расчетное давление принималось давление в камере и аэродинамическое сопротивление двигателя определяется по формуле

$$Z = \frac{H_2}{Q^2}.$$

Для косвенного определения рабочего расхода воздуха через двигатель Q_p при использовании на нем постоянного вентилятора на аэродинамическом стенде была снята напорная характеристика этого вентилятора (кривая 1, на рис.3). Затем по этой характеристике, зная соответствующее аэродинамическое сопротивление сети двигателя, графически определяется расход воздуха Q_p , как абсцисса точки пересечения напорной харак-

¹ Исследования проводились под руководством и при участии канд.техн.наук М.П.Кухарского во ВНИПТИЭМ (г.Владимир).

Таблица 2

Габарит, мм	160	180	200	225	250
Диаметр входного отверстия, мм	100—120	100—120	130—150	150—170	160—180
Внутренний диаметр колеса, мм	100—120	100—120	130—150	150—170	160—180
Наружный диаметр колеса, мм	130—150	130—150	200—220	220—240	240—260
Ширина колеса, мм	60—80	80—100	80—100	100—120	100—120
Число лопаток колеса вентилятора			16; 18; 24; 27; 32; 36		
Ширина спирального кожуха, мм	80—100	90—110	90—120	120—140	120—140
Сечение для выхода воздуха, дм ²	1,25—1,55	1,45—1,75	1,55—1,85	2,20—2,70	3,0—3,3
Мощность приводного двигателя (25 с ⁻¹), кВт	0,12	0,18	0,25	0,37	0,55

теристики вентилятора с характеристикой вентиляционной сети.

Результаты испытаний. На рис.4 и 5 приведены экспериментальные напорные характеристики вентиляторов для двигателей габаритов 180 и 225 мм. Наилучшие аэродинамические характеристики имеют вентиляторы 4A и 4B (при $\omega = 50 \text{ c}^{-1}$) и 5B и 5G (при $\omega = 25 \text{ c}^{-1}$). Эти вентиляторы создают высокое давление для преодоления аэродинамического сопротивления вентиляционной сети двигателя и обеспечивают требуемый расход охлаждающего воздуха (табл.1).

Общим для всех вентиляторов (за исключением 5A) является пологий характер кривой $H = f(Q)$. Такие вентиляторы не требуют от приводных двигателей запаса по мощности.

При испытаниях было выявлено влияние формы и размеров лопаток на давление и расход воздуха.

На основании проведенных расчетов и экспериментов могут быть рекомендованы следующие размеры лопаток (табл.3).

Однако следует отметить, что помимо способности эффективно охлаждать двигатели вентилятор-наездники должны иметь приемлемый уровень шума. Это немаловажно, так как двигатели с подобными вентиляторами являются элементом главного привода пассажирских и грузовых лифтов, устанавливаемых в жилых, общественных и производственных зданиях.

В соответствии с общепринятыми в настоящее время принципами уровня шума вентиляторов определялись в восьми октавных полосах со стандартизованными среднегео-

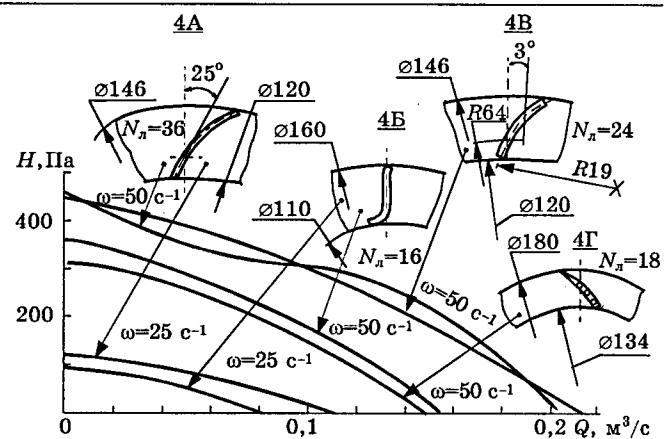


Рис.4. Напорные характеристики вентиляторов-наездников лифтовых двигателей габарита 180 мм

метрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 и 8000 Гц.

Результаты испытаний на шум лифтовых двигателей с вентиляторами-наездниками и без них приведены в табл.4.

Кроме того, были проведены испытания на шум вентиляторов с различной формой и числом лопаток (табл.5).

Процесс возникновения в вентиляторах аэродинамического шума сложен для математического описания, поэтому при выборе рациональной конструкции элементов системы независимой вентиляции лифтовых двигателей базировались на результатах их экспериментальных исследований, обобщаемых на основании теории подобия.

В результате экспериментальных исследований получена зависимость превышения температуры обмоток двигателя от расхода воздуха, подаваемого вентилятором.

Можно отметить, что повышение объем-

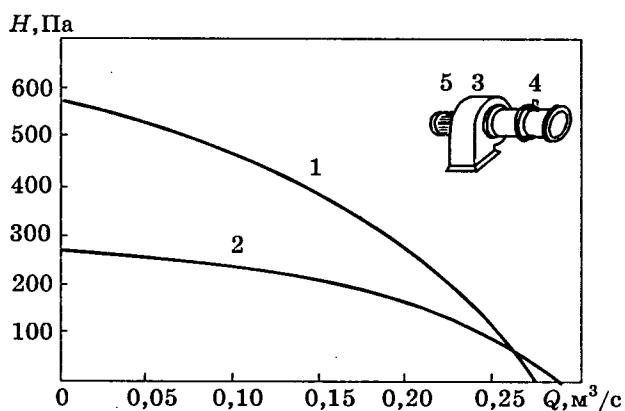


Рис.3. Напорные характеристики калиброванного вентилятора:

1 — калиброванный вентилятор; 2 — вентилятор лифтового двигателя; 3 — центробежный вентилятор; 4 — коллектор; 5 — приводной двигатель

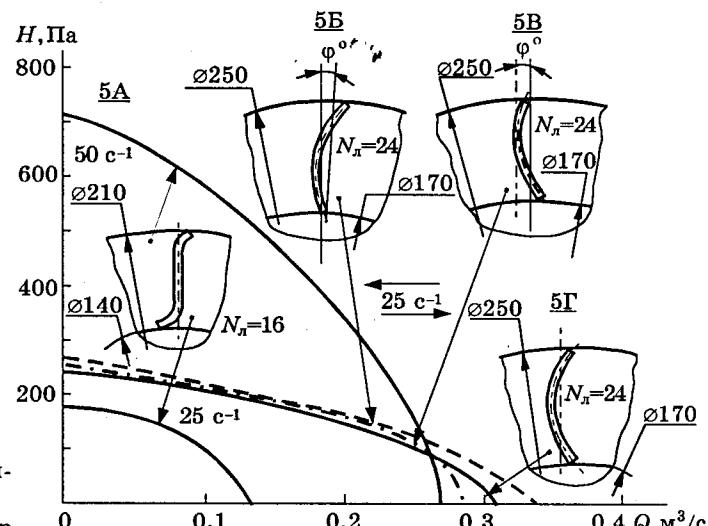


Рис.5. Напорные характеристики вентиляторов-наездников лифтовых двигателей габарита 225 мм

Таблица 3

Наружный диаметр колеса, мм	Ширина лопатки, мм		Радиус закругления, мм	
	I	II	I	II
130—150	10—12	12—14	18—20	20—22
150—200	32—36	36—40	30—32	34—36
200—250	36—40	38—42	34—36	36—38
250—300	—	40—44	—	38—40

I — лопатки загнуты вперед.
II — лопатки отогнуты назад.

нного расхода целесообразно лишь до известного предела, определяемого превышением температуры.

В процессе работ определен ряд закономерностей, связывающих напорные характеристики и уровень шума вентиляторов-наездников с геометрией элементов системы охлаждения. Результаты работы позволили создать для нового ряда подъемных асинхронных двигателей, приводящих лифты, работающие в зданиях повышенной этажности при большом числе включений, рациональную конструкцию центробежных вентиляторов.

Список литературы

1. Гершаник Ю.М., Симонов В.А., Афонин В.И. Лифтовые электродвигатели. М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1979.

Таблица 4

Объект исследования	Средние частоты в октавах, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Габарит 180 мм; частота вращения вентилятора 50 с ⁻¹								
Двигатель	43	46	49	58	57	47	50	47
Двигатель с вентилятором	43	67	62	66	66	67	61	57
Габарит 225 мм; частота вращения вентилятора 25 с ⁻¹								
Двигатель	52	62	55	60	61	62	56	46
Двигатель с вентилятором	58	72	62	66	65	65	57	46

Таблица 5

Форма лопаток	Число лопаток	Средние частоты в октавах, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Габарит 180 мм; частота вращения вентилятора 50 с ⁻¹									
4Б	16	54	66	60	73	77	63	53	43
4В	24	54	67	61	65	67	67	59	54
4А	36	52	68	63	72	70	77	63	54
Габарит 225 мм; частота вращения вентилятора 25 с ⁻¹									
5В	18	61	67	70	72	67	70	59	48
5В	24	61	69	72	73	69	69	61	49
5В	36	60	66	69	79	70	68	63	53

2. Калинушкин М.П. Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1979.

3. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.

4. Виноградов В.И. Вентиляторы электрических машин. Л.: Энергоиздат, 1981.

Некоторые вопросы разработки и испытания высокопропульсивных электродвигателей для угольных комбайнов

ДМИТРЕНКО Ю.И., КОВАЛЕВ Е.Б., ЛАНДКОФ Л.Б., МАКАРОВ К.Д.

Даны рекомендации по выбору сечения короткозамыкающих колец ротора, исключению теплового опрокидывания и особенностям приемо-сдаточных и приемочных испытаний высокопропульсивных двигателей для привода угольных комбайнов.

За истекшие четыре с лишним десятилетия прогресс технического уровня комбайновых и струговых электродвигателей [1] свелся, при обеспечении их ограниченных габаритов, особенно по высоте корпуса, к многократному повышению их номинальных мощностей с целью повышения энерговооруженности и технической производительности добычных и проходческих машин. Сначала, при минимальных изменениях геометрии активных частей, мощности двига-

телей повышались за счет применения более интенсивных видов охлаждения (внешний обдув, водяное охлаждение корпуса, охлаждение активных частей диэлектрической жидкостью, водяное охлаждение полого вала), повышения магнитного потока и других электромагнитных нагрузок [2] и доведения их в ряде габаритов корпуса по высоте (2; 3,5; 4 дм) до предельных значений. Затем — за счет повышения сечений обмотки статора путем совершенствования изо-

ляции) и стержней короткозамкнутой клетки ротора (благодаря возможности замены двухклеточных пазов овальными и повышению допустимого пускового тока [3] путем широкого внедрения современных комбайнов с барабанными и шнековыми режущими органами, облегчающими пуск двигателя), а также за счет роста удельной электропроводности короткозамкнутой клетки (заливка ротора медью).

При проработке вопроса о возможности дальнейшего увеличения степени использования активных частей двигателей следует иметь в виду некоторые аспекты их проектирования и экспериментальных исследований (на примере комбайновых двигателей).

1. Сечение короткозамыкающих колец ротора. Пока мощность двигателей с высотой корпуса 4 дм повышалась с 29,5 (МАД 191/11К) до 200 кВт (2ЭКВЭ4-200), можно было обойтись без замены заливочных форм короткозамыкающих колец ротора и увеличения их сечения. При повышении мощности до 250 кВт (в ЭКВ4-250, ЭКВЭ4-250) недостаточность существующего сечения короткозамыкающих колец уже заметна. А дальнейшее повышение мощности двигателя требует соответственно роста и сечения короткозамыкающих колец. С учетом меньшей интенсивности их охлаждения [4] рекомендуется принять $j_k/j_c \approx 0,6 \div 0,82$ (в среднем 0,7) и $q_k \geq \frac{q_c}{2(j_k/j_c) \cdot \sin(180p/z_2)}$ т.е. в

$$q_k \geq \frac{0,7 q_c}{\sin(180p/z_2)}, \quad (1)$$

где q_c , q_k — сечение стержня и короткозамыкающего кольца обмотки ротора; z_2 — число его пазов; p — число пар полюсов двигателя.

Увеличение q_k и снижение j_k уменьшит нагрев короткозамыкающих колец, подшипниковых узлов и ротора в целом до значений, гарантирующих нормальную работу двигателя и исключающих его так называемое тепловое опрокидывание.

2. Тепловое опрокидывание. При чрезмерных удельных нагрузках и недостаточной интенсивности охлаждения обмотки ротора может наступить так называемое тепловое опрокидывание двигателя, когда при росте токовой нагрузки увеличиваются: нагрев обмоток двигателя, их температурные коэффициенты сопротивлений, сопротивле-

ния, скольжения, потери, нагрев и т.д. — в виде цепной реакции, т.е. потери энергии растут быстрее потребляемой мощности и в итоге двигатель, несмотря на рост потребляемого тока, так и не сможет отдать номинальную мощность.

А если принять меры по снижению потерь в обмотке ротора (повышение потока, если это возможно без резкого снижения $\cos\phi$ и недопустимого роста потерь в обмотке статора; увеличение сечения или удельной электропроводности материала обмотки ротора) или интенсифицировать его охлаждение, или, наконец, снизить номинальную мощность двигателя (а когда это возможно, повысить его материалоемкость и габариты без снижения мощности), то опасность теплового опрокидывания устраняется: при повышении нагрузки на валу двигателя его потери растут медленнее, чем потребляемая мощность, тогда ток, потери и нагрев увеличиваются с ростом нагрузки, но принимают какие-то установившиеся значения. Лавинообразного роста потерь не происходит при росте нагрузки хотя бы до 110% номинальной, а при обычных удельных нагрузках (в двигателях, не являющихся высокоиспользованными) — в пределах устойчивой части механической характеристики.

3. Особенности приемо-сдаточных и приемочных испытаний высокоиспользованных двигателей. Для проверки электрической прочности межвитковой изоляции по ГОСТ 183-74 надо подать на обмотку статора повышенное (на 30% сверх номинального) напряжение в течение 3 мин. Для машин, не являющихся высокоиспользованными, напряжение можно повысить, не изменяя частоту тока (т.е. при этом на 30% повышается магнитный поток). Если возросший (из-за повышения потока) ток XX превышает номинальный ток при номинальном напряжении, то длительность испытаний может быть сокращена до 1 мин.

Но для высокоиспользованных машин (с магнитопроводом, предельно насыщенным уже при номинальном потоке) проверка электрической прочности изоляции может сопровождаться проблемами с чрезмерным нагревом обмотки при испытаниях. Например, в двигателе ЭКВ2 мощностью 22 кВт повышение магнитного потока на 30% приведет к росту тока XX до 50 А и греющих потерь — до 15768 Вт (вместо тока XX 15,8 А, номинального тока 31 А и греющих потерь

6213 Вт при номинальном потоке и напряжении 660 В на зажимах двигателя). При испытании в лабораторных условиях (когда водяное охлаждение двигателя сохраняется) такая перегрузка в течение 3 мин не выведет двигатель из строя, но при испытаниях в условиях обычной цеховой испытательной станции (где водяного охлаждения нет) повреждение двигателя вполне возможно.

Поэтому если предприятие изготавливает высокоиспользованные двигатели, то его испытательная станция должна быть оборудована соответствующим образом — обеспечивать либо тот вид охлаждения двигателя, который указан в его документации, либо возможность повышения частоты тока на 30% (тогда испытательное напряжение можно повысить путем повышения частоты без повышения магнитного потока двигателя).

Испытание на нагревание в режимах частых пусков. Согласно [5] для комбайновых двигателей в качестве номинального принимается повторно-кратковременный режим S4 по ГОСТ 183-74 с частыми пусками при ПВ=60%, числом включений в час до $z = 30$ и коэффициенте инерции до $F_J = 2,5$ (если z и F_J — иные, они указываются в технических условиях на двигатель конкретного типа).

При испытаниях на нагревание желательно обеспечивать номинальные значения z_n и F_{Jn} по техническим условиям. Но это создает проблемы с выбором нагрузочной машины при стендовых испытаниях указанных двигателей.

Если в качестве нагрузочной машины применять обычный генератор постоянного тока с воздушным охлаждением, то момент инерции его якоря J_a значительно повышает фактический коэффициент инерции при испытании двигателя $F_J = \frac{J_a + J_{дв}}{J_{дв}} > F_{Jn}$ (где $J_{дв}$ — момент инерции двигателя). В этом случае обычно принимают эквивалентное число включений в час при испытаниях

$$z_e = z_n \frac{F_{Jn}}{F_J}. \quad (2)$$

Тогда длительность (в секундах) эквивалентного цикла $t_{ц.э} = \frac{3600}{z_e}$, а его рабочей части

$$t_{ц.э.р} = t_{ц.э} \frac{\text{ПВ}}{100}. \quad (3)$$

Но так можно делать, пока $t_{ц.э.р} < 0,5T_{\text{нагр}}$

(где $T_{\text{нагр}}$ — постоянная времени нагрева), т.е. при испытаниях обычновенных (не высокоиспользованных) двигателей. При более продолжительном $t_{ц.э.р}$ результаты испытаний не будут достаточно объективными. Именно так и получилось при первом испытании двигателя ЭКВ2 совместно с нагрузочной машиной постоянного тока П72, при использовании которой обеспечивались $F_J = 60,2$ (вместо 2,5 по техническому заданию) и $t_{ц.э.р} = 1734$ с (в то время как $T_{\text{нагр}} \approx 180$ с). При таком соотношении между $t_{ц.э.р}$ и $T_{\text{нагр}}$ результаты испытаний двигателя на нагревание не могут быть объективными: замеренные нагревы обмоток при ПВ = 60% будут практически теми же, что при ПВ = 100%.

Для получения более объективных результатов испытаний необходимо соответственно снизить F_J и $t_{ц.э.р}$. В данном случае при повторном испытании ЭКВ2 в качестве нагрузочной машины использован второй двигатель этого же типа, работающий в генераторном режиме, что позволило (с учетом единительной муфты) приблизить F_J , z_e , $t_{ц.э.р}$ к их номинальным значениям, получить объективные результаты испытаний и доказать, что двигатель удовлетворяет требованиям заказчика и технического задания к номинальной мощности (22 кВт).

Используя опыт разработки и исследования двигателей типа ЭКВ с водяным охлаждением габаритов 2, 3,5 и 4 мощностью 13—250 кВт для привода угледобывающих машин, можно сделать вывод, что описываемые особенности создания аналогичных высокоиспользуемых двигателей с предельными нагрузками следует иметь в виду при их проектировании и исследовании.

Список литературы

1. Дмитренко Ю.И., Ландкоф Л.Б., Бондаренко А.К. и др. Новые рудничные электродвигатели для привода угледобывающих и проходческих машин// Уголь Украины. 1997. № 5. С. 30—33.
2. Диренко В.Г., Ландкоф Л.Б., Макаров К.Д., Яковенко В.А. Электромагнитные нагрузки двигателей выемочных горных машин//Тр. ВНИИВЭ. Разработка и исследование взрывозащищенного электрооборудования. 1981. С.36—40.
3. Макаров К.Д. О допустимом пусковом токе электродвигателей угольных комбайнов//Уголь. 1983. № 4. С. 44—45.
4. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969.
5. ОСТ 16 0.510.061-84. Машины электрические врашающиеся от 63 до 355 габарита включительно. Двигатели асинхронные взрывозащищенные для привода очистных комбайнов. Общие технические условия.

Дмитренко Юрий Иванович — заведующий отделением электрических машин УкрНИИВЭ. В 1965 г. закончил электромеханический факультет Украинского заочного политехнического института.

Ковалев Евгений Борисович — заведующий лабораторией УкрНИИВЭ. В 1958 г. закончил электромеханический факультет МЭИ. В 1989 г. защитил в институте электродинамики НАН Украины докторскую диссертацию по теме «Поиск и исследование новых путей охлаждения асинхронных взрывобезопасных электродвигателей низкого напряжения».

Ландкоф Лев Борисович — главный конструктор проекта. В 1957 г. закончил электромеханический факультет Харьковского горного института. В 1979 г. защитил в ХПИ кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка взрывобезопасных асинхронных двигателей с повышенной частотой включения для привода выемочных горных машин».

Макаров Константин Дмитриев — ведущий инженер-конструктор УкрНИИВЭ. В 1959 г. закончил электромеханический факультет Томского политехнического института.

Моделирование нестационарных тепловых полей в тяговой электрической машине

ЛОГИНОВА Е.Ю., канд.техн.наук

МИИТ

Представлены результаты моделирования тепловых полей в тяговом электродвигателе локомотива. Обоснована целесообразность расчетного исследования нестационарных тепловых полей в тяговом электродвигателе с учетом реальных условий эксплуатации с целью выбора оптимальных параметров конструкции и прогнозирования его ресурса.

При проектировании тяговых электродвигателей обязательным условием является расчет нагревания их обмоток в продолжительном или часовом режиме, что определяет параметры их систем охлаждения, основная цель которой обеспечить допустимый уровень температур узлов машины, тепловое состояние которых влияет на ресурс электрической машины.

Однако диапазон режимов работы тяговых двигателей не ограничивается продолжительным и часовыми режимами. Так, коэффициент использования мощности для электродвигателя локомотива может составлять 0,5—0,7, а коэффициент регулирования скорости 3,5—4,0. Кроме того, тяговые двигатели эксплуатируются в широком диапазоне изменений климатических условий. В соответствии с ГОСТ 2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые» они должны обеспечивать работу при температуре наружного воздуха $t_{\text{н.в}}$ от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$.

Поэтому при расчете обмоток тяговых электрических машин на нагревание целесообразно учитывать все эти факторы, а также особенности работы их системы охлаждения. Так, на тепловозах расход воздуха через все электрические машины изменяется приблизительно пропорционально мощности тягового электродвигателя, в то время, как его ток I_d при постоянной мощ-

ности может изменяться, например, для электродвигателя типа ЭД118 номинальной мощности 305 кВт, от 400 до 1000 А при соответствующем уменьшении частоты вращения якоря (которая определяет теплоотдачу с его поверхностей охлаждения) с 1230 до 330 об/мин.

Очевидно, что такое несоответствие между потерями электродвигателя и теплопередачей от его активных узлов даже при постоянном расходе воздуха требует более подробного исследования нагревания машины в эксплуатации. Кроме того, по условиям эксплуатации режим работы тягового двигателя все время меняется, что делает необходимым выполнение расчетов для нестационарных тепловых режимов. В итоге, именно нагревание обмоток тягового двигателя определяет режим движения локомотива и допустимую массу состава.

Из опыта известно, что электрическая машина нагревается неравномерно. Экспериментальные и расчетные исследования показали, что для тяговых двигателей постоянного тока мощностью 300—500 кВт разница между температурой максимально нагретой части обмотки якоря, которая практически на всех режимах работы находится в лобовой части со стороны привода (тяговые двигатели имеют продольную нагнетательную вентиляцию со стороны коллектора

ра) и средней температурой этой же обмотки на некоторых режимах работы может достигать 100°C. Поэтому уже на стадии проектирования машины целесообразно выполнить расчеты, которые позволили бы определять поле ее температур для всех возможных режимов эксплуатации, с учетом тепловой инерционности отдельных частей.

К настоящему времени широкое распространение получили два метода расчета поля температур при значительной его неравномерности в электродвигателе, работающем в стационарном режиме: один из них позволяет аналитически решить дифференциальное уравнение теплопроводности и определить температурный градиент продольной или поперечной составляющей температурного поля обмотки [1, 2]; другой, используя метод сеток, который при выборе сеток с крупными ячейками превращается в метод тепловых эквивалентных схем, позволяет рассчитывать трехмерное поле температур в тепловом объекте практически любой степени сложности [1, 3].

Для расчета поля температур при нестационарном режиме работы двигателя была разработана модель, использующая теорию нестационарного теплообмена в системе связанных тел [4] с учетом общих рекомендаций по расчету нестационарных тепловых процессов в электрических машинах, приведенных в [3].

В основе расчета нестационарного теплового режима лежит теория нагрева однородного тела, имеющего связи посредством теплопроводности со смежными телами и конвективные связи с теплоносителем, к которому, при определенных условиях, можно привести элементарный узел электрической машины. Температура в объеме элементарного узла для текущего момента времени принимается постоянной, поэтому частные производные по всем направлениям в уравнении Фурье тождественно обращаются в нуль; теплота P , выделяющаяся за элементарный промежуток времени dt в узле, в том числе и за счет теплообмена со смежными узлами, частично идет на повышение собственного теплосодержания тела и частично отводится к окружающей среде:

$$Pdt = cMdT + aSTdt,$$

где $cM = \sum_{i=1}^n c_i m_i$ — приведенная теплоемкость элементарного узла машины с уч-

том присоединенных пассивных узлов конструкции; T — температура элементарного узла машины; a — коэффициент теплоотдачи с поверхности узла S к охлаждающей среде.

В результате уравнение теплового баланса преобразуется в неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{cM} - \frac{aST}{cM}.$$

При расчете нестационарных температурных полей электрических машин в исследовательских целях количество узлов, на которые разбивается машина, может выбираться практически любым. Для тех узлов схемы, приведенная теплоемкость которых незначительна по сравнению с другими узлами, например, для узлов воздушных потоков в каналах машины, дифференциальные уравнения, описывающие тепловое состояние узлов, заменяются алгебраическими уравнениями.

Общий вид уравнения, описывающего тепловое состояние i -го узла ($1 \leq i \leq k$) системы, состоящей из k элементов и имеющего l конвективных связей ($1 \leq l \leq n$) и j связей путем теплопроводности со смежными узлами ($1 \leq j \leq r$), принимает вид:

$$\frac{dT_i}{dt} = \sum_{i=1}^n \alpha_{il}(T_i, T_l)(T_l - T_i) + \sum_{j=1}^{r+1} W_i(T_i, T_j),$$

где $\alpha_{il}(T_i, T_l) = \Lambda_{il}(T_i, T_l)/C_i(T_i)$, $W_i(T_i, T_j) = P_i(T_i, T_j)/C_i(T_i)$ — параметры адиабатического нагрева i -го узла за счет теплопередачи к теплоносителю и теплообмена со смежными узлами машины; $\Lambda_{il}(T_i, T_l)$ — коэффициенты матрицы теплопередачи от i -го узла к теплоносителю и тепловых излучений; $C_i(T_i)$ — приведенная теплоемкость i -го узла.

Условия охлаждения на поверхностях элементарных узлов тяговых электрических машин детально исследованы специалистами ВНИИэлектровозостроения (г. Новочеркасск) [1] и определяются с использованием критериальных уравнений вынужденной конвекции, свободной конвекции и теплового излучения.

Полученная модель, позволяющая рассчитать нестационарное тепловое поле в электродвигателе как едином тепловом объекте, представляет собой систему неоднородных нелинейных дифференциальных уравнений, порядок которой определяется числом узлов, нагревание которых нужно контролировать.

Двигатель в ней представлен в виде нелинейного замкнутого теплового объекта, в котором тепловые потоки через пассивные (теплопроводящие) элементы — станина, вал и т.д. — могут перераспределяться между активными (тепловыделяющими) узлами машины, потери в которых зависят от их температур. Теплоноситель имеет переменные значения температур в различных каналах машины, так как нагревается от каждого узла по длине потока. Теплообмен станины с внешней средой в модели определяется условиями свободной конвекции и теплового излучения [1].

Расчеты нестационарного теплового процесса были выполнены для тягового электродвигателя ЭД118, работающего в энергетической цепи магистрального тепловоза 2ТЭ116, получившего в настоящее время широкое распространение. Разработанная модель рассчитывает температуру 34 узлов двигателя, включая характерные участки обмоток, сердечников якоря и полюсов, станины, подшипниковых щитов и пр., а ее реализация выполнена в интегрированной среде Borland C++ с использованием библиотеки OWL5, что делает практически неограниченными возможности для исследования нестационарных тепловых процессов в двигателе в эксплуатации. С учетом того, что расчет теплообменных процессов требует определения температуры воздуха по длине вентиляционных каналов, модель дополняется 14 уравнениями конвективных связей, позволяющими оценить нагревание воздуха в любой точке машины, в том числе и на ее выходе. Тепловому расчету предшествовал аэродинамический расчет двигателя, позволяющий определить скорости воздуха на поверхностях его охлаждения [1].

Результаты расчета показали, что разработанная модель практически адекватна реальному тепловому объекту по своим статическим и динамическим свойствам (рис.1). Так, расчетная кривая нагревания обмотки якоря, определяемая в модели как

$$T_{\text{ср.як}} = \frac{\sum c_i m_i T_{i,\text{як}}}{\sum c_i m_i},$$

где $k_{\text{як}} = 8$ — число элементарных узлов, на которые разбита обмотка якоря, отличается от экспериментальной кривой нагре-

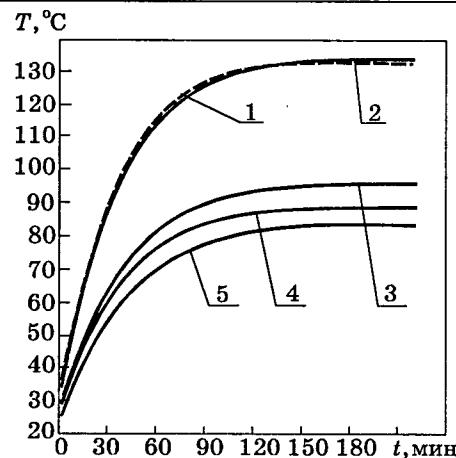


Рис.1. Кривые нагревания обмотки якоря (1, 2), коллектора (3), зубцов (4) и сердечника якоря (5) ЭД118 на продолжительном режиме работы (мощность двигателя 305 кВт, ток 720 А, частота вращения якоря 595 об/мин) при $t_{\text{н.в}} = 24^\circ\text{C}$:

1 — эксперимент; 2 — расчет

вания на протяжении всего переходного процесса не более чем на 2%.

Сопоставление результатов расчета средней температуры обмотки якоря и температур в различных ее частях показывает (рис.2), что даже в продолжительном режиме работы при $t_{\text{н.в}} = 24^\circ\text{C}$ их разница может достигать $\Delta_{\text{ср.як}} = 45^\circ\text{C}$, а разница между наименее нагретой частью обмотки (пазовая часть нижней полусекции) и наиболее нагретой (лобовая часть со стороны привода нижней полусекции) $\Delta_{\text{маяк}} = 60^\circ\text{C}$. С увеличением $t_{\text{н.в}}$ или I_d величины $\Delta_{\text{ср.як}}$ и $\Delta_{\text{маяк}}$ возрастают, т.е. неравномерность нагрева обмоток увеличивается.

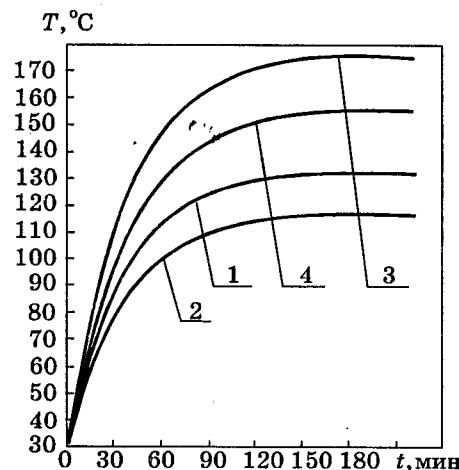


Рис.2. Расчетные кривые нагревания узлов нижнего полувитка секции обмотки якоря ЭД118 на продолжительном режиме работы при $t_{\text{н.в}} = 24^\circ\text{C}$: 1 — лобовой части со стороны коллектора; 2 — пазовой части; 3 — забандажированной лобовой части со стороны привода; 4 — открытой лобовой части со стороны привода

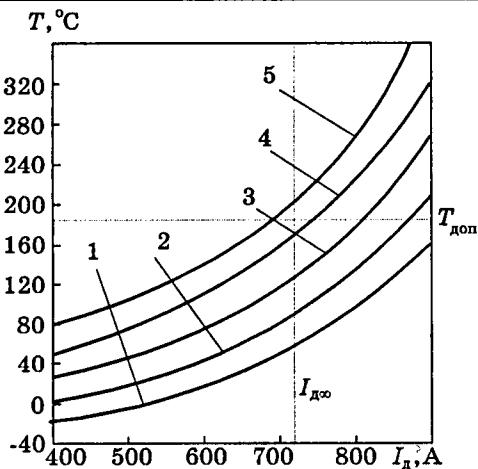


Рис.3. Зависимость температуры забандажированной лобовой части со стороны привода нижней полусекции обмотки якоря ЭД118 от I_d при частичном охлаждении и различных значениях $t_{н.в.}$:

1 — $(-40)^\circ\text{C}$; 2 — $(-20)^\circ\text{C}$; 3 — 0°C ; 4 — 20°C ; 5 — 40°C

В связи с этим напрашивается вывод, что на ресурс машины будет влиять не средняя температура обмотки, а той ее части, которая лимитирует нагрев на протяжении абсолютного большинства времени эксплуатации, что можно выявить, моделируя режимы нагружения и охлаждения тягового двигателя при его работе в энергетической цепи локомотива с помощью разработанной программы.

Полученная модель расчета поля температур электродвигателя настолько универсальна, что позволяет в кратчайшее время рассчитывать стационарное тепловое поле в двигателе при любых режимах эксплуатации, ориентируясь на более простые средства вычислительной техники, например, используя математическую систему MathCAD PLUS 7.0, достаточно простую в обращении и имеющую отличные графические возможности по представлению промежуточных и оконча-

тельных результатов расчета характеристик исследуемого объекта.

Например, расчет стационарного поля температур в ЭД118, имеющем обмотки с изоляцией класса нагревостойкости F и работающим в энергетической цепи тепловоза 2ТЭ116 на 9 позиции контроллера с расходом воздуха на охлаждение, соответствующим 72% номинального, выполненный по разработанной модели в системе MathCAD PLUS 7.0 для всего возможного диапазона нагрузок, показывает, что при $t_{н.в.} > 25^\circ\text{C}$ лобовая часть обмотки якоря перегревается уже при $I_d \leq I_{d\infty}$ (рис.3). При этом, магистральный тепловоз в эксплуатации большую часть времени работает именно на 8—10 позициях контроллера с частичным охлаждением тяговых электрических машин.

Таким образом, при использовании средств вычислительной техники стало возможно моделировать как стационарные, так и нестационарные тепловые поля в электрических машинах с высокой степенью точности. Это позволяет уже на стадии проектирования более обосновано подходить к выбору класса нагревостойкости изоляции обмоток машины, в зависимости от режима эксплуатации достоверно оценивать ее ресурс, выбирать параметры регулятора температуры, обеспечивающие заданные качества работы системы регулирования.

Список литературы

- Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Гуревич Э.И. Термовые испытания и исследования электрических машин. Л.: Энергия, 1977.
- Сипайллов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Термовые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989.
- Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1983.

Вниманию руководителей предприятий, объединений, НИИ и КБ, вузов

Редакция журнала «Электротехника» предлагает услуги по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала «Электротехника» по тематике и материалам (в том числе и рекламным) заказчика.

Справки по телефону: 254-11-52

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Экономичный силовой трансформатор для электропоезда

ЗБОРОВСКИЙ И.А., доктор техн.наук, ДЕЕВ Л.П.

ОАО «Уралэлектротяжмаш»

Показаны возможности улучшения дискретного спектра токов в контактной сети, уменьшения добавочных потерь и снижения массогабаритных параметров тягового трансформатора.

При создании трехобмоточного трансформатора для электроподвижного состава учитывают современные особенности системы тягового электропривода и собственных нужд [1,2]. Трансформатор первичной обмоткой подключается к контактной сети и вторичной обмоткой — к выпрямителю переменного тока, который через звено постоянного тока с большой параллельной емкостью и инвертор напряжения соединен с тяговыми двигателями (рис.1). Взаимное влияние электромагнитных процессов во вторичной обмотке и третичной, питающей собственные нужды, за счет конструктивного исполнения по возможности сводится к минимуму.

Выпрямитель тока работает по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивая высокие энергетические показатели, причем форма тока в контактной сети приближается к синусоидальной [3]. Выпрямитель тока — четырехквадрантный преобразователь ($4q-S$), так как не только активная, но и реактивная мощности могут передаваться в двух направлениях. При рекуперативном торможении двигателей выпрямитель тока работает как инвертор напряжения.

Приближение к синусоидальной форме тока в системах тягового электропривода достигается высоким напряжением КЗ (первая — вторичная обмотки) — практически около 50%, если за базовые значения

принять напряжение ХХ и номинальный ток вторичной обмотки (номинальные параметры разработанного трансформатора 937,5 В; 1600 А).

Из-за высокого напряжения КЗ трансформатор получается неэкономичным, так как геометрические размеры активной части существенно отличаются от оптимальных. Поэтому трансформатор выполняют на напряжение КЗ около 25% и дополняют его реактором, включенным последовательно с вторичной обмоткой. Потери мощности в реакторе в номинальном режиме составляют 34% потерь в трансформаторе. Кроме того, реактор ухудшает массогабаритные параметры, приводит к увеличению объема охлаждающей жидкости.

Использование полууправляемых тиристоров с искусственной коммутацией определяет необходимость высокого напряжения КЗ из-за низкой оптимальной коммутируемой частоты, пропорциональной числу импульсов на полупериоде напряжения на входе выпрямителя тока [2]. Применение запираемых тиристоров GTO позволяет увеличить указанную частоту с 500 до 900 Гц. Еще более высокая частота достигается при использовании силовых транзисторов IGBT. Она ограничивается коммутационными потерями в транзисторах.

Дискретный спектр напряжения на входе выпрямителя тока представляют в виде двойного ряда Фурье как функцию двух частот, одна из которых соответствует несущему, а другая — модулирующему напряжениям, и выражают через Бесселеву функцию первого рода и синусоидальные функции [4]. Это усложняет анализ спектра напряжения, а следовательно, токов и добавочных потерь мощности в обмотках трансформатора и реактора. Значительное упрощение достигается в том случае, если принять, что ширина импульсов напряжения на входе выпрямителя тока модулируется по синусоидально-

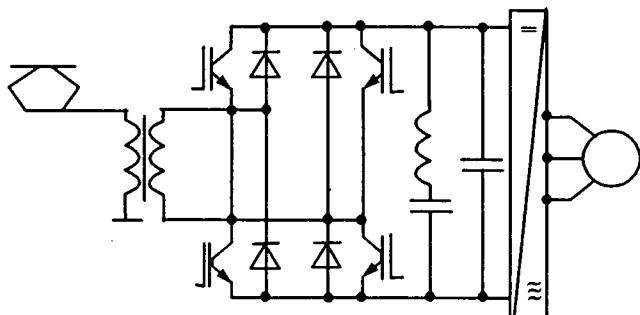


Рис.1. Схема $4q-S$ преобразователя с инвертором и тяговым двигателем

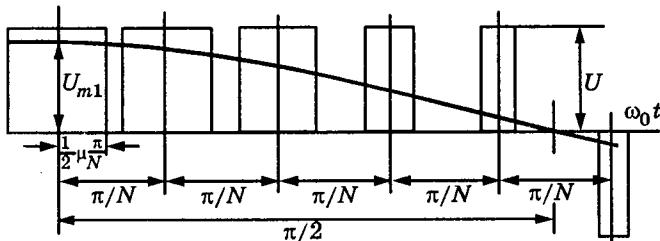


Рис.2. Импульсное напряжение на входе выпрямителя тока

му закону (идеализированная кривая, изображенная на рис.2). Допустимость такого подхода определяется сравнением дискретных спектров токов и добавочных потерь, рассчитанных по идеализированной и приближенной к реальной кривым импульсного напряжения на входе выпрямителя тока.

Если совместить начало координат с серединой самого широкого импульса напряжения (или, что тоже самое, с моментом амплитуды основной гармоники), то с учетом симметрии относительно осей абсцисс и ординат получим выражение для амплитуд косинусоид основной и высших гармоник:

$$\begin{aligned} U_{mk} &= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\omega_0 t) \cos k\omega_0 t d\omega_0 t = \\ &= \frac{4U}{k\pi} \sum_{p=1}^{\frac{N+1}{2}, \frac{N}{2}} (\sin kB_p - \sin kH_p), \end{aligned} \quad (1)$$

где k — нечетный номер гармоники; ω_0 — основная угловая частота; N — число импульсов в полупериоде основной частоты (если N — нечетное, то верхний предел суммы $(N+1)/2$, если N — четное, то $-N/2$); $B_1 = \mu\pi/2N$; $H_1 = 0$;

при $p > 1$

$$B_p = \frac{\pi}{N} (p-1) + \frac{\mu\pi}{2N} \cos \frac{\pi}{N} (p-1);$$

$$H_p = \frac{\pi}{N} (p-1) - \frac{\mu\pi}{2N} \cos \frac{\pi}{N} (p-1); \quad (2)$$

μ — относительная ширина импульса напряжения, соответствующего максимуму косинусоиды (рис.2); U — амплитуда импульса напряжения.

Параметр μ определяется по следующим исходным данным:

U_{cm} — амплитуда напряжения контактной сети, приведенной к виткам вторичной обмотки при КЗ; I_{m1} — амплитуда основной гармоники тока; x_1 — сумма индуктивных сопротивлений на основной частоте трансформатора (первичная — вторичная обмотки) и реактора при КЗ.

Амплитуда основной гармоники напряжения на входе выпрямителя тока

$$U_{m1} = \sqrt{U_{cm}^2 + (x_1 I_{m1})^2}, \quad (3)$$

так как вектор основной гармоники тока совпадает по фазе с вектором напряжения контактной сети.

Параметр μ определяется из (1), (2) при известных U_{m1} и заданной амплитуде импульсов напряжения U на входе выпрямителя тока. При этом следует решить трансцендентное уравнение, так как μ не выражается в явном виде. Можно задаться параметром μ , значение которого близко к глубине модуляции [1], и найти амплитуду импульсов напряжения при известном значении U_{m1} (3). Глубина модуляции — отношение амплитуд напряжений: модулирующего и несущего.

Дискретный спектр токов в обмотках трансформатора и реактора при $k > 1$ рассчитывается по формуле:

$$I_{mk} = U_{mk}/z_k; \quad z_k = \sqrt{r_k^2 + (k\omega_0 L_k)^2}, \quad (4)$$

где z_k — полное сопротивление трансформатора и реактора для k -й гармоники при КЗ ($z_1 = 0,293$ Ом).

Практически можно считать, что $z_k = k\omega_0 L_k$ и L_k для непрерывных обмоток трансформатора и реактора не зависят от частоты. При расчете гармоник тока при $k > 1$ (4) необходимо считать первичную обмотку трансформатора короткозамкнутой.

Потери мощности в первичной, вторичной обмотках трансформатора и обмотке реактора можно разделить на составляющие.

1. Основные (омические) потери.

2. Добавочные потери от вихревых токов основных гармоник.

3. Добавочные потери от вихревых токов высших гармоник.

Добавочные потери делятся на потери от осевого и радиального магнитных полей рассеяния. Добавочные потери в единице массы меди обмотки при синусоидальном законе изменения осевой составляющей равны [5]

$$p_c = k_b b^2 B_m^2; \quad k_b = \frac{\omega_0^2}{24\rho\gamma}, \quad (5)$$

где B_m — амплитуда магнитной индукции; b — толщина провода без изоляции (рис.3); γ — плотность вещества обмотки; ρ — удельное сопротивление.

Потери от радиальной составляющей магнитного поля рассеяния рассчитываются по формуле (5), но вместо толщины следует подставить высоту проводника, которая на рис.4,а

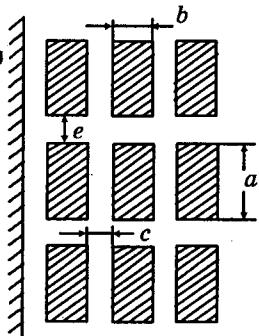


Рис.3. К расчету $k_{\text{выт}}$ от осевого поля

обозначена также буквой b , чтобы как в формуле (5), так в дальнейшем и в других — сохранить обозначения.

При несинусоидальном периодическом токе потери мощности от вихревых токов

$$p_d = p_c \sum_{k=1,2..} k^2 \left(\frac{I_k}{I_c} \right)^2 k_{\text{выт}}, \quad (6)$$

где p_c — добавочные потери от вихревых токов основной гармоники, рассчитанные по (5); I_k — действующий ток k -й гармоники; $k_{\text{выт}}$ — коэффициент вытеснения ($k_{\text{выт}} < 1$).

По формуле (6) рассчитываются отдельно потери от осевой и радиальной составляющих магнитного поля рассеяния, а затем суммируются.

При расчете потерь от осевого поля

$$k_{\text{выт}} = \left| \bar{F}_2 \right|^2 \frac{6}{\beta^3} \frac{\sin \beta - \sin \beta}{\cosh \beta + \cos \beta}, \quad (7)$$

где

$$\bar{F}_2 = \frac{(1+a/e)(1+b/c)}{(1+b/c)a/e + F_1 b/c + 1}; \quad F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\beta} \sqrt{\frac{\cosh \beta - \cos \beta}{\cosh \beta + \cos \beta}} e^{-j\varphi};$$

$$\varphi = \frac{\pi}{4} \operatorname{arctg} \frac{\sin \beta}{\sinh \beta}; \quad \beta = \frac{b}{\delta}; \quad \delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0}}. \quad (8)$$

В формулах (8) приняты обозначения (рис.3): a — осевой размер провода без изоляции; c — толщина изоляции провода на две стороны; e — осевой размер канала вместе с изоляцией; μ_0 — магнитная проницаемость ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м); δ — глубина проникновения электромагнитного поля.

Коэффициент вытеснения от радиального поля рассчитывается по формулам (7) и (8), в которых β заменяется

$$\beta_\Phi = \frac{b}{\delta} \sqrt{\frac{a}{a+e}}, \quad (9)$$

отношение a/e заменяется $d/l-d$, где d — толщина обмотки с изоляцией (рис.4); l — расстояние от стержня магнитопровода до внутренней поверхности бака. Размеры a , b , c , d , e показаны на рис.4, а, б. Кроме того, следует заменить ρ на $\rho' = \rho(1+e/a)$.

Результаты расчета добавочных потерь на персональном компьютере при различных

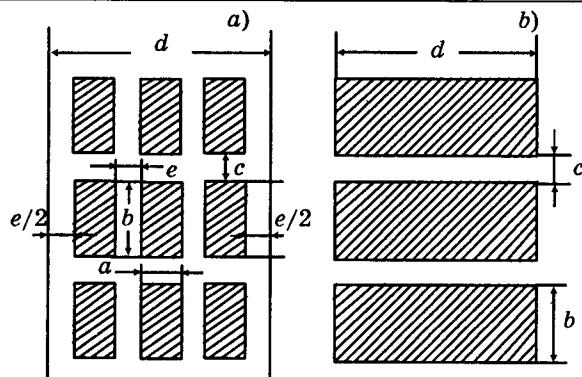


Рис.4. К расчету $k_{\text{выт}}$ от радиального поля:
а — обмотка; б — эквивалентная система шин

значениях коммутируемой частоты (числа импульсов N в полупериоде напряжения на входе выпрямителя тока) сведены в табл.1.

Характерная особенность — снижение добавочных потерь от высших гармоник в обмотках трансформаторов и реактора с увеличением числа импульсов N , причем особенно существенное, при изменении с 9 до 27. Это можно объяснить следующим образом.

Наибольшее значение в спектре токов имеют гармоники, порядок которых равен

$$k_m = 2N - 1. \quad (10)$$

Указанные гармоники с ростом N уменьшаются по амплитуде. Кроме того, уменьшаются амплитуды боковых гармоник, соседствующие с наибольшими, и коэффициент вытеснения (рис.5). Особенно существенно снижается $k_{\text{выт}}$ с ростом номера гармоники вторичной обмотки трансформатора. В связи с этим повышение частоты гармоник, порядок которых равен k_m , не приводит к увеличению потерь: при коммутируемой частоте 2700 Гц добавочные потери от высших гармоник снижаются на 5740 и 3985 Вт по сравнению с их значениями при частотах 500 и 900 Гц (табл.1).

Различие в законах изменения $k_{\text{выт}}$ (рис.5) вторичной обмотки трансформатора и обмотки реактора объясняется тем, что радиальный размер проводника второй обмотки в два раза меньше.

Следует отметить, что потери мощности от вихревых токов в обмотках от осевого маг-

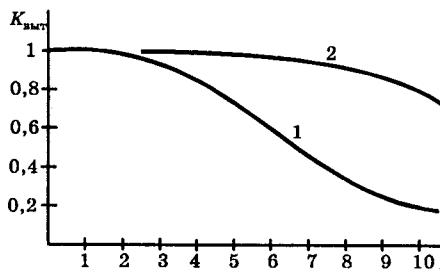


Рис.5. Зависимость $k_{\text{выт}}$ от осевого поля:
1 — вторичная обмотка трансформатора; 2 — обмотка реактора

Таблица 1

N	Добавочные потери от высших и основной гармоник, Вт				Отношение добавочных и основных потерь			Отношение сумм добавочных и основных потерь	
	в обмотках трансформатора		в обмотке реактора	Первичная обмотка	Вторичная обмотка	Обмотка реактора			
	Первичная	Вторичная							
5	1164+256	4514+1165	3841+871	0,0716	0,44	0,514	0,282		
9	1029+256	3386+1165	3350+871	0,0648	0,353	0,46	0,24		
27	623+256	1187+1165	1969+871	0,0443	0,183	0,31	0,145		

Таблица 2

N	5										9				27			
	k	7	9	11	13	15	17	19	21	15	17	19	21	51	53	55	57	
I_{mk} , А	90,3	224,3	95,8	88,6	49,7	56,2	34,3	24	53,7	105,6	66,2	52,4	18,3	30,4	26	18,1		

нитного поля рассеяния существенно превосходят другую составляющую потерь — от радиального поля. Это характерно на всех коммутируемых частотах.

Дискретный спектр тока вторичной обмотки трансформатора и реактора рассчитывался по формулам (1), (2), (4) для трех значений коммутируемой частоты при напряжении КЗ трансформатора совместно с реактором $u_k = 50\%$. В табл.2 приведены амплитуды гармоник, порядок которых равен и близок к k_m (10).

В табл.2 четко прослеживается уменьшение амплитуд гармоник, порядок которых кратен k_m (10), и амплитуд боковых гармоник.

В табл.3 приведен дискретный спектр тока вторичной обмотки трансформатора и реактора, рассчитанный по кривой импульсного напряжения, приближенного к реальному ($N = 9$).

Таблица 3

k	15	16	17	18	19	20	21
I_{mk} , А	56,7	14,2	92,7	4	76,9	13,3	50,1

Отклонение амплитуд нечетных гармоник тока не более 14% (табл.2,3). Порядок гармоники с наибольшей амплитудой соответствует (10).

Сравнивались добавочные потери от вихревых токов высших гармоник, соответствующих импульсному напряжению на входе выпрямителя тока, ширина импульсов которого модулируется по синусоидальному закону (рис.2) и напряжению, приближенному к реальному при $N = 9$.

Результаты расчета показали их практическое совпадение: отклонение потерь для всех обмоток не превышает 1%.

Для определения постоянной составляющей и дискретного спектра указанного напряжения необходимо выполнить интегрирование по формулам Эйлера за весь период:

$$A_0 = \frac{U}{2\pi} \sum_{n=1}^{2N} (\alpha_{vn} - \alpha_{hn});$$

$$S_{km} = - \frac{U}{\pi k} \sum_{n=1}^{2N} (\cos k\alpha_{vn} - \cos k\alpha_{hn}); \quad (11)$$

$$C_{km} = \frac{U}{\pi k} \sum_{n=1}^{2N} (\sin k\alpha_{vn} - \sin k\alpha_{hn}),$$

где n — номер импульса напряжения, причем левая сторона первого импульса совмещена с осью ординат; α_{hn} , β_{vn} — угол между началом координат и соответственно началом и окончанием n -го импульса напряжения; S_{km} , C_{km} — амплитуды k -й гармоники, соответственно синусоиды и косинусоиды.

Напряжение импульса в (11) подставляется с учетом его знака: если импульс ниже оси абсцисс, то $U < 0$, если выше, то $U > 0$.

Совместное напряжение КЗ и трансформатора (первичная и вторичная обмотки) и реактора является весьма важной характеристикой, так как проявляется в габаритах, потерях мощности и спектре гармоник тока.

Дополнение трансформатора реактором, из-за необходимости обеспечить $u_k = 50\%$ проявляется в повышенных габаритах, расходе активных материалов, потерях электроэнергии, объеме охлаждающей жидкости.

Представляется возможным исключить реактор и построить систему регулирования на основе напряжения КЗ трансформатора 27%. При этом индуктивное сопротивление КЗ (Ом) уменьшается в отношении $0,1706/0,293 = 0,582$. Для этого следует к вторичной обмотке трансформатора добавить 7,92% витков, что может быть реализовано на существующем магнитопроводе (рис.6).

Указанное изменение числа витков вторичной обмотки определяется из биквадратного уравнения:

$$234,4^2 y^4 + 937,5^2 y^2 - 1048^2 = 0; \quad y = \frac{w'_2}{w_2}, \quad (12)$$

где w^2 , w'_2 — числа витков вторичной обмотки трансформатора соответственно при наличии и отсутствии реактора; $1600 \cdot 0,293/2 = 234,4$ В.

Действующее напряжение контактной сети, приведенное к числу витков вторичной обмотки, увеличивается с 937,5 до 1011,7 В, а падение напряжения на индуктивностях, от контактной сети до входа на выпрямитель тока, уменьшается с 468,8 до 273 В. Действующее напряжение на входе выпрямителя тока сохраняется в номинальном режиме неизменным и равным 1048 В. Косинус угла сдвига между синусоидальными напряжением и током на входе трансформатора при номинальной и близкой к ней мощности равен единице.

Для получения экономического эффекта за счет исключения реактора необходимо увеличить коммутирующую частоту напряжения на выходе выпрямителя тока, так как при $u_k = 27\%$ и существующей частоте 900 Гц ухудшается дискретный спектр токов в первичной и вторичной обмотках (амплитуды гармоник во вторичной обмотке возрастают в $1,0/0,582 = 1,718$ раза), а добавочные потери от высших гармоник токов возрастут в $1,854^2 = 3,437$ раза в первичной и $1,0792 \cdot 2,95 = 3,185$ раза во вторичной обмотках.

С учетом увеличения основных потерь мощности в обмотках трансформатора (в первичной в $1,0792^2 = 1,165$ раза и во вторичной в 1,0792 раза) произойдет увеличение потерь мощности из-за исключения реактора.

Рассмотрим изменение потерь мощности, если увеличить коммутируемую частоту с 900 до 2700 Гц, что возможно при использовании силовых транзисторов. При этом значительно улучшается дискретный спектр токов и уменьшаются добавочные потери в обмотках трансформатора.

На основании данных табл.1 можно установить, что при коммутируемой частоте 900 Гц и $u_k = 50\%$ (при наличии реактора) сумма всех потерь в обмотках трансфор-

матора и реактора составляет 51959 Вт. Сумма потерь в обмотках трансформатора при коммутируемой частоте 2700 Гц и $u_k = 27\%$ (без реактора) складывается из следующих составляющих: основных потерь в первичной обмотке 23095 Вт и вторичной обмотке 13900 Вт; добавочных потерь от вихревых токов основных гармоник соответственно — 298 и 1257 Вт; добавочных потерь от высших гармоник 2141,9 и 3779,6 Вт. Эта сумма составляет 44471,5 Вт. Откуда следует, что экономится 7487 Вт потерь мощности. Следует заметить, что потери мощности в обмотках трансформатора возрастают на 5924 Вт.

При $u_k = 27\%$ (без реактора) и коммутируемой частоте 2700 Гц амплитуды гармоник увеличиваются в 1,718 раза сравнительно с данными табл.2.

Например, при $N = 27$, $k = 53$ амплитуда тока вторичной обмотки равна 52,2 А. При $N = 9$, $k = 17$ амплитуда тока равна 105,6 А (табл.2).

Выводы

1. С ростом коммутируемой частоты с 900 до 2700 Гц за счет применения силовых транзисторов улучшается дискретный спектр токов, снижаются добавочные потери от высших гармоник токов в обмотках трансформатора и реактора. Сумма добавочных потерь уменьшается на 4 кВт.

2. Переход на более высокую коммутируемую частоту (с 900 до 2700 Гц) позволяет исключить реактор, улучшить массогабаритные параметры (снизить расход меди на 151 кг и электротехнической стали на 234 кг), уменьшить объем охлаждающей жидкости, снизить потери мощности на 7487 Вт, улучшить дискретный спектр тока в контактной сети. При этом напряжение КЗ трансформатора без реактора — 27%.

3. Предложен более простой метод расчета дискретного спектра токов, на основании которого можно выполнить расчет добавочных потерь с высокой точностью.

Список литературы

- Литовченко В.В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S преобразователями // Электротехника. 1993. № 5.
- Жулев О.Н., Валтон П. Электровоз ВЛ 86Ф с асинхронными тяговыми двигателями // Электротехника. 1986. № 4.
- Kehrmann H., Lienau W., Nill R. Vierquadrantensteller — eine netzfreundliche Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb // Elektrische Bahnen. 1974. 45. № 6. S. 135—142.
- Бернштейн А.Я., Гусицкий Ю.М. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. М.: Энергия, 1980.
- Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.

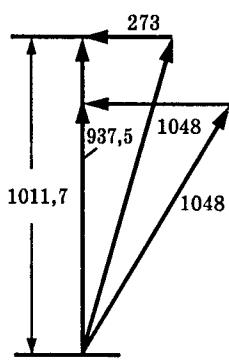


Рис.6. Векторные диаграммы напряжения при наличии ($u_k=50\%$) и отсутствии ($u_k=27\%$) реактора

Системы автоматической настройки компенсации для дугогасящих реакторов, управляемых подмагничиванием

ДОЛГОПОЛОВ А.Г., канд.техн.наук

НТЦ ВЭИ

Рассмотрены режимные особенности и требования к системам автоматической настройки компенсации для дугогасящих реакторов нового типа, освоенных промышленностью. Описан вариант реализации такой системы, использующей принцип отслеживания реактивной проводимости контура нулевой последовательности сети и содержащей замкнутый контур автоматического регулирования.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей в электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением 6—35 кВ широко применяется компенсация емкостных токов однофазных замыканий на землю с помощью ступенчато и плавно регулируемых дугогасящих реакторов различных типов. В последние годы освоены в серийном производстве и находят все более широкое применение дугогасящие реакторы типа РУОМ, управляемые подмагничиванием, которые выпускаются раменским электротехническим заводом «Энергия» [1—3]. Их преимуществами являются плавность и глубина регулирования, отсутствие движущихся механических частей, низкий уровень высших гармоник, технологичность изготовления и высокие технико-экономические показатели.

Фактически серия реакторов РУОМ на номинальные токи от 25 до 130 А, напряжением 6 и 10 кВ является первой в России и в мире серией управляемых подмагничиванием реакторов, которая сертифицирована и освоена в производстве специализированным заводом. Кроме того, принципиальным отличием этих реакторов от других конструкций, управляемых подмагничиванием дугогасящих катушек, является использование глубокого, близкого к предельному насыщению электротехнической стали на отдельных участках магнитопровода уменьшенного сечения, что позволило получить большую глубину регулирования (ток ХХ менее 5% номинального) при низком значении высших гармоник (менее 4% номинального тока во всем диапазоне регулирования).

Такая глубина плавного регулирования при достаточном быстродействии и наличии автоматической системы управления позволяет обеспечить в сети с изолированной нейтралью режим полной и точной компенса-

ции после возникновения однофазного замыкания на землю, сохраняя в нормальных режимах работы сети максимальную расстройку компенсации. Благодаря этому отсутствует резонансные перенапряжения и связанное с ними требование 5%-й расстройки компенсации, а также исключаются потери на управление в нормальных режимах.

Для успешного и широкого применения нового типа управляемых дугогасящих реакторов, обеспечивающих принципиально различные режимы работы электрической сети до и после возникновения замыкания, необходима система автоматической настройки компенсации (САНК) с высокой точностью регулирования и возможностью работать в указанных режимах. Такие САНК для реакторов серии РУОМ разработаны и выпускаются НТЦ ВЭИ им. Ленина (г. Тольятти). В настоящей статье рассматриваются требования к системам управления для РУОМ и способы их практической реализации.

Система автоматической настройки компенсации для дугогасящих реакторов (ДГР) должна обеспечивать решение двух основных задач:

1. Максимально точное измерение текущих значений емкости фаз сети на землю (емкостной проводимости сети) в нормальных режимах работы во всем диапазоне возможных оперативных переключений независимо от возможных возмущающих факторов—естественного смещения нейтрали, наличия высших гармоник в сети, отклонений промышленной частоты, параллельной работы с «базовыми» дугогасящими реакторами или другими ДГР на параллельно работающих секциях подстанции и т.д.

2. Быструю и точную настройку индуктивного сопротивления (проводимости) ДГР в резонанс с измеренной емкостной проводимостью сети после возникновения одно-

фазного замыкания на землю и поддержание этой настройки в течение времени, допустимого для этого режима работы на данной подстанции.

Кроме того, к САНК предъявляются обычные требования надежности, возможности визуального контроля и самоконтроля, удобства и безопасности технического обслуживания, наличия ручного режима управления, возможностей применения на подстанциях с различными схемами и оборудованием, в том числе с существующими типами ДГР, трансформаторов напряжения и тока.

При разработке системы управления следует также учитывать дополнительные особенности и преимущества ДГР:

- самоподмагничивание встроенными в бак реактора тиристорами, подключенными к отпайкам основной обмотки, что исключает необходимость во внешнем источнике питания для управления мощностью реактора;

- силовые тиристоры с их цепями управления и защиты, наряду с регулированием индуктивного сопротивления реактора в режиме компенсации тока замыкания на землю, в нормальных режимах работы сети при отсутствии КЗ обеспечивают параметрическое ограничение перенапряжений и снижают тем самым вероятность повреждений;

- до момента возникновения однофазного замыкания на землю индуктивное сопротивление ХХ реактора на два порядка выше его сопротивления при резонансной настройке в режиме замыкания, что исключает проблемы резонансных перенапряжений, характерные для предварительно настраиваемых реакторов типа ЗРОМ и плунжерных, а также позволяет обеспечивать полную компенсацию тока замыкания в силу отсутствия требования расстройки компенсации в 5%.

Требования к точности настройки компенсации могут существенно различаться [4–8] и зависят как от возможностей оборудования (наличия плавно регулируемых дугогасящих реакторов и автоматических регуляторов), так и от режима работы сети (осуществляется ли резонансная настройка до возникновения замыкания, существуют ли другие средства защиты от перенапряжений, такие, как ОПН, высокоомные резисторы и т.д.). Известно упомянутое требование о 5%-й расстройке в сторону перекомпенсации дугогасящих катушек, настраиваемых в резонанс до возникновения замыкания. Однако и оно на практике не выполняется из-за от-

сутствия достаточного количества плавно регулируемых реакторов, оснащенных автоматическими регуляторами. Как правило, по этим причинам расстройка компенсации из-за текущих оперативных переключений превышает 5%, иногда довольно значительно.

Применение в качестве дугогасящих реакторов РУОМ с регуляторами типа САНК принципиально позволяет повысить точность настройки компенсации по основной гармонике емкостного тока замыкания на землю до уровня 1% и выше. Причем для этого нет необходимости менять весь существующий парк дугогасящих катушек — достаточно заменить физически устаревшие или дополнить существующие на мощность, соответствующую переменной части (от оперативных переключений) в общем емкостном токе. Однако требует аргументированного ответа вопрос о том, до какой степени следует стремиться к повышению точности настройки комплекса САНК—РУОМ.

Казалось бы, при распространенной на практике расстройке дугогасящих катушек 5% и более, наличии высших гармоник и активной составляющей в токе замыкания на землю (каждая из этих составляющих также, как правило, выше 5%) не имеет большого значения высокая точность настройки внедряемых комплексов САНК—РУОМ. И действительно, суммарный остаточный ток в месте замыкания 10–20 А при существующих токах однофазного замыкания на землю 100–200 А и более является весьма приемлемым результатом с точки зрения термического воздействия в месте КЗ.

Однако при токах замыкания на землю менее 100 А в кабельных сетях относительно небольшой активной составляющей следует стремиться к полной компенсации основной гармоники емкостного тока, чтобы максимально использовать существующую возможность самопогасания дуги и восстановления изоляции в месте пробоя. Причем это важно не только с точки зрения значения остаточного тока, его термического воздействия и повышения вероятности гашения дуги, но и по целому ряду других, не менее важных параметров режима, в частности, по скорости восстановления напряжения поврежденной фазы после самопогасания дуги.

Кроме того, следует учитывать в перспективе и то обстоятельство, что при правильном подходе к обеспечению режима нейт-

рали с точки зрения ограничения перенапряжений всем комплексом средств, состоящим из резисторов, ограничителей перенапряжений и дугогасящих реакторов, к последним предъявляются самые высокие требования по точности настройки компенсации [6].

Более точная количественная оценка требуемой точности настройки компенсации (или допустимой расстройки) по различным параметрам режима проходящего однофазного замыкания на землю дана в [7,8]. Из большого числа факторов, определяющих возможность восстановления изоляции и зависящих от степени расстройки компенсации (в их число входят значение остаточного тока в месте замыкания, напряжение на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги, а также скорость и время восстановления этого напряжения, максимальные перенапряжения и вероятность появления перенапряжений, больших линейного напряжения), решающими в определении требуемой точности настройки являются скорость и время восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги [7].

Расчеты по [8] показывают, что при реальном диапазоне изменения коэффициента успокоения компенсированной сети (0,02—0,07) допустимая расстройка компенсации не превышает 1—2%.

Таким образом, чтобы в реально существующих сетях 6—10 кВ выполнить эти требования и перейти от расстройки компенсации в 5% и более к точности резонансной настройки не хуже 1,5%, необходимо стремиться обеспечить точность настройки комплекса САНК—РУОМ в пределах 1—1,5%.

Известно большое количество способов и устройств настройки дугогасящих реакторов для компенсации токов однофазного замыкания на землю в сетях 6, 10, 35 кВ с изолированной нейтралью [5,9—15]. Практически применяемые используют способы экстремальной настройки реактора до возникновения замыкания по резонансному напряжению смещения нейтрали или по фазовым характеристикам контура нулевой последовательности сети. При этом точная настройка реактора в нормальном режиме приводит к резонансным перенапряжениям и необходимо вводить расстройку компенсации с соответствующим увеличением остаточного тока в режиме однофазных замыканий.

Применение упомянутых способов для ДГР не позволяет использовать их быстро действующую настройку после возникновения замыкания, увеличивает потери на управление в нормальных режимах, в также вносит дополнительную к вынужденной расстройке погрешность из-за нелинейностей вольт-амперных характеристик подмагничиваемых реакторов.

Попытки использовать принцип экстремального фазового регулирования для настройки реактора в режиме замыкания на землю приводят к необходимости существенного усложнения устройств для исключения влияний естественной несимметрии, различной добротности контура сети, высших гармонических, переходных процессов, возможных ложных срабатываний с уходом от резонанса, а также обеспечения надежной работы в режимах замыканий через дугу и переходные сопротивления.

Для систем управления дугогасящими реакторами типа РУОМ целесообразно использовать известный из [4,5,8,9] способ измерения емкостной проводимости контура нулевой последовательности сети внедрением в нейтраль напряжения непромышленной частоты. По току и напряжению непромышленной частоты в нормальном режиме работы определяется проводимость сети на этой частоте, которая линейным коэффициентом отношения частот отличается от проводимости на промышленной частоте. Это можно описать простым выражением [10]:

$$I_{00}/U_{00} = \sqrt{g^2 + b_{C0}^2} \approx b_{C0},$$

где I_{00} — ток непромышленной частоты, протекающий через емкость сети; U_{00} — напряжение непромышленной частоты на емкости сети; $g = 3/r$ — активная проводимость сети, обусловленная сопротивлением утечек изоляции фаз (в реальных сетях этой величиной можно пренебречь); $b_{C0} = 3\omega_0 C$ — емкостная проводимость сети относительно земли на непромышленной частоте.

Проводимость сети относительно земли на промышленной частоте ω пропорциональна полученной по линейному соотношению частот ω/ω_0 , из чего следует, что емкостную проводимость сети можно определять либо по току непромышленной частоты, если поддерживать неизменным напряжение U_{00} , либо по отношению тока и напряжения на непромышленной частоте, что также легко реализуется с помощью умножителя в аналого-

вой технике или алгоритмически в цифровой.

При возникновении замыкания на землю измеренное значение проводимости запоминается, и в соответствии с ним настраивается индуктивность дугогасящего реактора. Такой способ успешно применялся для опытных образцов управляемых подмагничиванием реакторов специалистами Челябинского политехнического и Алма-Атинского энергетического институтов [10, 15].

В Алма-Атинском энергетическом институте для этого использовался дополнительный источник непромышленной частоты, подключаемый к специально предусмотренной сигнальной обмотке реактора. При этом в нормальном режиме подмагничивание реактора отсутствовало, а его настройка производилась после возникновения замыкания по заданному углу управления преобразователем реактора. Угол управления запоминался в момент замыкания и соответствовал такому току подмагничивания реактора по его регулировочной характеристике, который обеспечивает сопротивление реактора, равное сопротивлению контура сети для их настройки в резонанс.

Опытная серия подобных систем была изготовлена и внедрена в электрических сетях 6—10 кВ Казахстана и России. Устройства достаточно надежны и просты, поскольку в качестве генератора непромышленной частоты используется схемное удвоение промышленной частоты питающего напряжения 220 В, 50 Гц, а дополнительного оборудования для передачи в нейтраль не требуется благодаря наличию сигнальной обмотки в дугогасящем реакторе.

Однако опыт эксплуатации выявил целый ряд существенных недостатков, потребовавших сначала модернизации устройства, а затем и принципиальных изменений в способе резонансной настройки в режиме замыкания. Во-первых, выбранное для генератора удвоение частоты 50 Гц с фильтрами высокой добротности привело к невысокой чувствительности на частоте 100 Гц и погрешностям от амплитудно-частотной зависимости в фильтрах при отклонениях промышленной частоты. Экспериментальные исследования показали, что в подобных устройствах частота генератора должна быть существенно ниже 50 Гц.

Во-вторых, существовавшая система настройки по отработке заданного угла управления преобразователем в режиме замыкания

была разомкнутой, т.е. не имела обратных связей по какому-либо из текущих параметров, что не исключало погрешностей как при неточной настройке системы при ее наладке, так и при уходах параметров элементов устройства от температуры и времени.

В-третьих, подобное разомкнутое построение регулятора с выходом на заданную фиксированную уставку определило сравнительно низкое быстродействие системы в момент замыкания, поскольку при небольшом сигнале управления преобразователем реактор может выходить на установленный режим до 2—3 с, что нежелательно. Возможное введение релейной форсировки приведет к усложнению устройства и к переходным процессам в начальный период после замыкания.

И, в-четвертых, что наиболее существенно, из-за нелинейной зависимости регулировочной характеристики реактора (рабочий ток — угол управления) и узкой зоны рабочих углов управления усложняется точная настройка системы при вводе в эксплуатацию, а точная автоматическая отработка задания по углу управления возможна только в небольшой зоне рабочих углов, близких к номинальному току однофазного замыкания, при котором проводилась наладка системы. При значительном изменении конфигурации сети и ее емкостной проводимости погрешность отработки тока компенсации по углу управления возрастает в соответствии с различием реальной и линеаризованной характеристики. Возможная аппроксимация регулировочной характеристики нелинейным функциональным преобразователем усложняет устройство, не исключая полностью погрешностей, и требует при этом учета индивидуальных особенностей характеристик каждого управляемого реактора.

Перечисленные недостатки могут приводить в ряде случаев к значительной погрешности в компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю. Причем один из них снижает качество измерения емкостной проводимости сети в нормальных режимах, другие ухудшают процессы регулирования и точность настройки в режиме компенсации.

Основная погрешность при измерении проводимости обусловлена выбором частоты и реализацией генератора и входных преобразователей 100 Гц. Поскольку в генераторе выходной сигнал обеспечивается удвоением промышленной частоты, его выход-

ная частота зависит от отклонений частоты сети 50 Гц, что в свою очередь приводит к значительным погрешностям при обработке сигналов обратных связей в высокодобротных узкополосных фильтрах входных преобразователей САНК. Кроме того, дополнительные погрешности могут вносить наличие собственной второй гармоники электрической сети и влияние имеющихся на данной подстанции параллельно работающих дугогасящих реакторов.

Точность резонансной настройки реактора в режиме компенсации снижают два фактора: нелинейная регулировочная характеристика ДГР (зависимость тока реактора от угла управления тиристорами) и зависимость рабочего тока реактора от его температуры. При линеаризации регулировочной характеристики для настройки САНК погрешность измерения при отклонениях емкости сети вследствие оперативных переключений может составить 1—2°, что при большой крутизне регулировочной характеристики приводит к увеличению остаточного тока замыкания на 5—7 А. Различие в рабочем токе нагретого и холодного реакторов при неизменном напряжении и угле управления может составлять 10% и более, что для РУОМ средней мощности также составляет 5—7 А. Вместе с остаточным током замыкания, вызванным высшими гармониками и активной составляющей, общий не скомпенсированный ток в месте замыкания может достигать 20 А, что недопустимо. Для успешного гашения дуги при неустойчивых однофазных замыканиях ток в месте КЗ не должен превышать 5—7, максимум 10 А.

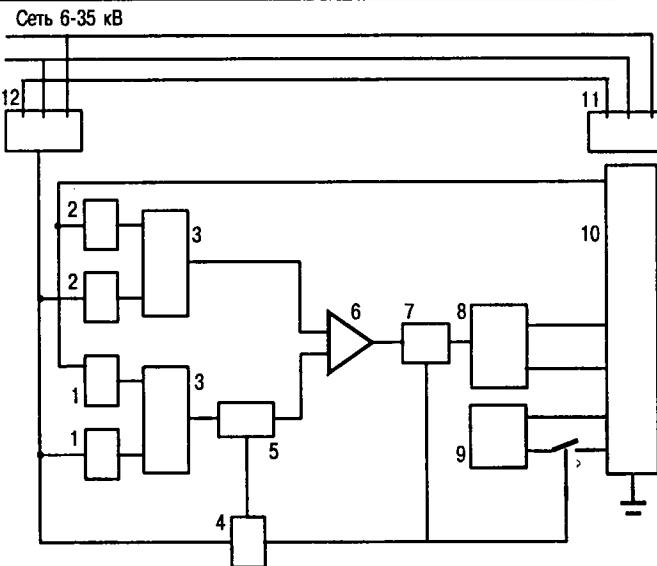
Недостаточная точность резонансной настройки реактора в режиме замыкания по существу была обусловлена тем, что в САНК использовалась разомкнутая система регулирования. Поддержание неизменным углом управления, пропорционального измеренной емкости сети, в принципе не могло обеспечить высокой точности и исключить погрешности, вызванные нелинейностями объекта регулирования, средств измерения и блоков САНК, а также тепловыми погрешностями реактора и элементов системы управления. Кроме того, неизменный номинальный угол управления вносил замедление при выходе реактора на режим компенсации, поскольку в первый момент времени отсутствовала форсировка реактора по управлению. Поэтому

было принято решение от разомкнутой пропорциональной линеаризованной системы регулирования перейти к замкнутой системе регулирования с обратной связью по проводимости реактора.

По перечисленным причинам разработана и реализована в опытных образцах новая система автоматической настройки компенсации, использующая уже апробированные возможности ранее применяемых схем и свободная от присущих им недостатков. В ее основу положен новый принцип отслеживания текущей проводимости реактора после возникновения замыкания на землю по току реактора и его напряжению, соответствующему напряжению смещения нейтрали, а затем сравнения этой проводимости с измеренной до замыкания емкостной проводимостью сети и отработкой рассогласования в замкнутом контуре автоматического регулирования.

Упрощенная блок-схема устройства изображена на рисунке и содержит следующие элементы: входные преобразователи тока и напряжения непромышленной частоты 1, входные преобразователи тока и напряжения промышленной частоты 2, умножители 3, коммутатор 4, запоминающее устройство 5, пропорционально-интегральный регулятор 6, систему импульсно-фазового управления (СИФУ) 7, преобразователь тока подмагничивания реактора 8, источник непромышленной частоты 9, который делением промышленной частоты питания 220 В на три выдает частоту 16,6 Гц, управляемый подмагничиванием реактор со встроенными дополнительными обмотками и трансформатором тока 10, питающий трансформатор 11, в нейтраль которого подключается реактор, и стандартный трансформатор напряжения типа НТМИ или НАМИ 12, со вторичных обмоток которого в схему устройства поступают напряжения смещения нейтрали непромышленной и промышленной частоты.

САНК работает следующим образом. В нормальном режиме источник 9 подключен к дополнительной обмотке реактора, и на входные преобразователи 1 поступают ток и напряжение частотой 16,6 Гц. В результате деления тока на напряжение на выходе одного из умножителей 3 непрерывно отслеживается проводимость контура нулевой последовательности сети, обусловленная ее конфигурацией и емкостью фаз относительно земли. При возникновении замыкания



источник 9 отключается от сигнальной обмотки реактора, последнее значение емкостной проводимости контура запоминается блоком 5, а на СИФУ подается разрешение на выдачу управляющих импульсов в преобразователь.

Одновременно на СИФУ 7 от ПИ-регулятора 6 поступает сигнал управления, соответствующий рассогласованию между измеренной ранее проводимостью сети и проводимостью реактора, получаемой с выхода другого умножителя 3 путем деления поступающих через преобразователи 2 текущих значений тока и напряжения реактора на частоте 50 Гц. В первый момент времени после замыкания ток ХХ реактора близок к нулю, рассогласование максимально, и ПИ-регулятор через СИФУ полностью открывает тиристоры преобразователя 8, обеспечивая тем самым скорейший выход реактора в резонансный режим. При достижении требуемого значения тока подмагничивания и проводимости реактора, равной зафиксированной ранее проводимости емкостного контура сети, сигнал рассогласования на ПИ-регуляторе становится нулевым и далее поддерживаются параметры резонансной настройки до исчезновения или ликвидации персоналом однофазного замыкания.

При замыканиях через переходные сопротивления, когда напряжение смещения нейтрали меньше фазного, соответственно меньше будут напряжение на реакторе и его рабочий ток, поддерживаемый замкнутым контуром регулирования таким образом, чтобы сохранить резонансную настройку. Пос-

ле устранения замыкания и снижения напряжения смещения нейтрали ниже заданной уставки коммутатор с выдержкой времени возвращает схему в исходное состояние для замера текущих значений проводимости контура нулевой последовательности сети на частоте генератора 16,6 Гц.

В случае необходимости перехода на ручной режим управления в оперативных целях или при неисправностях каналов автоматического регулирования переключателем на лицевой панели отключается выход ПИ-регулятора, на СИФУ подается опорный сигнал ручного управления, который может регулироваться персоналом во всем диапазоне рабочих токов реактора, а нормально выставлен на уровень угла и тока подмагничивания, соответствующий резонансной настройке в стандартной конфигурации электрической сети.

Таким образом, новый вариант САНК использует способ, заключающийся в прямом измерении наиболее информативного и достоверного параметра — проводимости реактора и его автоматическом регулировании в режиме замыкания на землю сравнением с предварительно измеренной проводимостью контура нулевой последовательности. Такой способ и реализация САНК на его основе обладают следующими преимуществами:

1. В нормальных режимах обеспечивается отсутствие резонансных перенапряжений в силу максимальной расстройки из-за высокого индуктивного сопротивления неподмагниченного реактора. При этом достаточно точно, надежно и просто (благодаря наличию в реакторе сигнальной обмотки и простоте реализации генератора частоты 16,6 Гц) отслеживается текущее значение емкостной проводимости контура нулевой последовательности сети. Потери на управление реактором отсутствуют.

2. Переход на частоту 16,6 Гц повышает чувствительность измерений и исключает зависимость амплитуды сигналов от отклонений промышленной частоты, позволяя применить широкополосные фильтры с невысокой добротностью.

3. В режимах замыканий на землю достигаются высокое быстродействие, точность и надежность благодаря наличию замкнутой системы регулирования по прямым параметрам реактора. Этим исключаются как погрешности из-за нелинейных регулировочных характеристик (отсутствуют настройка

и регулирование по углу), так и погрешности настройки или уходов параметров элементов контура регулирования под воздействием температуры, старения и т.п. (замкнутая система обеспечивает выход на расчетное значение непосредственным сравнением).

4. При известных коэффициентах передачи стандартных трансформаторов тока и напряжения, обмоток реактора и входных преобразователей САНК может настраиваться при изготовлении и не требовать дополнительной настройки на месте установки. Помимо упрощения и снижения объема пусконаладочных работ это может быть важным в случаях, когда местный оперативный персонал из-за ослабленной изоляции либо по другим причинам не может организовать искусственное однофазное КЗ при наладке реактора. Настройка же прежнего варианта САНК по расчетным значениям тока однофазного замыкания могла приводить к значительным погрешностям при последующей эксплуатации.

Выводы

1. Широкое использование нового типа управляемых подмагничиванием дугогасящих реакторов серии РУОМ позволяет при существующем составе оборудования коренным образом улучшить режимы работы сетей с компенсированной нейтралью.

2. В полной мере реализовать преимущества ДГР позволяют системы управления типа САНК, использующие принцип измерения проводимости контура нулевой последовательности сети наложением тока не-промышленной частоты и содержащие замкнутый контур регулирования индуктивности реактора в режиме замыкания на землю.

3. Использованные в рассмотренной САНК принципы и схемотехнические решения обеспечивают требуемую точность настройки компенсации независимо от внешних возмущающих факторов и нелинейных свойств управляемых подмагничиванием ДГР.

4. Комплект САНК—РУОМ можно использовать в любых сетях — кабельных, воздушных и смешанных, в том числе с повышенными уровнями естественного смещения нейтрали, высших гармоник и активной составляющей.

Список литературы

1. Управляемые реакторы//Электротехника. 1991. № 2.
2. Бродовой Е.Н., Брянцев А.М., Дарвин Н.Д. Управляемые дугогасящие реакторы для электрических сетей 6—35 кВ//Электротехника. 1995. № 4.
3. Бики А.М., Брянцев А.М., Долгополов А.Г. и др. Заземляющие дугогасящие устройства на базе управляемых реакторов//Электротехника 2010. Наука. Производство. Рынок. Сб.докладов. Междунар. симпозиума. М., 1997.
4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971.
5. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. М.: Энергия, 1974 г.
6. Васюра Ю.Ф., Гамилко В.А., Евдокумин Г.А. и др. Защита от перенапряжения в сетях 6—10 кВ//Электротехника. 1994. № 5—6.
7. Петров О.А., Левковский А.И. О допустимой расстройке компенсации в электрических сетях 6—35 кВ//Электрические станции. 1992. № 1.
8. Петров О.А. Точность систем автоматической компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в электрических сетях//Электрические станции. 1989. № 11.
9. Ершов А.М., Петров О.А., Хабаров А.Н. и др. Система автоматического управления дугогасящим реактором в различных режимах работы сети//Электрические станции. 1990. № 3.
10. Гиря В.И., Петров О.А. Автоматическая настройка компенсации емкостных токов//Электрические станции. 1977. № 3.
11. Обабков В.К. Совершенствование фазового способа автоматического поддержания условий компенсации емкостных токов в кабельных сетях 6—35 кВ//Электричество. 1989. № 1.
12. Степанчук Д.Н. и др. Автоматическая настройка плунжерных дугогасящих катушек в кабельных сетях 6—10 кВ//Электрические станции. 1976. № 10.
13. А.с. 1778858 СССР. Устройство для автоматической компенсации емкостного тока сети/О.А.Петров//Открытия. Изобретения. 1992. № 44.
14. А.с.1443077 СССР. Способ настройки компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях/М.И.Гумин//Открытия. Изобретения. 1988. № 45.
15. А.с. 1693680 СССР. Устройство для автоматической настройки дугогасящего реактора, управляемого постоянным током/А.М.Брянцев, Е.Н.Бродовой, К.Н.Нигматуллаев и др./Открытия. Изобретения. 1991. № 43.

Долгополов Андрей Геннадьевич — директор Научно-технического центра ВЭИ в г. Тольятти. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка и исследование устройства защиты от потери возбуждения турбогенераторов и автоматической аварийной разгрузки электрических станций". Доктор электротехники АЭН РФ.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Определение параметров фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов

АНДРИАНОВ М.В., канд.техн.наук, РОДИОНОВ Р.В., инж.

Владимирский ГУ

Методика расчета параметров фильтрующих устройств с использованием цифровых осциллографов тока и напряжения в точках подключения преобразователей частоты для регулирования асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором позволила рассчитать и разработать параметрический ряд фильтров для заданных требований электромагнитной совместимости

Современные преобразователи частоты (ПЧ) для регулирования асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором находят все более широкое применение в технологическом оборудовании. Потребителям регулируемого электропривода предлагается большой выбор ПЧ российского и зарубежного производства, отличающихся техническими и конструктивными параметрами, а также возможностями управления и применения.

Подавляющее большинство предлагаемых ПЧ в диапазоне мощностей до 500 кВт используют в качестве силового преобразователя транзисторной инвертор с ШИМ. В качестве силовых ключей в инверторе применяются IGBT-транзисторы, частота коммутации которых в режиме ШИМ может достигать 50 кГц.

Регулируемый электропривод с ПЧ представляет собой нелинейную нагрузку для питающей сети переменного тока и является источником реактивной мощности, генерирует в сеть гармоники, кратные частоте сети и несущей частоте ШИМ. Повышение уровня электромагнитных помех в сети приводит к сбою в работе других электронных систем, работающих в непосредственной близости от ПЧ или питающихся от общих с ним шин переменного тока. К таким устройствам относятся радиотелефоны, системы телеметрии, измерительные датчики, бытовая техника и др.

Наиболее эффективным способом улучшения электромагнитной обстановки при использовании ПЧ является применение пассивных фильтрующих устройств. При

этом использование помехоподавляющих LC-фильтров представляется более выгодным с технической и экономической стороны.

Допустимый уровень высших гармоник, генерируемых ПЧ, регламентируется соответствующими международными стандартами IEC [1], европейскими нормами EN 61800-3, а также рекомендациями Международного Специального Комитета по Помехам (CISPR). В России уровень допустимых помех также регламентируется стандартами [2], которые устанавливают нормы допускаемых индустриальных радиопомех на промышленных объектах и в жилых зданиях.

Учитывая различные условия эксплуатации и требования ЭМС, комплекс мер по обеспечению требований ЭМС посредством фильтров заключается в выборе оптимальной схемы фильтра и расчете его параметров, при которых обеспечивается допустимый уровень высших гармоник. При этом представляется необходимым учитывать существующий электромагнитный фон в месте подключения ПЧ и требуемый показатель уровня помех для надежной, помехоустойчивой работы всего технологического оборудования и расположенных вблизи электронных средств. В качестве внешних воздействий при расчете фильтрующих устройств целесообразно использовать цифровые осциллографы токов и напряжений в исследуемой точке силового канала электропривода.

Рассмотрим структуру асинхронного электропривода с фильтрующими устройствами (рис.1).

Фильтр №1 предназначен для фильтрации помех, генерируемых ПЧ в сеть. Фильтр

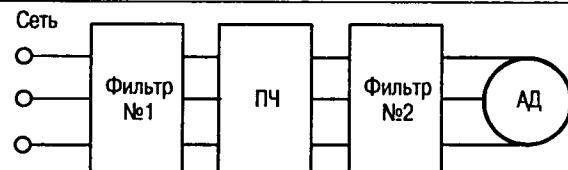


Рис.1.

№2 предназначен для фильтрации высших гармоник, идущих с выхода ПЧ в обмотку двигателя, а также для уменьшения вибраций вала регулируемого электродвигателя. Каждый фильтр состоит из трех идентичных фильтрующих элементов для каждой фазы. Для проектировщика достаточно рассчитать один из трех фильтрующих элементов. Для фильтра №1 эквивалентная схема включения приведена на рис.2, где Z_s — эквивалентное сопротивление электродвигателя; E_n — ЭДС источника помехи; Z_c — эквивалентное сопротивление сети; $Z_{\text{ПЧ}}$ — эквивалентное сопротивление ПЧ.

Источником помехи выступает ПЧ. Так как нагрузкой ПЧ является регулируемый АД, то внутреннее сопротивление источника Z_b помехи E_n определяется выражением

$$Z_b = Z_s + Z_{\text{ПЧ}}. \quad (1)$$

Приемником помехи является сеть переменного тока. При этом за нагрузку фильтра принят эквивалент сети Z_c по ГОСТ 11001-80.

Для фильтра №2 эквивалентная схема включения имеет вид, приведенный на рис.3.

Источником помехи выступает ПЧ, а при-

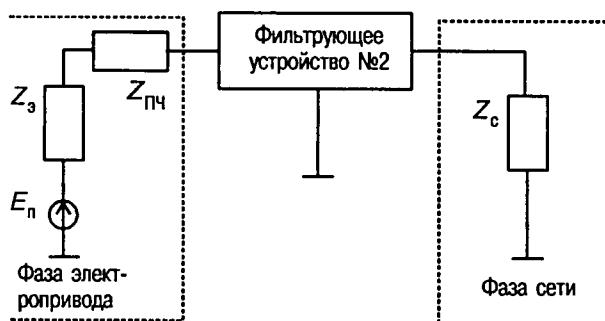


Рис.2.

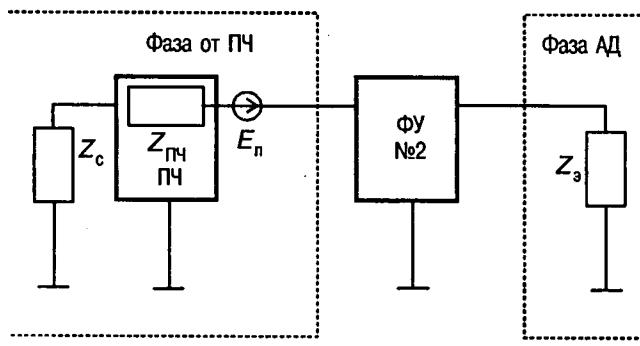


Рис.3.

емником является фаза АД. Внутреннее сопротивление

$$Z_b = Z_c + Z_{\text{ПЧ}}. \quad (2)$$

Моделирование и передаточные функции фильтров

Расчет оптимального типа и параметров фильтра с помощью имитационного моделирования позволяет свести задачу к исследованию (анализу) модели фильтра, на входе которого имеется изображение помехи $E_n(s)$, а на выходе — изображение напряжения $U(s)$, создаваемого на нагрузке.

Нагрузка моделируется сопротивлением активно-индуктивного характера:

$$Z_h = R_h + jwL_h. \quad (3)$$

Источник помехи моделируется как источник ЭДС с внутренним сопротивлением:

$$Z_b = R_b + jwL_b. \quad (4)$$

Изображению помехи соответствует функция во временной области:

$$E_n(s) \Rightarrow e(t) = \sum_{t=0}^{\infty} E_i \sin(i\omega_0 t + \phi_i), \quad (5)$$

где E_i — действующее значение ЭДС i -й гармоники; ω_0 — частота первой гармоники; ϕ_i — фаза i -й гармоники.

Изображению напряжения, создаваемого помехой на нагрузке, соответствует функция во временной области:

$$U(s) \Rightarrow u(t) = \sum_{t=0}^{\infty} U_i \sin(i\omega_0 t + \psi_i), \quad (6)$$

где U_i — действующее значение напряжения i -й гармоники; ψ_i — фаза i -й гармоники.

При этом выходной сигнал рассчитывается по следующим формулам:

$$U_t = A(i\omega_0)E_t; \quad (7)$$

$$\psi_i = \phi(i\omega_0)\phi_i, \quad (8)$$

где $A(i\omega_0)$ и $\phi(i\omega_0)$ — значения АЧХ и ФЧХ системы электропривода с фильтром на частотах, кратных частоте первой гармоники.

Рассмотрим наиболее распространенные схемы помехоподавляющих LC-фильтров.

1. Г-образный с конденсатором на входе (рис.4,а).

Передаточная функция: $H(s) = \frac{U(s)}{E_n(s)};$

$$H(s) = \frac{Z_h}{Z_b(1 + Z_L/Z_C + Z_h/Z_C) + Z_L + Z_h}. \quad (9)$$

АЧХ и ФЧХ имеют вид:

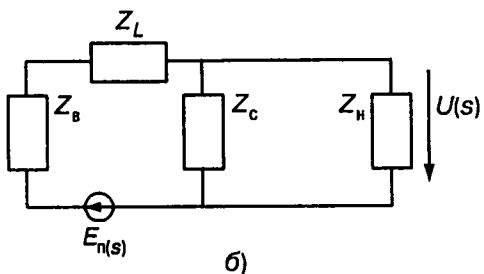
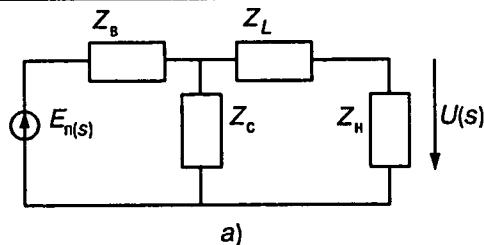


Рис.4.

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_H}{R_H}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_H + R_B - \omega^2 C(LR_B + L_B R_H + R_B L_H);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(L + L_B + L_H + CR_B R_H) - \omega^3 CL_B(L + L_H);$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}.$$

Если $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$;

$$A = A_1/A_2; \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

2. Г-образный с конденсатором на выходе (рис.4, б).

Передаточная функция:

$$H(s) = \frac{Z_H}{(Z_B + Z_L)(1 + Z_L/Z_C) + Z_H}. \quad (10)$$

АЧХ и ФЧХ имеют вид:

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_H}{R_H}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_H + R_B - \omega^2 C(LR_B + L_B R_H + R_H L);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(L_H + CR_B R_H) - \omega^3 CL_H(L + L_B);$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}.$$

Если $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$;

$$A = A_1/A_2; \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

3. Т-образный (рис.5, а).

Передаточная функция:

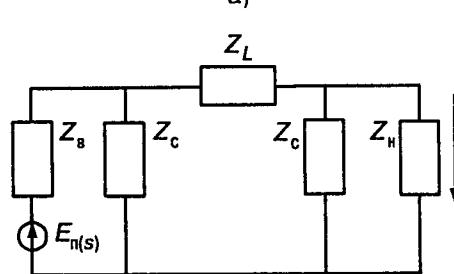
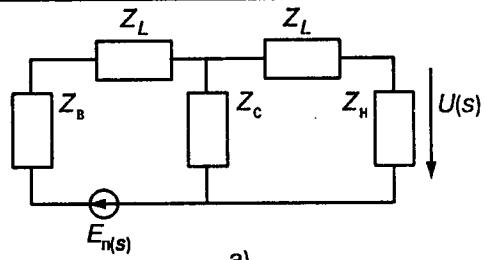


Рис.5.

$$H(s) = \frac{Z_H}{(Z_B + Z_L)(1 + Z_L/Z_C + Z_H/Z_C) + Z_L + Z_H}. \quad (11)$$

АЧХ и ФЧХ имеют вид:

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_H}{R_H}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_H + R_B - \omega^2 C(LR_B + L_B R_H + R_H L + R_B L_H);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(2L + L_B + L_H + CR_B R_H) - \omega^3 C(L_B + L)(L + L_H);$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}.$$

Если $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$;

$$A = A_1/A_2; \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

4. П-образный фильтр (рис.5, б).

Передаточная функция:

$$H(s) = \frac{Z_H}{Z_B(1 + Z_L/Z_C)(1 + Z_H/Z_C) + \rightarrow + Z_L(1 + Z_H/Z_C) + Z_H}. \quad (12)$$

АЧХ и ФЧХ имеют вид:

$$A_1 = \sqrt{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}; \quad \varphi_1 = \arctg\left(\frac{\omega L_H}{R_H}\right);$$

$$\operatorname{Re}[A_2] = R_H - \omega^2 CLR_H + (1 - \omega^2 LC) \times (R_B(1 - \omega^2 L_H C) - \omega^2 L_B R_H C);$$

$$\operatorname{Im}[A_2] = \omega(L + L_H) - \omega^3 CLL_H + (1 - \omega^2 LC)(\omega R_H R_B C + \omega L_B(1 - \omega^2 L_H C));$$

$$A_2 = \sqrt{(\operatorname{Re}[A_2])^2 + (\operatorname{Im}[A_2])^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]}$$

Если $\operatorname{Re}[A_2] < 0$, то $\varphi_2 = \arctg \frac{\operatorname{Im}[A_2]}{\operatorname{Re}[A_2]} + \pi$;

$$A = A_1/A_2; \quad \varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

При выборе конкретной схемы фильтра целесообразно придерживаться рекомендаций (таблица), учитывающих внутреннее сопротивление источника помехи и нагрузки [3].

Фильтр	Внутреннее сопротивление источника	Сопротивление нагрузки
Г-образный с конденсатором на входе	Высокое	Низкое
Г-образный с конденсатором на выходе	Низкое	Высокое
Т-образный	Низкое	Низкое
П-образный	Высокое	Высокое

Синтез и проектирование помехоподавляющих фильтров

Приведенный анализ схемотехнических решений фильтров для подавления высокочастотных помех и рекомендации по выбору конкретной схемы позволили систематизировать эти данные в методику проектирования фильтров для стандартного ряда короткозамкнутых АД. В данной работе были приняты определенные ограничения по мощности рассматриваемых АД в диапазоне от 1,5 до 75 кВт. При необходимости ряд мощностей АД может быть расширен в пределах разработанной методики при введении дополнительных справочных данных о других АД. Расчет и проектирование производятся в несколько этапов:

1. Синтез фильтра по заданному допустимому уровню электромагнитных помех (ЭМП) и мощности двигателя.

На этом этапе проводится анализ допустимого уровня помех, вносимых ПЧ, при котором не нарушается нормальный режим работы остального технологического оборудования. В качестве исходного значения допустимого уровня помех может быть принято:

- типовое значение для заданного диапазона частот;
- значение, учитывающее специфику применения ПЧ на конкретном объекте;
- нормированный спектр, удовлетворяющий требованиям стандартов по ЭМС.

Принятое значение допустимого уровня помех сравнивают с результатами измерений реального уровня помех в системе электропитания с ПЧ (без фильтра) [4].

Затем по требуемой мощности регулируемого двигателя и ПЧ рассчитываются основные параметры фильтра: индуктивность дросселя и емкость фильтрующего конденсатора.

2. Проверка полученных показателей качества фильтра.

На этом этапе производится оценка затухания на частоте помехи с использованием расчетных значений параметров фильтра, при которых должно обеспечиваться снижение уровня ЭМП. Фильтр должен максимально ослаблять высшие гармоники и передавать в нагрузку основную гармонику с наименьшим ослаблением. Затухание в полосе частот регулирования характеризует потери мощности в фильтре. В случае недовлетворительных показателей параметры фильтра подбираются заново.

Если затухание в полосе частот регулирования меньше 0, то это означает, что на выходе фильтра резонанс. Это возможно при использовании П-образного фильтра. В этом случае необходимо выбирать другой тип фильтра.

3. Расчет дросселя фильтра.

Результатом расчета фильтра являются значения индуктивности дросселя и емкости конденсатора. Значение емкости конденсатора при расчете принимается равным ближайшему типовому значению, выбранному из стандартного ряда конденсаторов на соответствующее рабочее напряжение. Исходя из этого окончательный расчет фильтра заключается в проектировании дросселя.

Расчет и проектирование дросселя сводятся к получению конструктивных данных, достаточных для изготовления его в промышленных условиях и встраивания в систему электропитания комплектного электропривода.

Исходные данные для расчета дросселя:

- ток, протекающий через обмотку I_0 , А;
- индуктивность дросселя, полученная при расчете фильтра $L_{\text{др}}$, мГн;
- тип сердечника дросселя (Ш-образный или ленточный);
- материал сердечника, его магнитная проницаемость μ ;
- плотность тока ($3-4 \text{ А}/\text{мм}^2$), для дросселей с малым количеством витков $4 \text{ А}/\text{мм}^2$.

(для экономии меди).

Результатом расчета дросселя являются следующие параметры:

1. Типоразмер сердечника.
2. Тип электротехнической стали.
3. Диаметр провода.
4. Количество витков.
5. Габариты дросселя.

Выводы

1. Обоснована необходимость применения пассивных фильтрующих устройств в комплектном частотно-регулируемом электроприводе с АД.

2. Предложено для расчета оптимальных параметров фильтров использовать результаты измерения реального уровня ЭМП и их спектрального состава в месте подключения комплектного электропривода.

3. Описанная методика определения параметров фильтрующих устройств использована при проектировании и разработке параметрического ряда фильтров для промышленных серий ПЧ и комплектных электроприводов, удовлетворяющих требованиям ЭМС.

Список литературы

1. IEC 1800-3-EMC. Product Standard for Power Drive System.
2. ГОСТ 13661-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Пассивные помехоподавляющие фильтры и элементы.
3. Векслер Г.С. и др. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев.: Техника, 1990.
4. Пат.2003125 РФ. Измерительный преобразователь искажений формы кривой переменного напряжения/М.В.Андреев, В.П.Комлев//Открытия. Изобретения. 1993. № 41—42.

ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ

Технико-экономические характеристики специальных высоковольтных кабелей нового поколения для электропитания погружных нефтенасосов

МЕСЕНЖНИК Я.З., доктор техн.наук, проф. НОВИКОВ Д.В., инж. (ВНИИКП),
ПИРОГОВСКИЙ Р.А., инж. (ВНИИЭМ)

Для питания электроэнергией погружных силовых устройств, работающих в скважинах, применяются следующие основные виды кабельных изделий: кабельные линии для погружных электродвигателей нефтенасосов, токоподводы для электробуров и электровибробуров, кабели для теплонагревателей и некоторых других энергетических устройств. Ко всем указанным кабельным изделиям предъявляются повышенные требования, вызванные сложными жесткими эксплуатационными условиями и сравнительно длительной работой в этих условиях.

Кабельные линии для погружных электродвигателей нефтенасосов (кабельные линии для нефтедобычи) составляют наиболее обширную и широко применяемую группу из всех указанных кабельных изделий и предназначены для длительной работы в действующих нефтяных скважинах.

Кабельные линии включают в себя собственно кабели, соединительные муфты (сростки) и муфты кабельных вводов.

Выпуск отечественных кабелей для погружных электронасосов начал более 40 лет назад, и за этот период их конструкция неоднократно претерпевала изменения. До 1978 г. кабели в основном выпускались с резиновой изоляцией в резиновой оболочке марок КРБК и КРБП.

Несмотря на ряд преимуществ (сравнительно высокие нагревостойкость и формоустойчивость, низкая проницаемость оболочек для жидкостей), кабели типа КРБК (КРБП) оказались неработоспособными в скважинах с высоким содержанием газов и высокоагрессивных компонентов. В таких условиях наблюдались высокая скорость старения изоляции и разрывы оболочек за счет существенной проницаемости оболочек для

газов. Все это вызвало необходимость разработки новых кабелей с полиолефиновой изоляцией [1, 2].

В 1972 г. был наложен серийный выпуск кабелей с изоляцией и в оболочке из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) марок КПБК и КПБП.

В настоящее время для погружных нефтеподъемников отечественная кабельная промышленность производит в основном кабели марок КПБК и КПБП. Данные кабели могут эксплуатироваться при температуре эксплуатационной среды до 90°C, что подходит для большинства действующих скважин.

В 1996 г. кабельным заводом АООТ «Полдольсккабель» была произведена опытная партия нефтепогружного кабеля марки КППБПТ, разработанного с участием ОАО «ВНИИКП» и рассчитанного для эксплуатации в скважинах с температурой эксплуатационной среды до 120°C. С 1997 г. началось серийное изготовление этого кабеля.

Особенностью конструкции нефтепогружного кабеля марки КППБПТ (КППБКТ) является применение изоляции из радиационно-сшитого полиэтилена высокой плотности и оболочки-протектора из сополимера пропилена [3].

Установки для погружных насосов для добычи нефти комплектуются кабельными линиями, в которых используют кабели марок КПБП и КПБК сечением 3×10,3×16 и 3×25 мм², при этом кабели сечением 10 и 16 мм² обеспечивают комплектацию 98% установок и большая часть приходится на кабели сечением 16 мм².

Исходя из общих соображений, применение изоляции из радиационно-модифицированного полиэтилена и оболочки из сополимера пропилена может позволить, при прочих равных условиях, увеличить плотность передаваемого по кабелю тока.

Целью данной работы является рассмотрение технико-экономических характеристик кабелей КППБПТ 3×10 мм² в случае замены ими серийных кабелей КПБП 3×16 мм². Для этого необходимо прежде всего сравнить длительно-допустимые токовые нагрузки, эксплуатационную надежность и стоимость рассматриваемых кабелей.

Расчет длительно-допустимых токовых нагрузок на кабели

Проведем тепловые расчеты для кабелей КПБП и КППБПТ сечением 3×10 и 3×16 мм² при температуре на токопроводящей жиле

95°C для КПБП и 125°C для КППБПТ и температурах эксплуатационной среды:

20, 60, 80, 90°C для КПБП и 20, 60, 80, 90, 120°C для КППБПТ.

Теплофизические характеристики изоляции кабеля в скважине

Удельная теплопроводность полимеров λ зависит от их структуры. Она увеличивается с возрастанием молекулярной массы и степени кристалличности полимера.

Теплопроводность зависит от температуры [1]:

$$\lambda_t = \lambda_n (1 \pm TK\lambda K_t L), \quad (1)$$

где λ_n — удельная теплопроводность при нормальных условиях; $TK\lambda$ — температурный коэффициент теплопроводности.

Полная теплопроводность с учетом распределения температуры по стволу скважины [2]

$$\Phi_{\Sigma_t} = \frac{\pi L \lambda_n}{\ln \frac{K_1 D_{iz}}{K_2 d_{jk}}} (2 \pm TK\lambda K_t L), \quad (2)$$

где K_1, K_2 — коэффициенты изменения соответственно D_{iz} и d_{jk} в скважинных условиях; K_t — геотермический градиент; d_{jk} — диаметр ТПЖ; D_{iz} — диаметр жилы по изоляции; L — длина кабеля или глубина скважины.

Теплопроводность изоляции кабелей изменяется с увеличением времени эксплуатации. Изменение λ определяется степенью старения как химического, так и теплового. Особенно ярко данное явление выражено у оболочки, при этом Δλ зависит от состава скважинной среды. Обычно старение полимера приводит к уменьшению λ, однако в условиях нефтеискажин, где ряд компонентов имеет более высокие, чем полимер, значения λ, старение может вызвать рост теплопроводности.

Тепловое сопротивление как изоляции, так и оболочки (оболочек по каждой жиле) [2]

$$R_t = \frac{\ln \frac{K_1 D_{iz}}{K_2 d_{jk}}}{\pi L \lambda_n (2 \pm TK\lambda K_t L)}. \quad (3)$$

С учетом процесса старения и влияния давления выражение (3) можно представить как

$$R_t = \frac{\rho_t K_c (R_t) \ln \frac{K_1 D_{iz}}{K_2 d_{jk}}}{2\pi [1 \pm TK\lambda K_t L \pm BK\lambda_p' (L - h_d)]}, \quad (4)$$

Таблица 1

Конструктивные размеры кабеля КПБП (КППБПТ)	Сечение кабеля, мм ²	
	3×10	3×16
Диаметр токопроводящей жилы ($d_{ж}$), мм	3,57 (3,57)	4,50 (4,50)
Радиальная толщина изоляции (Δ_2), мм	2,9 (2,6)	2,9 (2,6)
Диаметр жилы по изоляции ($D_{из}$), мм	9,4 (8,8)	10,3 (9,7)
Радиальная толщина подушки (Δ_4), мм	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)
Наружные размеры, мм	12,0×30,8 (11,3×28,9)	12,9×33,5 (12,2×31,6)

Примечание. Изоляция кабеля КПБП — однородная (из ПЭВП), а изоляция кабеля КППБПТ — комбинированная (1-й слой — радиационно-модифицированный ПЭВП, радиальная толщина 1,3 мм; 2-й слой — сополимер пропилена, радиальная толщина 1,3 мм).

где $K_c(R_t)$ — коэффициент, учитывающий влияние эксплуатационной среды на R_t ; ρ_t — удельное тепловое сопротивление материала изоляции; $BK\lambda_p'$ — барический коэффициент теплопроводности; h_d — высота столба уровня жидкости.

Для трехжильного круглого кабеля в общей оболочке по всем жилам суммарное R_t выражается в виде формулы, приведенной в [2]:

$$R_t = \frac{\rho_t K_c(R_t)(0,85 + 0,2n) \ln[(8,3 - 2,2n)m + 1]}{2\pi[1 \pm TK\lambda K_t L \pm BK\lambda_p'(L - h_d)]}, \quad (5)$$

где $m = (\Delta_{из} + \Delta_{об})/(2r_{ж})$; $n = \Delta_{об}/\Delta_{из}$; $\Delta_{из}$ и $\Delta_{об}$ — радиальная толщина соответственно изоляции и оболочки; $r_{ж}$ — радиус токопроводящей жилы (ТПЖ).

Суммарное тепловое сопротивление плоского кабеля КПБП рассчитывается с учетом того, что в наиболее тяжелых условиях находится центральная ТПЖ [2]:

$$R_t = 3 \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \frac{D_{из}}{2r_{ж}} + \frac{\rho_t}{2\pi} \frac{2D_{из}}{4D_{из} + \pi H_1} \ln \frac{4D_{из} + \pi H_{об}}{4D_{из} + \pi H_1}, \quad (6)$$

где H_1 , $H_{об}$ — высота кабеля соответственно под оболочкой и по оболочке; $H_{об} = H_1 + 2\Delta_{об}$.

Обычно оболочка накладывается плотно к изоляции, при этом $H_1 = D_{из}$ и (6) можно упростить:

$$R_t = 0,48\rho_t K_c(R_t) \times \\ \times \left[\ln \frac{D_{из}}{2r_{ж}} + 0,094 \ln \frac{0,88(1,14D_{из} + \Delta_{из})}{D_{из}} \right]. \quad (7)$$

В связи с разогревом изоляции кабелей при передаче больших токов вопрос определения допустимого тока $I_{доп}$ имеет важное значение. Формула расчета длительно-допустимого тока нагрузки сводится к выражению

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{T_{доп} - T_{о.с}}{nR_{ж.н}[1 + TKR_{ж}(T_{ж} - T_{о.с})](R_{т.ж} + R_{т.о.с})}}, \quad (8)$$

где $T_{доп}$ — допустимая температура нагрева изоляции; $T_{о.с}$, $T_{ж}$ — температура соответственно окружающей среды и на жиле кабеля; $R_{т.ж}$, $R_{т.о.с}$ — тепловые сопротивления соответственно кабеля и окружающей среды; n — число ТПЖ кабеля; $R_{ж.н}$ — омическое сопротивление ТПЖ при нормальных условиях; $TKR_{ж}$ — температурный коэффициент $R_{ж}$.

С достаточной для сравнительных практических расчетов точностью расчет теплового сопротивления кабеля можно провести по упрощенной методике [4]:

$$R_{ж} = \frac{1}{3} \left(\frac{\rho_1}{2\pi} \ln \frac{D_{из}}{d_{ж}} + R_n \right), \quad (9)$$

где ρ_1 — удельное тепловое сопротивление изоляции (для полиэтилена $\sigma_1 = 400^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$); R_n — тепловое сопротивление защитных покровов, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$.

Формула (9) подходит для расчета теплового сопротивления кабеля КПБП с однородной изоляцией. Для расчета теплового сопротивления кабеля КППБПТ с комбинированной изоляцией преобразуем формулу (9):

$$R_{ж} = \frac{1}{3} \left(\frac{\rho_1}{2\pi} \ln \frac{d_1}{d_{ж}} + \frac{\rho_2}{2\pi} \ln \frac{D_{из}}{d_1} + R_n \right), \quad (10)$$

где d_1 — диаметр жилы по первому слою изоляции, мм; ρ_2 — удельное тепловое сопротивление сополимера пропилена, равное $600^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$;

$$R_n = \frac{\rho_n}{2\pi} \ln \frac{D_n}{D}; \quad (11)$$

ρ_n — удельное тепловое сопротивление защитных покровов, равное $300^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$;

$D_{\text{пп}}$ — эквивалентный диаметр кабеля по защитному покрову (бронеленте), мм; D — эквивалентный диаметр кабеля без защитного покрова (под бронелентой), мм;

$$D_{\text{пп}} = D + 2\Delta_{\text{бр}} + 2\Delta_4; \quad (12)$$

$$D = A + \frac{2(B - A)}{\pi}; \quad (13)$$

A — диаметр изолированной жилы (высота), мм; B — величина, равная ширине параллельно уложенных жил в плоском кабеле (в нашем случае $B = 3A$), мм; $\Delta_{\text{бр}}$ — толщина брони, мм; Δ_4 — радиальная толщина подушке под броню.

Тепловое сопротивление окружающей среды

$$R_{\text{o.c}} = 0,266 \frac{\rho_z}{2\pi} \ln \frac{2L}{r_z}, \quad (14)$$

где ρ_z — удельное тепловое сопротивление земли, равное $120^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}/\text{Вт}$; L — расстояние от центра кабеля до обсадной колонны (земли), принимаем 60 мм; $r_z = D_{\text{пп}}/2$ — эквивалентный радиус кабеля, мм.

Суммарное тепловое сопротивление

$$R_t = R_k + R_{\text{o.c}}. \quad (15)$$

Электрическое сопротивление 1 см ТПЖ при максимально-допустимой температуре на жиле:

$$R = R_{20}[1 + \alpha(T - 20)], \quad (16)$$

где R_{20} — электрическое сопротивление жилы при температуре 20°C , Ом/см; α — температурный коэффициент электрического сопротивления, равный $0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$; T — максимально-допустимая температура на жиле, равная 95°C — для КПБП и 125°C — для КППБПТ;

$$R_{20} = \rho_{\text{ж}}/q; \quad (17)$$

$\rho_{\text{ж}}$ — удельное объемное сопротивление меди, равное $1,84 \cdot 10^{-4}$ Ом·мм 2 /см [5]; q — номинальное сечение токопроводящей жилы, мм 2 .

Длительно-допустимая токовая нагрузка на кабель

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{T - T_{\text{o.c}}}{nR \cdot S}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{o.c}}$ — температура окружающей жидкости (температура эксплуатационной среды) $^{\circ}\text{C}$; n — количество жил кабеля, равное 3;

По приведенным формулам были рассчитаны длительно допустимые токовые нагрузки для температур: $20, 60, 80, 90^{\circ}\text{C}$ (КПБП) и $20, 60, 80, 90$ и 120°C (КППБПТ). Получен-

Таблица 2

Марка и сечение кабеля, мм 2	Длительно-допустимая токовая нагрузка, А				
	Температура скважинной жидкости, $^{\circ}\text{C}$	20	60	80	90
КПБП 3×10	174	119	78	45	—
КПБП 3×16	233	159	104	60	—
КППБПТ 3×10	191	150	125	110	41
КППБПТ 3×16	257	202	168	148	56

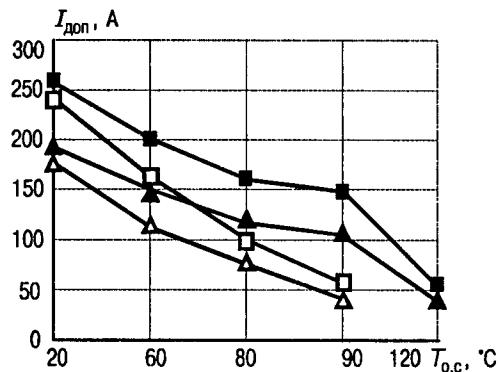


Рис.1. Допустимые токовые нагрузки:

—Δ— КПБП 3×10; —□— КПБП 3×16; —▲— КППБПТ 3×10; —■— КППБПТ 3×16

ные данные приведены в табл.2, по ним же построены зависимости длительно-допустимых токовых нагрузок на кабели КПБП 3×10, 3×16 и КППБПТ 3×10, 3×16 мм 2 от температуры скважинной жидкости (рис.1).

Результаты расчетов показывают, что при максимальной температуре эксплуатации длительно-допустимый ток нагрузки кабеля КППБПТ 3×10 существенно выше, чем длительно-допустимый ток нагрузки кабеля КПБП 3×16 на 45%.

Эксплуатационная надежность

Опыт эксплуатации силовых кабельных линий для нефтедобычи в различных районах страны показывает, что выход их из строя обусловлен следующими причинами: электрическим пробоем изоляции кабеля или снижением электрического сопротивления изоляции ($R_{\text{из}}$) ниже допустимых значений; электрическим пробоем изоляции соединительной муфты или кабельного ввода, механическим повреждением указанных элементов, разрывом и полным нарушением радиальной герметичности оболочки; коррозионными и механическим износом брони.

Снижение $R_{\text{из}}$ и пробой изоляции кабелей (исключая механические повреждения) происходят за счет скрытых дефектов и обуславливаются микро- (МТ) и субмикрот-

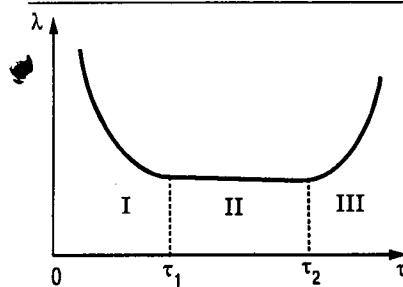


Рис.2. Зависимость интенсивности отказов кабельных линий от времени эксплуатации:

I — период приработки; II — период нормальной эксплуатации; III — период износа

рещинами (СМТ), небольшими, но многочисленными газовыми включениями, снижением радиальной толщины изоляции и оболочки, крупносферолитной структурой полимера, остаточными механическими напряжениями. Эти явления способны проявляться через время эксплуатации, превышающее время приработки кабельных линий в нефtekважинах.

Микротрещины проявляют себя в виде последующего нарушения герметичности изоляции. Такое явление в изоляции обусловлено развитием частичных разрядов и соответствующей эрозии поверхности. Кроме того, физическое и химическое воздействия среды вызывают расширение СМТ и МТ. В общем случае МТ развиваются под воздействием механических напряжений. Их перерастание в макротрещины (МАТ) вызывает выход из строя кабельных линий. Крупные структурные и надмолекулярные образования являются одним из самых распространенных видов скрытых дефектов, приводящих к растрескиванию полимера при физическом воздействии среды.

По времени проявления скрытые дефекты в кабельных линиях можно разделить на три категории (рис.2) [1]. Первая категория таких дефектов приводит к выходу из строя линий в период их приработки в скважине, т.е. при времени эксплуатации до 20 сут. К наиболее характерным причинам относятся технологические нарушения герметичности изоляции (при неповрежденной оболочке) или недостаточная адгезия между изоляциями соединительных муфт и кабеля, наличие в изоляции элементов кабельной линии проводящих примесей, уменьшение радиальной толщины изоляции до 0,3 мм (с учетом наличия газовых включений и других дефектов). В среднем данный тип дефектов составляет около 40% всех скрытых дефектов, встречающихся в кабельных линиях.

Вторая категория дефектов проявляется в период нормальной эксплуатации, при

этом время до выхода из строя кабельной линии лежит в пределах 20—200 сут. Возникновение этого вида дефектов обусловлено наличием в изоляции элементов линии значительных газовых включений, образованием в полимере укрупненных структур и остаточных механических напряжений, наличием на токопроводящих элементах острых выступов (игольчатые электроды).

Указанные причины приводят к электрическому и физическому старению полимеров. Последнее явление вызывает перерастание МТ в МАТ, значительное набухание и газонасыщение полимера. В конечном итоге скрытые дефекты приводят к недопустимому уменьшению $R_{из}$ и электрическому пробою изоляции элементов кабельной линии. В среднем дефекты этой категории составляют около 48% общего количества скрытых дефектов.

Третья категория скрытых дефектов приводит к выходу из строя кабельных линий в период их повышенного износа, т.е. при времени эксплуатации более 200 сут., при этом их проявление вызвано как электрическим и физическим, так и химическим старением полимеров. Наиболее характерные явления в этот период — перерастание СМТ в МТ и затем в МАТ, возникновение и развитие триингов, возникновение МТ на границе полимера у газового включения за счет эрозии поверхности и МАТ на участках остаточных локальных механических напряжений и некоторые другие. Наиболее распространенной (более 70%) конечной причиной выхода из строя кабельных линий в этот период является снижение $R_{из}$ ниже допустимого на значительных по длине участках. В среднем количество дефектов этой категории составляет 12% общего количества скрытых дефектов [1].

Для определения установленной работоспособности полимерной изоляции нефтепорожных кабелей (в том числе и выявления скрытых дефектов) проводятся испытания изоляции образцов данных кабелей на надежность [6].

Методика основана на физическом принципе, согласно которому старение изделий с полимерной изоляцией при температурах ниже температуры плавления происходит, главным образом, за счет изменения физического состояния полимера, обусловленного процессом вторичной кристаллизации. Этот процесс, протекающий при практичес-

ки неизменном объеме, приводит к нарушению сплошности и целостности полимера вплоть до образования трещин задолго до окончания времени ингибиционного старения обеспечивающего наличием введенных в полимер стабилизаторов.

Отказ полимерной изоляции (образование трещин) при старении происходит при достижении ею определенного критического состояния, связанного с термической предысторией полимерной изоляции, напряжениями в ней, обусловленными технологией изготовления и конструкцией изделий.

Время отказа полимерной изоляции определяют, исходя из параметров кинетики ускоренного старения образцов в напряженном состоянии в режиме деформации в поверхностно-активной среде. Наиболее вероятное время отказа определяют в предположении о логарифмическом нормальному законе распределения количества отказов во времени.

Испытаниям подвергаются отрезки изолированных жил кабелей, не имеющие механических повреждений изоляции, которые навиваются на намоточном станке плотно виток к витку на стержни (оправки) с диаметром, равным полуторократному наружному диаметру изолированной жилы. Образцы помещаются в плотно закрывающие емкости термостатов с 10% водным раствором поверхностно-активного вещества ОП-10 и выдерживаются при температуре термостатирования 343 ± 2 К в течение 12 ч.

Критерием оценки является отсутствие трещин (отказов) на образцах после 12 ч выдержки в описанных условиях.

В табл.3 приведены результаты испытаний образцов кабелей КПБП и КППБПТ на надежность, откуда видно, что эксплуатационная надежность кабеля КППБПТ в значительной степени превосходит по времени эксплуатационную надежность кабеля КПБП. Срок эксплуатации кабеля КППБПТ может значительно превышать срок эксплуатации кабеля КПБП в одних и тех же условиях, что можно объяснить удачной конструкцией кабеля КППБПТ, где в качестве изоляции применен радиационно-модифицированный полизтилен, а в качестве оболочки — сополимер пропилена.

Эксплуатационные испытания подтвердили высокую надежность кабеля КППБПТ в максимально жестких условиях, в частности, на нефтепромыслах ОАО «Кондпетролеум».

Таблица 3

Количество выдержавших испытания образцов, %

Марка кабеля	Время выдержки образцов в ОП-10, ч					
	12	16	20	24	36	240
КППБПТ	100	100	100	100	100	100
КПБП	93,4	86,6	73,3	26,6	13,3	0

В заключении этого нефтяного объединения отмечено, что из всех отечественных кабелей для установок электроцентробежных нефтеподъемных насосов рассматриваемый кабель является наиболее приемлемым благодаря повышенным рабочей температуре и эксплуатационной надежности.

Эти выводы являются предварительными. Эксплуатационные исследования продолжаются по методике [7].

Стоимостные характеристики кабелей

Стоимостные данные приведены в процентах по отношению к цене кабеля КПБП 3×10 мм², которая принята за 100% (рис.3).

Разница в цене по отношению к кабелю КПБП 3×10 составляет:

для КППБПТ 3×10 — 10%; для КПБП 3×16 — 26% и для КППБПТ 3×16 — 38%, из чего видно, что кабель КППБПТ 3×10 дешевле кабеля КПБП 3×16 на 16%.

Выводы

1. Сравнение расчетных значений допустимых токов свидетельствует о возможности замены кабеля КПБП 3×16 кабелем КППБПТ 3×10 .

2. Замена кабеля КПБП 3×16 кабелем КППБПТ 3×10 уменьшает затраты при покупке.

3. Эксплуатационная надежность кабеля КППБПТ позволяет снизить затраты на спуско-подъемы по причине выхода кабеля из строя.

4. Прогнозируемый срок службы кабеля КППБПТ существенно превышает срок службы кабеля КПБП.

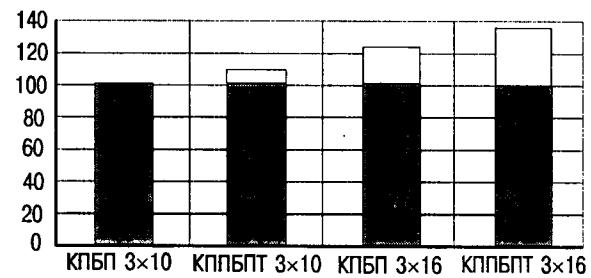


Рис.3. Диаграмма цен:

- — разница в цене по отношению к КПБП 3×10 ;
- — цена КПБП 3×10

Список литературы

1. Месенжник Я.З., Осягин А.А. Силовые кабельные линии для погружных электросистем. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Месенжник Я.З. Кабели для нефтегазовой промышленности. Ташкент: Фан, 1972.
3. Месенжник Я.З., Новиков Д.В., Пироговский Р.А. Новые исследования в области создания силовых кабелей повышенной теплостойкости для погружных нефтенасосов//Электротехника. 1997. № 6.
4. Месенжник Я.З. и др. Разработка усовершенствованного кабеля для УЭЦН. М.: ВНИИКП, 1992.
5. Малкин Х.Р., Понерстник М.Ю., Салютина М.А. Справочник по силовым кабелям и проводам. Ленинград: Судпромгиз, 1961.
6. Брагинский Р.П., Григорьян А.Г., Месенжник Я.З. Методика определения показателей надежности кабелей для погружных электронасосов с полимерной изоляцией. МИ 16.КОО-098-88. М.: ВНИИКП, 1988.
7. Месенжник Я.З., Осягин А.А. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на характеристики силовых кабелей для нефтедобычи//Электротехника. 1984. № 7.

КАБЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

О ПРОДОЛЬНОЙ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КАБЕЛЕЙ С ВОДОПОГЛОЩАЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ

СЕМЕНОВА И.А., ГЕЧА Э.Я., РЯЗАНОВ И.Б.

Механические повреждения кабеля, такие, как обрыв или растрескивание оболочки, могут стать причиной поступления значительного количества воды внутрь конструкции и привести к выходу из строя подключенной к кабелю аппаратуры.

Для предотвращения или замедления процесса распространения воды вдоль оси кабеля используют различные гидрофобные и гидрофильтрующие материалы. Первые достаточно надежно выполняют водоблокирующую функцию только при условии тщательного заполнения всех промежутков между конструктивными элементами кабеля по его значению, что не всегда технологически возможно.

Гидрофильтрующие (или водопоглощающие) материалы (ВМ) более технологичны. Они применяются в виде порошков и лент. Занимая первоначально незначительный объем, при взаимодействии с водой они набухают и заполняют полости в конструкции кабеля, препятствуя продольному распространению воды.

К издержкам применения ВМ можно отнести быстрое проникновение воды в кабель в начальный период, соответствующий времени набухания ВМ до перекрытия каналов распространения воды.

Задачей настоящей работы является анализ процесса продольного распространения воды в кабеле, содержащем ВМ, получение

формул для расчета длины проникновения воды.

Рассматриваются конструкции, содержащие ВМ в виде порошка, расположенного между двумя лентами.

Для изготовления лент используют сформированный в виде сетки полиэтилентерефталат, нейлон, полипропилен, полиуретан, а также материалы на основе сложных полимеров. Лента должна хорошо пропускать воду к поглощающему порошку, но не допускать высыпания порошка из водоблокирующего элемента. Удержанию порошка в слоистом материале способствует адгезивная добавка.

Такие водопоглощающие ленты можно использовать различным образом для герметизации кабеля при проникновении воды внутрь конструкции: в виде обмотки по сердечнику кабеля, по скрутке продольно армирующих элементов и оптических модулей (трубок, содержащих оптические волокна); в виде ленты, продольно свернутой и уложенной внутри оптического модуля, а также другим образом.

Основными характеристиками ВМ являются его водопоглощающая способность (высота набухания H), скорость водопоглощения (набухания) u_0 , стойкость к воздействию соленой воды и микроорганизмов.

Рассмотрим процесс распространения воды вдоль оси трубки, содержащей ВМ (рис.1).

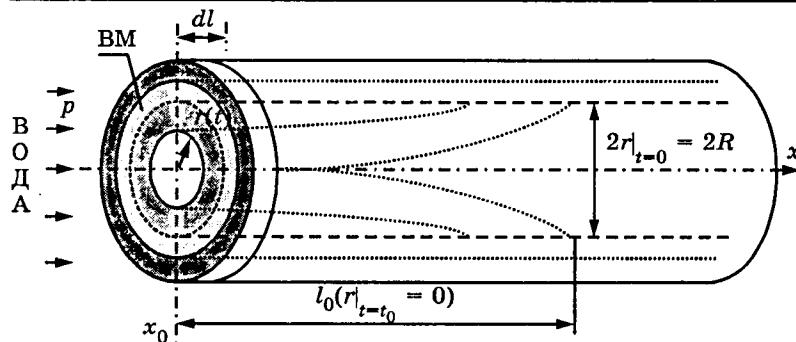


Рис.1. Схема поступления воды в трубку, содержащую ВМ в виде лент

Экспериментальные исследования позволили выделить в этом процессе две стадии.

В начальной (быстрой) стадии вода движется по каналу в соответствии с законами гидродинамики. Эффективный радиус канала при этом со временем уменьшается вследствие взаимодействия ВМ с водой. Быстрая стадия заканчивается, когда полость трубы в начальном сечении x_0 полностью заполняется разбухшим водопоглощающим материалом и мешает дальнейшему свободному проникновению воды в трубку. Этому моменту времени t_0 , порядка нескольких секунд, соответствует длина l_0 , на которую вода распространяется в трубке.

В дальнейшем влага проникает вдоль оси трубы вследствие диффузии через образовавшуюся желеобразную «пробку» и вступает во взаимодействие с сухим ВМ, что приводит к росту желеобразной «пробки». Этот процесс на несколько порядков медленнее, чем проникновение воды в трубку на начальной стадии.

Под длиной l , на которую вода распространяется в канале на этой стадии, в дальнейшем мы будем понимать прирост длины желеобразной «пробки».

Для экспериментов использовались прозрачные полимерные трубы диаметром 5 и 9 мм, загерметизированные с одной стороны. Число слоев водопоглощающих лент марки «Firet» фирмы «Lantor» (модификации ЗЕ 1151 и ЗЕ 1141), продольно свернутых вдоль внутренней поверхности трубок, от 1 до 3.

Значение каждой экспериментальной точки — длины l_0 и соответствующему ей времени t_0 , а также длины l распространения воды вдоль оси трубы в момент времени $t > t_0$ — определялось как среднее арифметическое из результатов испытаний пяти образцов.

Расчет начальной длины l_0 проникновения воды в канал, содержащий ВМ

Для определения l_0 воспользуемся формулой Пуазеля

$$V = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8 \eta l}, \quad (1)$$

где V — объем жидкости, протекающей по трубке радиусом r длиной l за время t при ламинарном течении; Δp — разность давлений на концах трубы; η — динамическая вязкость.

В нашем случае (рис.1) элементарный объем воды dV , проникшей в канал, равен

$$dV = \pi r^2(t) dl,$$

где $r(t)$ — радиус канала, уменьшающийся от величины R при $t=0$ до 0 при $t=t_0$.

Примем приближенно, что $r(t)$ меняется от R до 0 по линейному закону, т.е.

$$r(t) = R \left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right). \quad (2)$$

Этому предположению соответствует предположение о постоянстве скорости набухания водопоглощающей ленты.

Тогда

$$dV = \pi R^2 \left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right)^2 dl. \quad (3)$$

С учетом (1) запишем выражение для объема воды, протекающей по трубке за время dt , в виде

$$dV = \frac{k_f^2 \pi p r^4(t)}{8 \eta l} dt, \quad (4)$$

где p — давление воды на входе в трубку; k_f — безразмерный коэффициент формы входного сечения, характеризующий процесс поступления воды в канал.

Подставляя (3) и (4) с учетом (2), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$dl = \frac{k_f^2 p R^2 (t_0 - t)^2}{8 \eta t_0^2 l} dt,$$

или, интегрируя обе части в пределах от $l=0$ при $t=0$ до $l=l_0$ и $t=t_0$,

$$\int_0^{l_0} dl = \frac{k_f^2 p R^2 t_0}{8 \eta t_0^2} \int_0^{t_0} (t_0 - t)^2 dt. \quad (5)$$

Решением (5) является

$$l_0 = k_f R \sqrt{\frac{pt_0}{3\eta}} . \quad (6)$$

В результате экспериментальных исследований установлено, что t_0 определяется скоростью u_0 набухания ВМ в начальный момент (справочная величина ВМ) и радиусом канала:

$$t_0 = \frac{S}{2u_{0S}} , \quad (7)$$

где $S = \pi R^2$ — площадь сечения канала в начальный момент времени; $u_{0S} = dS/dt$ — «поверхностная» скорость набухания ВМ, т.е. скорость закрытия канала для свободного поступления воды (численно u_{0S} равна u_0^2 и имеет размерность $[u_{0S}] = [\text{площадь}/\text{время}]$).

Коэффициент k_f определялся из численного эксперимента по формуле (6) при использовании экспериментальных значений l_0 и t_0 для разных материалов (u_0), диаметров трубок и при разном количестве слоев ВМ.

Численные эксперименты показали, что во всех случаях разброс k_f не превышает 15% среднего значения, что позволило сделать следующие выводы:

— формула (6) в целом правдоподобно описывает физический процесс;

— коэффициент k_f для входного сечения, изображенного на рис.1, при диаметрах канала в диапазоне 2—10 мм составляет

$$k_f = 0,643 \cdot 10^{-2} . \quad (8)$$

Диапазон 2—10 мм выбран как наиболее представительный при рассмотрении конструкций оптических кабелей с точки зрения их продольной герметизации.

Окончательно, с учетом (7) и (8)

$$l_0 = 0,465 \cdot 10^{-2} R^2 \sqrt{\frac{p}{\eta u_{0S}}} . \quad (9)$$

Расчетно-экспериментальное определение «диффузионной» длины проникновения воды вдоль оси трубы, содержащей ВМ

Экспериментальные значения длины l распространения воды вдоль оси трубы в момент времени $t > t_0$ представлены маркерами на рис.2. В результате численного анализа этих данных получена следующая эмпирическая формула для расчета длины l проникновения воды в трубку:

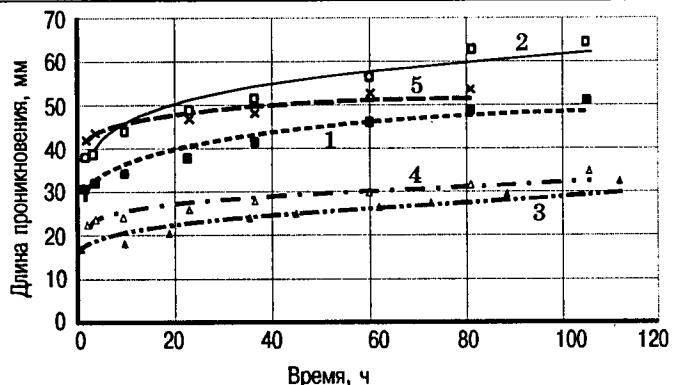


Рис.2. Зависимость длины проникновения воды вдоль оси трубы от времени (1 — E1151, 1 слой, $R = 2,15$ мм; 2 — E1141, 1 слой, $R = 2,15$ мм; 3 — E1151, 2 слоя, $R = 1,8$ мм; 4 — E1151, 2 слоя, $R = 1,8$ мм; 5 — E1151, 2 слоя, $R = 3,8$ мм)

$$l = l_0 \left(\frac{u_0}{50H} t \right)^{\frac{h}{R_1}} , \quad (10)$$

где l_0 — начальная длина, которая определяется в соответствии с (9); H — высота набухания ВМ (справочная величина ВМ); h — толщина водопоглощающей ленты; R_1 — внутренний радиус трубы; t — время проникновения воды.

Расчетные зависимости, полученные по формуле (10), приведены на рис.2.

При расчете использовались следующие данные:

$u_0 = 600$ мм/ч; $u_{0S} = 1,67$ мм²/с — для ВМ ЗЕ 1151;

$u_0 = 450$ мм/ч; $u_{0S} = 0,94$ мм²/с — для ВМ ЗЕ 1141;

$H = 12$ мм — для ВМ ЗЕ 1151;

$H = 9$ мм — для ВМ ЗЕ 1141;

$h = 0,35$ мм; $R_1 = 5; 9$ мм; $R = R_1 - nh$, где n — число слоев лент; $p = 2 \cdot 10^3$ Па; $\eta = 1$ мПа·с при 20°C.

Относительная погрешность формул (10) и (9) для исследованных материалов и диапазонов диаметров трубок не превышает 15%, что позволяет рекомендовать их для анализа продольной герметичности конструкции оптических кабелей, а также других изделий, содержащих ВМ.

Необходимо отметить, что изложенный подход и полученные расчетные формулы не пригодны для расчета канала, из которого происходит вымывание порошка в процессе взаимодействия с водой. В этом случае скорость проникновения воды в канал существенно выше.

Безопасные индукционные электронагреватели для отопления и горячего водоснабжения

ЁЛШИН А.И., канд.техн.наук, КАЗАНСКИЙ В.М., доктор техн.наук., КЛЕСОВ В.И., канд. техн.наук

Новосибирский ГТУ

Приведены технические характеристики ряда однофазных и трехфазных электронагревателей трансформаторного типа мощностью от 0,8 до 126 кВт. Отражены особенности эксплуатации электронагревателей трансформаторного типа и их защиты при отсутствии теплоносителя.

Известные в настоящее время электротепловые системы с жидким теплоносителем в качестве источника тепла содержат электротеплогенераторы с трубчатыми нагревателями (ТЭНами) и электродные котлы. И те, и другие могут стать причиной пожара или электропоражения людей. ТЭНовые группы нагревателей подключаются к сетевому напряжению (220/380 В) и содержат резисторы с температурой 700°C и выше, а электродные котлы функционируют при сетевом потенциале на теплоносителе.

Гарантированная пожарная безопасность в рабочем состоянии определяется максимальной температурой элементов теплогенератора, которая не должна превышать температуры воспламенения материала интерьера жилища.

Гарантированная электробезопасность определяется уровнем напряжения прикосновения и степенью изоляции сети от системы отопления. В безопасных электронагревателях напряжение прикосновения [1] не должно превышать 1—2 В, а изоляция обмоточного провода и корпусная изоляция обмотки должны обеспечивать защиту от поражения электрическим током по классу 2.

Для того, чтобы сделать системы электроотопления и горячего водоснабжения пожаро- и электробезопасными, необходимо максимально приблизить уровень температуры греющих элементов до рабочей температуры теплоносителя, а напряжение прикосновения — до 2 В [1].

Эти условия реализуются в новых патентоспособных [2, 3] индукционных электронагревателях жидкости в однофазном и трехфазном исполнениях, предложенных авторами в Новосибирском государственном техническом университете.

Особенности конструкции. На рис.1 показан принцип выполнения трехфазного

индукционного нагревателя жидкости (разрез), предназначенного для систем отопления и горячего водоснабжения жилых и административных зданий, промышленных и сельскохозяйственных помещений, гаражей, теплиц и т.п.

Трехфазный нагреватель жидкости содержит встроенный шихтованный ферромагнитный сердечник 1 трансформатора с расположенной на изолированных корпусной изоляцией стрежнях сердечника трехфазной первичной обмоткой 2.

Вторичная обмотка трансформатора является теплообменником, выполненным в виде пустотелой камеры 3 с входным 4 и выходным 5 патрубками для прохождения нагреваемой жидкости. Камера имеет сквозные вертикальные каналы 6 с электропроводящими стенками 7 (по количеству стержней сердечника). Цилиндрические электропроводящие стенки 7 сквозных каналов 6, боковая оболочка 8, нижнее 9 и верхнее 10 основания, образующие цельность и непроницаемость объема камеры 3, могут быть выполнены из материалов различной толщины и электропроводности. Для усиления эффективности нагревателя камера может быть

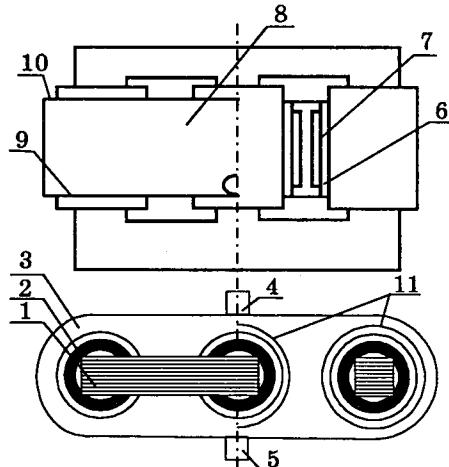


Рис.1. Трансформатор-нагреватель

снабжена дополнительными электропроводящими контурами 11, охватывающими каналы 6. Теплоотдача к нагреваемой жидкости происходит от внутренней и внешней поверхностей контуров 11.

В ряде случаев внутренние контуры 11 могут выполнять роль основных нагревательных элементов, при этом камера может быть выполнена из любого влагонепроницаемого диэлектрика.

В табл.1 приведены технические характеристики трехфазных индукционных электронагревателей для отопления и горячего водоснабжения с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя, производство которых освоено на ряде предприятий Новосибирской области.

Таблица 1

Технические характеристики трехфазных электронагревателей

Потребляемая мощность, кВт	12	48	126
Напряжение, В	380/220	380/220	380/220
Ток, А	18,4	73,0	192,0
Коэффициент мощности	0,985	0,99	0,995
Теплопроизводительность, ккал/ч	10150	40040	105110
Габаритные размеры, мм:			
высота	640	920	1100
ширина	415	650	800
глубина	190	270	320
Масса с водой, кг	67	220	390
Напряжение прикосновения, В	0,92	1,11	1,72

Коэффициент полезного преобразования электрической энергии в тепловую находится в пределах 95—97% при размещении теплогенератора вне отапливаемого помещения и достигает 100% при установке теплогенератора внутри здания.

Характеристики безопасности трехфазного индукционного электронагревателя, существенно отличающие его от ТЭНовых и электродных котлов:

— **пожаробезопасность** обеспечивается тем, что в рабочем состоянии максимальная температура элементов нагревателя не превышает 100—105°C; в аварийном режиме, в случае отсутствия воды и при повреждении системы автоматического отключения электронагревателя, в индукционном электронагревателе положительный температурный коэффициент сопротивления материала теплообменника способствует существенному снижению электропотребления, уменьшению перегрева и сохранению работоспособности первичной обмотки;

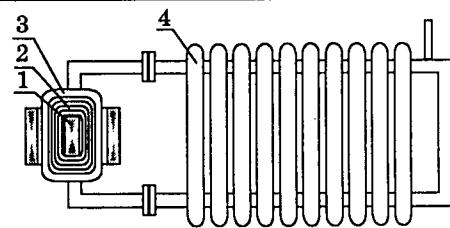


Рис.2. Электротопительный прибор:

1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — камера; 4 — радиатор

Таблица 2

Технические характеристики однофазных электронагревателей			
Потребляемая мощность, кВт	0,8	2,8	4,0
Напряжение, В	220	220	220
Ток, А	3,7	12,9	18,5
Коэффициент мощности	0,98	0,98	0,98
теплопроизводительность, ккал/ч	670	2335	3335
Габаритные размеры, мм:			
высота	130	440	480
ширина	115	250	290
глубина	100	190	190
Масса с водой, кг	3,6	22	37
Напряжение прикосновения, В	0,34	0,72	0,92

— **электрическая безопасность** обеспечивается низким уровнем напряжения прикосновения (не более 2 В), а сетевое напряжение 380/220 В может возникнуть на теплоносителе только при одновременном пробое изоляции провода первичной обмотки и корпусной изоляции.

На рис.2 показан принцип выполнения однофазного электроотопительного прибора [3].

Аналогично трехфазному трансформатору-нагревателю прибор имеет кольцевую камеру 3 — теплообменник, являющийся вторичной обмоткой трансформатора и выполненный из электропроводящего материала. Камера 3 нагревается вторичными токами трансформатора порядка нескольких сотен ампер и теплоотдача находящейся в щелевом канале воде происходит при естественной циркуляции теплоносителя в системе нагреватель-радиатор.

В табл.2 приведены характеристики индукционных однофазных электронагревателей жидкости, питаемых напряжением промышленной частоты (производство освоено).

Особенности эксплуатации. Распространение и применение в Новосибирской, Томской, Кемеровской областях, в Алтайском и Красноярском краях электронагревателей трансформаторного типа не потребовали из-

менений в традиционных системах водяного отопления и горячего водоснабжения. В процессе эксплуатации теплоноситель—вода может находиться в непосредственном контакте с телом человека или животного на сельскохозяйственных объектах в связи с гарантированной электробезопасностью (потенциал на воде не превышает 2 В). Качество воды, соответствующее ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», полностью отвечает требованиям эксплуатации электронагревателей трансформаторного типа и исключает использование дополнительных устройств для обеспечения специальных свойств теплоносителя.

Второй класс электробезопасности трансформатора-нагревателя не требует в соответствии с ГОСТ 27570.0-87 устройства защитного заземления и специальных мер безопасности.

Эксплуатация трансформаторов-нагревателей в системах электроотопления осуществляется преимущественно в длительном режиме работы с автоматическим регулированием температуры теплоносителя при отсутствии обслуживающего персонала [4]. Последнее обстоятельство предъявляет жесткие требования обеспечения пожарной безопасности в аварийной ситуации (например, при исчезновении теплоносителя в системе отопления). В этом случае при отказе защитных устройств поведение нагревателя будет определяться соотношением активных сопротивлений стенок кольцевой камеры 7, 8 и внутренних электропроводящих контуров 11 (рис.1). Отсутствие в камере воды при негативной комбинации условий приводит к разрушению контуров 11 и переводу трансформатора практически в режим холостого хода, обеспечивая сохранность первичной обмотки и, самое важное, обогреваемого объекта, стоимость которого значительно превышает стоимость работ по восстановлению работоспособности теплообменника. При нор-

мальной эксплуатации надежность и долговечность трансформаторных электронагревателей достаточно высоки и соизмеримы с таковыми для традиционного трансформатора.

Таким образом, решена проблема создания электронагревателя с жидкостными теплоносителем, обеспечивающего условия гарантированной электро- и пожаробезопасности, для широкого бытового и производственного назначения.

Список литературы

1. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
2. Пат. RU 2074529 С1. Индукционный нагреватель жидкости/А.И.Ёлшин, В.М.Казанский, Е.Д.Карманов//Открытия. Изобретения. 1997. № 6.
3. Пат. RU 2039327 С1. Электроотопительный прибор/А.И.Ёлшин, В.М.Казанский//Открытия. Изобретения. 1995. № 19.
4. Электронагреватели трансформаторного типа/Под ред. А.И.Ёлшина. Новосибирск: НГТУ, 1997.

Ёлшин Анатолий Иванович — доцент Новосибирского государственного технического университета. Окончил в 1969 г. электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Малоинерционный асинхронный двигатель для силового электропривода» в Новосибирском электротехническом институте.

Казанский Василий Михайлович — профессор Новосибирского государственного технического университета. Окончил в 1949 г. электромеханический факультет Московского энергетического института. В 1971 г. защитил докторскую диссертацию «Беспазовые электродвигатели малой мощности» в Московском энергетическом институте.

Клесов Виктор Иванович — доцент Новосибирского государственного технического университета. Окончил в 1963 г. факультет электрификации и автоматизации ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина). В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию «Расчет и моделирование электростатических полей в высоковольтных кабельных конструкциях» в Томском политехническом институте.

Оглавление нашего журнала можно бесплатно получить в INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную в Московском Физико-Техническом институте.

Материалы службы ИНФОМАГ доступны в режиме ON-LINE через сервер РосНИИРОС по следующим URL:

<http://www.ripn.net/infomag/>
<gopher://gopher.ripn.net/>
<telnet://info.ripn.net/>

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

HELP по адресу im@ripn.net

ИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Выбор электромагнитных экранов высокочастотных установок для нагрева диэлектриков

РУДАКОВ М.Л. (БГТУ, СПб), ФЕДОРОВА И.Г., (ВНИИ ТВЧ, СПб), кандидаты техн.наук

Рассмотрены виды электромагнитных экранов, применяемые для экранирования технологической оснастки высокочастотных установок для нагрева диэлектриков. Приведены приближенные аналитические выражения для оценки эффективности экранирования незамкнутыми экранами в виде плоских металлических пластин. Даны рекомендации по использованию рассмотренных экранных конструкций.

Электромагнитные экраны высокочастотных электротермических установок вместе с другими защитными мероприятиями имеют два основных назначения: обеспечение электромагнитной безопасности (ЭМБ) обслуживающего персонала и снижение уровней излучаемых радиопомех до значений, отраженных в стандартах на параметры электромагнитной совместимости (ЭМС). Помимо снижения уровней электромагнитного облучения во внешнее пространство, экраны должны отвечать следующим требованиям:

— потери мощности в экранирующей конструкции не должны превосходить 1—3% мощности генератора установки;

— воздействие экрана на колебательные цепи и контуры экранируемых объектов должно быть по возможности минимальным и поддающимся компенсации дополнительными устройствами;

— при использовании замкнутых экранов должна быть исключена возможность резонансных явлений для корпуса экрана;

— должен быть предупрежден диэлектрический пробой на корпус экрана;

— экран должен отвечать эргономическим требованиям, условиям поточного производства и др.

Нормированное значение напряженности для радиопомех от промышленных высокочастотных установок отражено в ГОСТ 23450-79* [1] и составляет (в пределах выделенных частотных полос) 70 дБ·мкВ/м для расстояний 30 м от установки при выпуске и 10 м от границы территории предприятия при эксплуатации.

Предельно-допустимые уровни (ПДУ) облучения производственного персонала отражены в [2,3]. Основным нормированным параметром для случая электромагнитного облучения производственного персонала яв-

ляются так называемые энергетические нагрузки (энергетические экспозиции), представляющие собой для высокочастотного диапазона произведения квадрата действующих значений напряженности электрического и магнитного полей в рабочей зоне на продолжительность воздействия в течение рабочего дня.

Непосредственное сравнение требований ЭМС и ЭМБ на уровнях внешних излучений ВЧ установок весьма затруднительно — ПДУ биологической защиты формулируются без указания расстояния от источника до рабочей зоны, но с учетом времени облучения за рабочий день. Для норм напряженности поля радиопомех ситуация обратная — указаны расстояния, на которых оценивается излучение и не оговорено время излучения. В силу данных различий при выборе и расчете необходимой эффективности электромагнитных экранов высокочастотных установок требуется решать две задачи — обеспечение ЭМБ и ЭМС.

К сожалению, рекомендации по выбору и расчету электромагнитных экранов для электротермических установок носят, в основном, достаточно общий характер. В данной статье рассматриваются вопросы выбора и расчета экранов промышленных ВЧ установок для нагрева диэлектриков.

При ВЧ нагреве диэлектрических материалов используются частоты 13,56; 27,12; 40,68; 81,36 МГц. Несмотря на разнообразие конструкций, все установки имеют общую структуру: генератор, как правило, выполненный по схеме с самовозбуждением, фидерная линия и рабочий конденсатор, между обкладками которого помещается нагреваемый материал. Для установок различного назначения эти элементы весьма отличаются друг от друга по своим эксплуата-

ционно-техническим характеристикам, особенно это касается геометрических параметров рабочих конденсаторов. Кроме того, отмеченные структурные части установок являются основными источниками внешних электромагнитных полей. Можно сказать, что проблема экранирования практически решена для высокочастотных генераторов — во всех типах ВЧ установок для диэлектрического нагрева он выполняется в специальном металлическом кожухе, и требуется лишь ликвидировать щели и зазоры в кожухе и обеспечить дополнительное экранирование смотровых окон и щелей в дверцах. Фидер выполняется либо в виде коаксиальных кабелей, либо в виде плоских металлических шин. Экранирование фидера также не вызовет особых затруднений. Основные трудности возникают при экранировании окончаний фидера, непосредственно примыкающих к рабочим конденсаторам, и собственно пластин рабочих конденсаторов больших размеров (сварка больших полотнищ термопластов, непрерывная сварка из рулона, нагрев стружечного ковра перед прессованием, конвейерная сушка материалов и др.). Дальнейшее изложение будет касаться именно вопросов экранирования технологической оснастки.

1. Замкнутые экраны.

Процедура расчета экранирующих конструкций в виде замкнутых оболочек достаточно подробно освещена в [4—6]. В ближней зоне рабочих конденсаторов с большими значениями рабочих напряжений электрическое поле преобладает над магнитным, что практически всегда обеспечивает соблюдение допустимых потерь мощности вследствие нагрева экрана магнитным полем. Теоретически эффективность экранирования сплошными экранами может быть бесконечно большой, однако из-за неизбежных нарушений герметичности экрана (щелей, зазоров, вводов органов управления в экранированное пространство, устройств загрузки рабочего конденсатора и др.) реальные значения эффективности лежат в широком интервале: 40—80 дБ. Отметим, что даже нижняя граница эффективности в этом случае практически всегда обеспечивает соблюдение гигиенических ПДУ и норм на радиопомехи (данный вывод основан на расчетах и измерениях, проведенных на предприятиях Санкт-Петербурга в 1987—1994 гг.). Для изготовления экранов можно рекомен-

довать алюминий, а также латунные и медные сетки для экранирования смотровых вентиляционных отверстий.

Конструктивные требования к экранам высокочастотных сварочных установок приведены в [7].

При использовании замкнутых оболочек для экранирования технологической оснастки возникают следующие трудности:

- затруднен паро- и газообмен при нагреве некоторых материалов;

- экран вносит существенную расстройку в колебательную цепь;

- крупногабаритные экраны затрудняют работу при поточном производстве, что побуждает работающих вообще ими не пользоваться, особенно при сдельной форме оплаты труда.

2. Незамкнутые экраны

2.1. Экраны в виде плоских пластин.

В связи с отмеченными трудностями весьма актуальными являются проектирование и использование незамкнутых, локальных электромагнитных экранов, которые перекрывают по полю наиболее опасные области на рабочих местах вблизи установок. Дополнительные преимущества — это облегченная конструкция, возможность визуального контроля за технологическим процессом, улучшенный доступ к рабочему конденсатору, уменьшение влияния экрана на колебательную цепь.

Эффективность экранирования незамкнутых локальных экранов определяется из решения двух задач:

1. Определения эффективности экранирования бесконечным экраном или замкнутой оболочкой \mathcal{E}_1 . Расчет проводится по известным аналитическим выражениям [4—6];

2. Определения эффективности экранирования идеально проводящим и бесконечно тонким незамкнутым экраном (экраном конечных размеров) \mathcal{E}_0 . Здесь решается задача огибания электромагнитным полем краев экрана конечных размеров или проникновения экрана только через щели и отверстия. Аналитические методы охватывают лишь некоторые случаи (круговое отверстие, экран в виде круговой шайбы и др.), поэтому при практических расчетах либо с некоторым приближением сводят реальные конструкции к экранам канонических форм, либо прибегают к численным процедурам расчета.

В предположении синфазности векторов

напряженности поля, проникающих через материал стенок крана и огибающих экран, можно записать результирующую эффективность экранирования незамкнутого экрана конечных размеров [4]:

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_0}. \quad (1)$$

Пример расчета.

Рассматривается высокочастотная установка для сварки термопластичных пластмасс и синтетических тканей. Частота генератора — 27,12 МГц, рабочее место расположено в пределах ближней зоны излучающего рабочего конденсатора с неэкранированным прессовым электродом. При анализе распределения электрического поля на рабочем месте были выявлены максимумы поля по вертикальной координате z , отсчитываемой от сварочного стола вверх, и по горизонтальной координате x (вдоль протяженного рабочего конденсатора) [8]. В областях максимума напряженность электрического поля превосходила предельно-допустимый уровень, рассчитанный из допустимой энергетической нагрузки за смену и темпа работы установки. Экран представлял собой плоский металлический лист конечных размеров, расположенный между электродом и рабочим местом и перекрывающий максимумы поля.

При определении \mathcal{E}_1 было установлено, что на данной частоте даже экраны из металлических сеток дают эффективность порядка 60—80 дБ; таким образом, результирующая эффективность \mathcal{E} определялась в основном компонентой \mathcal{E}_0 . Для расчета последней был использован численный метод вторичных источников [9]; поверхностная плотность электрического заряда σ на экране определялась из решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\sigma(M)}{S} dS_M = -U_0(Q), \quad (2)$$

где S — площадь поверхности экрана; $U_0(Q)$ — потенциал поля рабочего конденсатора в точке Q экрана; M — переменная точка интегрирования; r_{QM} — расстояние между точками M и Q .

При решении системы алгебраических линейных уравнений особое внимание обращалось на устойчивость получаемых решений, оцениваемую по числу обусловленности обращаемой матрицы. Для порядка раз-

бienia приводящего к удовлетворительной точности расчета число обусловленности не превышало 27, что позволяет говорить об относительно устойчивых решениях. По найденной плотности заряда определялись напряженность электрического поля и эффективность экранирования для области рабочего места.

В качестве примеров расчетов на рис.1 приведены картины распределения потенциала в вертикальной плоскости вблизи некоторых экранирующих конструкций.

При проведении инженерных расчетов не всегда удобно вычислять эффективность экранирования с использованием численных процедур. С некоторым приближением можно оценить эффективность экранирования, путем сведения экрана прямоугольной формы к круглому экрану, обладающему таким же значением электрической емкости.

На рис.2 представлены расположение электрода и экрана, а также обозначения для проведения подобной оценки (r_0 — радиус эквивалентного круглого экрана I, II — пространственная область рабочего места, ограниченная мысленной окружностью радиуса

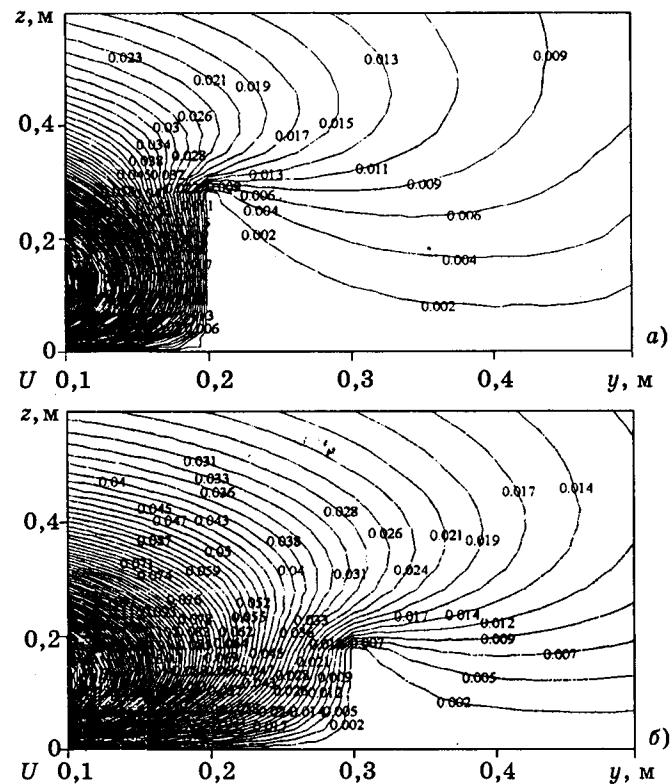


Рис.1. Распределение потенциала электрического поля вблизи экрана (приведены значения, нормированные к потенциальному электрода рабочего конденсатора):

а — экран высотой 0,3 м, расположенный на расстоянии 0,2 м от электрода; б — экран высотой 0,2 м, расположенный на расстоянии 0,3 м от электрода

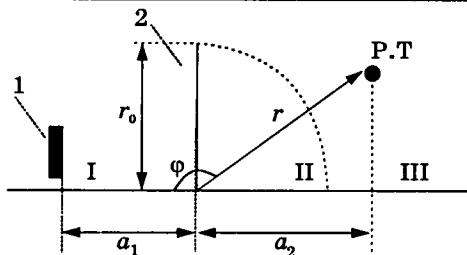


Рис.2. Геометрия расчетной области при использовании формул (4), (5):

1 — прессовый электрод рабочего конденсатора; 2 — электромагнитный экран с «эквивалентным» радиусом r_0 ; PT — расчетная точка рабочего места оператора

r_0 , III — область вне данной окружности). Эффективность экранирования электрического поля искалась в следующем виде:

$$\mathcal{E}_0 = \frac{C_{CB1}}{C_{CB2}}, \quad (3)$$

где C_{CB1} — емкость связи между источником и антенной измерительного прибора, расположенной в области рабочего места оператора до установки экрана; C_{CB2} — емкость с установленным экраном.

Опустив громоздкую процедуру вывода, запишем эффективность экранирования для областей II, III, соответственно, вычисляемые по формулам (4), (5):

$$\mathcal{E}_{02} = \left| \frac{\pi r_0^2}{2a_1(a_1 + a_2)SUM_1} \right|; \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_{03} = \left| \frac{\pi r^2 r_0^2}{2a_1(a_1 + a_2)(\pi r_0^2 \cos \phi + 2r^2)SUM_3} \right|, \quad (5)$$

где r , ϕ — полярные координаты расчетной точки относительно точки размещения экрана (рис.2);

$$SUM_1 = \sum_{n=1,3,5,\dots} (-1)^{0.5(n-1)} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n P_n(\cos \phi);$$

$$SUM_3 = \sum_{m=0,2,4,\dots} \frac{(-1)^{0.5m}}{1-m} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-(1+m)} P_m(\cos \phi),$$

где $P_n(\cos \phi)$, $P_m(\cos \phi)$ — полиномы Лежандра нечетных и четных степеней от аргумента $\cos \phi$.

Расчеты по формулам (4), (5) имеют удовлетворительную точность в случае квадратного или близкого к таковому экрана и высот технологической оснастки, не превышающих r_0 . На рис.3 приведены зависимости эффективности экранирования от вертикальной координаты z , полученные численно и с

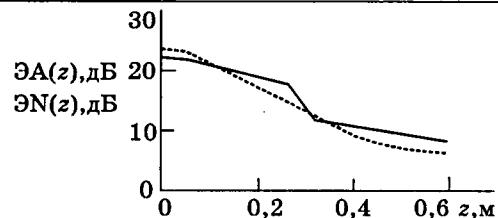


Рис.3. Зависимости эффективности экранирования от вертикальной координаты рабочего места. Экран высотой 0,3 м:

ЭА(z) — расчет по аналитическим выражениям для эквивалентного круглого экрана (—); ЭН(z) — расчет численным методом вторичных источников для реального экрана (----)

использованием (4), (5) («ступенька» на кривой, полученной аналитическим методом, обусловлена конечным числом членов ряда в (4), (5), взятых для расчета).

Из рис.3 видно, что расхождение с результатами численных расчетов составляло до 2 дБ, что не превосходит погрешность измерительной аппаратуры, рекомендованной в [3] для гигиенического контроля напряженности поля.

Беря в выражениях (4), (5) только первые члены соответствующих сумм, получаем более простые расчетные соотношения (6), (7):

$$\mathcal{E}_{02} \approx \left| \frac{3\pi}{2} \frac{r_0^3}{a_1(a_1 + a_2)r \cos \phi} \right|; \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_{03} \approx \left| \frac{\pi}{2} \frac{r^2 r_0}{a_1(a_1 + a_2)(\pi r_0 \cos \phi + 2r)} \right|. \quad (7)$$

Выражения (6), (7) существенно проще исходных, однако с их помощью можно достоверно судить только о порядке эффективности экранирования.

Оценка эффективности подавления радиопомех данным экраном производится на основе теории дифракции электромагнитной волной препятствия конечных размеров [10]:

— определяется радиус первой зоны Френеля в месте расположения экрана:

$$b_1 = \sqrt{\frac{l_1 l_2 \lambda}{l_1 + l_2}}, \text{ м},$$

где l_1 — расстояние от рабочего конденсатора до экрана, м; l_2 — расстояние от экрана до точки измерений, м ($l_2 = 30 - l_1$); λ — длина волны основного излучения генератора, м;

— определяется параметр v :

$$v = \frac{H\sqrt{2}}{b_1},$$

где H — разность высот экранирующей пластины и технологической оснастки, м ($H > 0$);
 — множитель ослабления F определяется по инженерной формуле:

$$F = -7,5v - 6,5, \text{ дБ.} \quad (8)$$

Оценка дает удовлетворительный по точности результат, если вертикальные размеры экрана превышают высоту экранируемой технологической оснастки.

Как показывают расчеты и измерения, эффективность ослабления радиопомех плоскими пластинами, применяемыми на практике, лежит в пределах 5—12 дБ. Относительно невысокая эффективность вполне объяснима — длины волн колебаний значительно превышают размеры любых пластин разумных по высоте и имеет место сильная дифракция электромагнитных волн. Подобная конструкция экранов рекомендуется к использованию в следующих случаях:

— относительно маломощные установки, рассчитанные на одного оператора. Экран крепится как снизу (например, на сварочном столе), так и сверху (на шкафу управления и настройки). В этом случае волна огибает экран только с боков, что приводит к увеличению подавления радиопомех (множитель ослабления составляет 15—22 дБ);

— конвейерные установки с большими пластинами конденсаторов (например, для нагрева древесно-стружечного ковра перед прессованием), где затруднительно заключить конвейер в сплошной экран, и где рабочие конденсаторы несколько утоплены между лентой конвейера и бортами. В этом случае плоские экраны крепятся с боков конвейера по всей его длине. Целесообразно экраны выполнять из сеток на жесткой раме для возможности визуального контроля процесса движения материала по конвейеру.

2.2. Использование вспомогательных электродов в роли экранов.

При сварке термопластичных материалов большой площади используется подвод тока высокой частоты через вспомогательный электрод (рис.4). Наружный проводник коаксиальной линии соединяется с нижней пластиной рабочего конденсатора (сварочным столом) через емкость между вспомогательным электродом и столом. В этом случае заземлены наружный проводник фидера и вспомогательный электрод.

Поскольку падение напряжения на участке сварочный стол—вспомогательный элек-

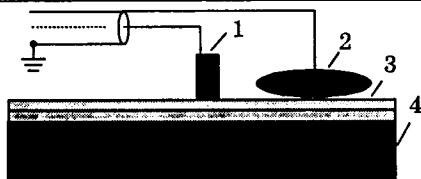


Рис.4. Конструкция подвода тока со вспомогательным электродом:

1 — прессовый электрод; 2 — вспомогательный электрод; 3 — нагреваемый диэлектрический материал; 4 — сварочный стол

трод достаточно мало за счет значительной емкости этого участка (вспомогательные электроды обладают значительной площадью), то расчет эффективности экранирования электрического поля такой конструкцией может производиться численным методом с использованием выражения (2), где под S теперь понимается произведение длины вспомогательного электрода на его вертикальный размер. При проведении оценочных расчетов ослабления поля на рабочих местах можно пользоваться выражениями (4) — (7). Некоторый выигрыш в эффективности экранирования электрического поля по сравнению с плоской пластиной обеспечивается возможностью близкого расположения вспомогательного электрода к прессовому.

Данный вид электродной конструкции обеспечивает несколько большее ослабление радиопомех, чем просто экранирующая пластина. Это определяется тем, что к полю в дальней зоне, обусловленному протеканием тока на участке фидер—сварочный электрод, добавляется компонента, определяемая противоположным по направлению током сварочный стол—вспомогательный электрод, что приводит к уменьшению результирующей напряженности. Точный расчет поля в дальней зоне подобной конструкции представляет собой сложную электродинамическую задачу, однако, как показывают практические измерения, оценку множителя ослабления радиопомех на расстоянии 30 м от подобной электродной конструкции можно производить по выражению (8) с добавлением к полученному значению от -7 до -9 дБ.

2.3. Волноводные насадки.

Распространенным способом экранирования смотровых окон является покрытие их металлическими (как правило, латунными и медными) сетками, помещаемыми между двумя прозрачными листами (plexiglas, стекло), обеспечивая при этом прижим сетки к металлическому каркасу по всему пе-

Материал	ГОСТ, ТУ	Толщина, мм	Ослабление, дБ
Фольга алюминиевая	ГОСТ 618-73	0,08	до 80 (30 МГц—40 ГГц)
Фольга медная	ГОСТ 5638-75	0,08	до 80 (30 МГц—40 ГГц) 20—40
Ткань хлопчато-бумажная с микропроводом	ОСТ 17-28-70	—	(30 МГц—30 ГГц)
Ткань металлизированная «Восход»	—	—	40—65 (10 кГц—30 ГГц)
Ткань полиамидная с вплетенной проволокой	ТУ 6-06-С202-90	—	15—40 (300 кГц—30 МГц)

риметру окна. Более простой способ экранирования тот, который использует принцип предельного волновода. Так называемая критическая длина волны, начиная с которой волна распространяется по волноводам, определяется выражениями:

— для круглого

$$\lambda_{kp} = 3,41 r \sqrt{\epsilon},$$

где r — радиус волновода; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего волновод;

— для прямоугольного:

$$\lambda_{kp} = 2a \sqrt{\epsilon},$$

где a — наибольший размер волновода.

Чем больше длина излучаемой волны превышает критическую, тем быстрее происходит ее затухание в волноводе.

Для частот, используемых при нагреве диэлектриков, напряженность электрического поля в конце применяемого волноводного патрубка длиной l_0 может быть оценена выражением:

$$E(l_0) = E_0 \exp\{-\pi l_0/d\}, \quad (9)$$

где E_0 — напряженность электрического поля в начале волновода; d — размер (ширина или диаметр) волновода.

Предельные волноводы целесообразно применять также при экранировании вентиляционных отверстий и выводов органов управления из экранированных камер. В последнем случае необходимо учитывать укорочение волны при заполнении волновода диэлектриком; при конструировании органов управления следует применять материалы с малой диэлектрической проницаемостью. Например, для частоты 27,12 МГц приемлемы такие материалы как фторопласт, полипропилен и стеклотекстолит.

Еще одним примером использования свойств предельных волноводов является экранирование рабочего конденсатора при сварке из рулона (установка ВЧД12-10/27), где устройства непрерывной подачи материала в рабочее пространство пресса выполнены в виде полноводных отрезков. Подобная конструкция отличается значительными габаритными размерами, однако применение традиционных замкнутых экранов было затруднительно.

2.4. Радиопоглощающие и эластичные экраны.

В некоторых случаях целесообразно применение экранов, обладающих механической эластичностью (поглощающие резины, специальные ткани, фольга, наклеенная на обычную ткань). Одним из таких случаев является экранирование конвейерных установок для высокочастотной сушки, в которой конвейер заключен в металлический кожух по длине и излучение во внешнее пространство определяется окнами загрузки и выгрузки (пример подобной установки — ВЧД2-160/13). В этом случае требование непрерывного конвейерного нагрева делает невозможным экранирование окон жесткими металлическими экранами конструкциями, в то время как эластичные материалы, закрепленные на верхнем конце окон, не препятствуют входу и выходу нагреваемых тел. Сведения о некоторых эластичных материалах для экранов приведены в таблице.

Выводы

1. При выборе и расчете электромагнитных экранов установок для нагрева диэлектриков основное внимание следует уделять решению вопросов экранирования технологической оснастки и устройств подачи материала в рабочий конденсатор. Данная рекомендация наиболее актуальная при нагреве изделий значительных линейных размеров.

2. Поскольку электромагнитные экраны не участвуют в процессе нагрева, необходимо стремиться по возможности уменьшить их габариты и вес. Для этого необходимо предварительное математическое моделирование ситуаций: без экрана, с частичным экраном, со вспомогательным электродом, с полностью замкнутым экраном. Результаты моделирования могут уточняться путем натурных измерений с использованием макетных экранных конструкций.

3. Необходимо продолжить исследования вопросов электромагнитного экранирования с учетом особенностей высокочастотных электротермических установок.

Список литературы

1. ГОСТ 23450-79*. Радиопомехи индустриальные от промышленных, научных, медицинских и бытовых высокочастотных установок. Нормы и методы измерений.

2. ГОСТ ССБТ 12.1.006-84*. Электромагнитные поля радиочастот. Предельно-допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

3. Санитарные правила и нормы № 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Госкомсанэпиднадзор России, 1996.

4. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975.

5. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.

6. Аполонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л.: Энергоатомиздат, 1988.

7. Федорова И.Г., Безменов Ф.В. Высокочастотная сварка пластмасс. Л.: Машиностроение, 1990.

8. Рудаков М.Л., Федорова И.Г. Анализ распределения напряженности электрического поля на рабочих местах операторов высокочастотных сварочных установок//Электричество. 1996. № 6. С. 60—65.

9. Тозони О.В., Майергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. Киев: Техника, 1974.

10. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.

Рудаков Марат Леонидович — доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экологии» балтийского государственного технического университета «Военмех». В 1991 г. окончил факультет корабельной электрорадиотехники и автоматики ЛЭТИ им. В.И.Ульянова (Ленина). В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и расчет параметров электромагнитных излучений высокочастотных установок для нагрева дизлектриков».

Федорова Ирина Григорьевна — старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института токов высокой частоты (ВНИИ ТВЧ) им. В.П.Вологодина. В 1947 г. окончила электрофизический факультет Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова (Ленина), в 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию по теме «Технология стеклопластиков».

ИССЛЕДОВАНИЯ

Статические характеристики ветроэнергетических установок с асинхронным генератором при регулировании подводимого к статору генератора напряжения

МУСТАФАЕВ Р.И., доктор техн.наук, проф., ГАШИМОВА А.Р., инж.

АвНИИ энергетики и энергетического проектирования, Азербайджанский индустриальный институт

Приведены статические характеристики системы Ветродвигатель — асинхронный генератор — электрическая сеть при неизменном значении статорного напряжения и при его регулировании по оптимальному соотношению. Продемонстрированы преимущества предлагаемого способа управления.

Ветроэлектрические установки (ВЭУ) с асинхронным генератором (АГ) нашли преимущественное распространение в мировой ветроэнергетике. Это и понятно — неприхотливая асинхронная машина, которая зачастую снабжается системой статических конденсаторов, обладает простотой, высокой надежностью и приемлемыми экономическими характеристиками при номинальном режиме работы.

Однако известно, что работа ВЭУ в режиме выдачи номинальной мощности состав-

ляет весьма ограниченный отрезок времени по сравнению с общим периодом выдачи мощности, поэтому обеспечение экономичных энергетических показателей ВЭУ с АГ в рабочем диапазоне изменения скоростей ветра — энергоносителя является актуальной задачей.

Известно также, что для обеспечения экономичных режимов работы асинхронной машины во всем диапазоне изменения момента на валу (сопротивления — в режиме работы двигателем, и движущего — в режиме

работы генератором) при постоянстве частоты сетевого напряжения его амплитуду необходимо менять пропорционально квадратному корню из значения момента (закон М.П. Костенко).

Целью настоящей статьи является определение соотношений для изменения подводимого к статору АГ напряжения в функции параметров энергоносителя и ветродвигателя, при которых достигается экономичность энергетических характеристик ВЭУ во всем диапазоне изменения скорости ветра. Динамические характеристики указанной системы были рассмотрены в [1].

В общем случае расчетная схема изображена на рис.1. Здесь ветродвигатель (ВД) 1 посредством редуктора 2 соединен с валом асинхронного генератора (АГ) 3, к статорной обмотке которого может быть подключена батарея статических конденсаторов 4, и эта же обмотка посредством регулятора напряжения 5 (например, тиристорного) соединена с электрической системой 7 через трансформатор и линию электропередачи 6.

Момент, развиваемый ветродвигателем, отнесенный к номинальному и приведенный к валу генератора, следуя [2], можно представить в виде:

$$m_{\text{ВД}} = k_{\text{ВД}} v^2 \mu, \quad (1)$$

где $k_{\text{ВД}} = \frac{1,91 R^3}{M_{\text{ном}}} \eta$ — коэффициент пропорциональности; R — радиус ветроколеса, м; v — скорость ветра, м/с; μ — коэффициент относительного момента ветродвигателя, характеризующий его аэродинамическую характеристику и приведенный к валу генератора, зависит от числа модулей

$m = \frac{\omega R}{v}$; ω — угловая частота вращения вала АГ; $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент ветродвигателя, приведенный к валу АГ, Н·м; η — КПД, учитывающий потери мощности в редукторе, а также механические и электрические потери в роторе АГ.

Момент, развиваемый АГ ВЭУ, можно представить в виде [3]

$$|m_{\text{эм}}| = \frac{u_s^2 A_{\text{эм}} |s|}{B_{\text{эм}} s^2 + D_{\text{эм}} |s| + C_{\text{эм}}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{эм}} = (b_a^2 + c_a^2) \frac{|s_{\text{ном}}|}{r_r} + (d_a^2 + e_a^2) \frac{r_r}{|s_{\text{ном}}|} + 2r_s$;

$$B_{\text{эм}} = \frac{b_a^2 + c_a^2}{r_r}; \quad D_{\text{эм}} = 2r_s; \quad C_{\text{эм}} = (d_a^2 + e_a^2) r_r;$$

$|m_{\text{эм}}|$, $|s|$ — абсолютное значение относительного момента и скольжения АГ [так как механическая характеристика АМ в генераторном режиме находится в третьем квадранте, а представляется выражением $m_{\text{эм}} = [f(-s)]$].

В свою очередь коэффициенты через параметры АГ определяются соотношениями:

$$b_a = r_s \frac{x_r}{x_m}; \quad e_a = \frac{x_s}{x_m}; \quad c_a = x_{ss} + x_{sr} \frac{x_s}{x_m}; \quad d_a = \frac{r_s}{x_m},$$

где r_s и r_r — активные сопротивления статорной и приведенной роторной обмоток; x_{ss} , x_{sr} — их индуктивные сопротивления рассеяния; $x_s = x_{ss} + x_m$, $x_r = x_{sr} + x_m$ — полные сопротивления указанных обмоток соответственно, о.е.; x_m — сопротивление взаимоиндукции между роторными и статорными контурами.

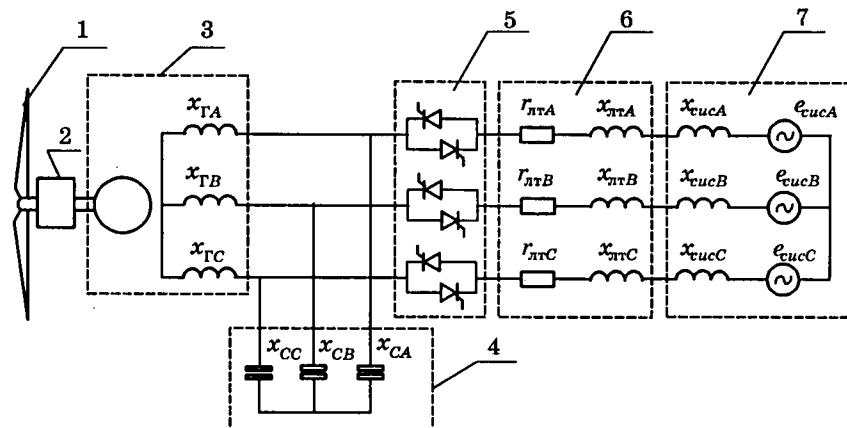


Рис.1. Развернутая электрическая схема присоединения ВЭУ с асинхронным генератором к электрической системе

Путем тривиальных преобразований из Т-образной схемы замещения АГ (при пренебрежении потерями в стали) можно определить активную и индуктивную составляющие полного сопротивления АГ в функции его параметров и скольжения, которые представят в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{АГ}} &= \frac{s^2 r_s x_r^2 + |s| r_r x_m^2 + r_s r_r^2}{s^2 x_r^2 + r_r^2}; \\ X_{\text{АГ}} &= \frac{s^2 x_r (x_r + x_{\sigma s} + x_m x_{\sigma r}) + x_s r_r^2}{s^2 x_r^2 + r_r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Зная выражения (1), (2), (3), можно определить статические характеристики системы ВЭУ с АГ как при постоянстве напряжения питающей сети $u_s = 1 = \text{const}$, так и при изменении подводимого к статорной обмотке напряжения $u_s = \text{var}$.

Выражение для статорного тока АГ определяется соотношением

$$i_s = \frac{u_s}{\sqrt{R_{\text{АГ}}^2 + X_{\text{АГ}}^2}} = \frac{u_s}{Z_{\text{АГ}}}. \quad (4)$$

Коэффициент мощности (или $\text{tg } \phi$) также определяется известным выражением:

$$\cos \phi = \frac{R_{\text{АГ}}}{Z_{\text{АГ}}}; \quad \left(\text{tg } \phi = \frac{X_{\text{АГ}}}{R_{\text{АГ}}} \right). \quad (5)$$

Приравнивая соотношения (1) и (2), для ВЭУ с АГ конкретного исполнения может быть найдена характеристика $s = f(v)$, далее по выражению (3) определяются $R_{\text{АГ}} = f(v)$ и соответственно по (4) и (5) $i_s = f(v)$ и $\cos \phi = f(v)$.

Для обеспечения оптимальных характеристик АГ ВЭУ, как известно, напряжение должно меняться на зажимах АГ ВЭУ по следующему соотношению:

$$u_s = \sqrt{m_{\text{ВД}}} = k_n v \sqrt{\mu}, \quad (6)$$

где $k_n = \sqrt{k_{\text{ВД}}}$ — постоянная величина, зависящая только от параметров ветродвигателя конкретного исполнения.

Очевидно, что изменяя напряжение по выражению (6) и подставляя его в выражение (2), которое во всем диапазоне изменения скорости ветра должно равняться выражению (1), мы получаем:

$$\frac{A_{\text{эм}} |s|}{B_{\text{эм}} s^2 + D_{\text{эм}} |s| + C_{\text{эм}}} = 1, \quad (7)$$

т.е. в случае регулирования напряжения по выражению (6) при постоянных па-

метрах АГ скольжение также остается постоянным и определяется путем решения тривиального квадратного уравнения, полученного из соотношения (7),

$$B_{\text{эм}} s^2 + [D_{\text{эм}} - A_{\text{эм}}] |s| + C_{\text{эм}} = 0. \quad (8)$$

Решение этого квадратного уравнения определяет оптимальное скольжение $s = s_{\text{опт}} = \text{const}$, которое практически (с незначительной погрешностью) равно номинальному скольжению АГ, т.е. $s_{\text{опт}} = s_{\text{ном}}$. В этом случае статические характеристики системы определяются по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{АГопт}} &= \frac{s_{\text{ном}}^2 r_s x_r^2 + |s_{\text{ном}}| r_r x_m^2 + r_s r_r^2}{s_{\text{ном}}^2 x_r^2 + r_r^2} = \text{const}; \\ X_{\text{АГопт}} &= \frac{s_{\text{ном}}^2 x_r (x_r + x_{\sigma s} + x_m x_{\sigma r}) + x_s r_r^2}{s_{\text{ном}}^2 x_r^2 + r_r^2} = \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Также остаются постоянными $Z_{\text{АГопт}} = \text{const}$; $\cos \phi_{\text{опт}} \approx \cos \phi_{\text{ном}} = \text{const}$, а статорный ток АГ меняется по соотношению

$$i_s = k_t v \sqrt{\mu}, \quad (10)$$

где $k_t = \frac{k_n}{Z_{\text{АГопт}}}$ — коэффициент пропорциональности.

Проанализируем оптимальный закон управления напряжением, т.е. выражение (6). Коэффициент относительного момента ветродвигателя μ является нелинейной функцией $\mu = f(m)$ числа модулей ветродвигате-

ля $m = \frac{\omega_b R}{v}$, которая в свою очередь зависит от угловой частоты вращения вала ветродвигателя ω_b , радиуса ветродвигателя R и скорости ветра v . При работе ВЭУ с АГ на электрическую систему, естественно, частота вращения вала АГ и соответственно частота вращения вала ветродвигателя определяются частотой напряжения сети f_c . Поэтому можно считать с погрешностью скольжения АГ, что частота вращения вала ветродвигателя при изменении скорости ветра будет величиной постоянной, тогда $\mu = f(v)$. Кроме того, значение μ определяется коэффициентом использования энергии ветра ϵ , который также является функцией числа модулей m и характеризует эффективность преобразования ветровой энергии (зависит от профиля и конструкции лопастей ВД).

Исходя из этих соображений связь между выходной мощностью ветродвигателя и

Таблица 1

$v, \text{м/с}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12—25
$\epsilon, \text{o.e.}$	0,013	0,027	0,054	0,098	0,156	0,225	0,31	0,415	0,488
$P_{\text{ВД}}, \text{kВт}$	8,1	16,6	33,4	60,26	95,3	138	189,4	253,2	270
$m = \frac{\omega R}{v}, \text{o.e.}$	353,4	282,7	235,6	201,9	176,7	157,1	141,37	128,5	117,8
$\mu = \frac{\epsilon}{m}, \text{o.e.}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
$u_{s^*} = k_h v \sqrt{\mu}, \text{o.e.}$	0,03	0,07	0,12	0,21	0,33	0,47	0,64	0,85	1

Таблица 2

$v, \text{м/с}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12—25
$m_{\text{ВД}} = m_{\text{эм}}, \text{o.e.}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,22	0,42	0,74	1
$ s , \text{o.e.}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$
$R_{\text{АГ}}, \text{o.e.}$	0,037	0,088	0,25	0,68	1,39	1,94	1,74	1,19	0,86
$X_{\text{АГ}}, \text{o.e.}$	4,11	4,109	4,09	3,99	3,54	2,45	1,28	0,63	0,43
$Z_{\text{АГ}}, \text{o.e.}$	4,11	4,109	4,104	4,05	3,8	3,12	2,16	1,34	0,96
$i_s, \text{o.e.}$	0,24	0,243	0,2437	0,247	0,26	0,32	0,46	0,74	1,04
$\cos \phi$	0,01	0,02	0,06	0,17	0,37	0,62	0,8	0,88	0,896

Таблица 3

$v, \text{м/с}$	4	5	6	7	8	9	10	11	12—25
$U_{\text{ск.оп}}, \text{o.e.}$	0,12	0,12	0,12	0,25	0,4	0,55	0,7	0,85	1
$ s , \text{o.e.}$	0,0011	0,0045	0,016	0,011	0,0108	0,011	0,013	0,0156	0,016
$R_{\text{АГк.оп}}, \text{o.e.}$	1,1	1,9	0,81	1,19	1,27	1,18	1,04	0,875	0,86
$X_{\text{АГк.оп}}, \text{o.e.}$	3,7	1,77	0,41	0,63	0,696	0,675	0,576	0,43	0,437
$Z_{\text{АГк.оп}}, \text{o.e.}$	3,9	2,6	0,91	1,35	1,45	1,34	1,17	0,97	0,965
$i_s, \text{o.e.}$	0,03	0,046	0,132	0,185	0,275	0,41	0,6	0,87	1,035
$\cos \phi$	0,3	0,74	0,895	0,88	0,88	0,885	0,89	0,896	0,8957

коэффициентом использования энергии ветра ϵ определяется соотношением [1]

$$P_{\text{ВД}} = k_p D^2 v^3 \epsilon, \quad (11)$$

где D — диаметр ветродвигателя; k_p — коэффициент пропорциональности, $k_p = 0,000481$ (при плотности воздуха $1,225 \text{ кг/м}^3$); $\epsilon = \mu t$ — коэффициент использования энергии ветра.

На примере конкретного ВЭУ с выбранным типом АГ проиллюстрируем построение статических характеристик.

Выбираем ветродвигатель типа «Wind masters» со следующими параметрами: $D = 27 \text{ м}$, $R = 13,5 \text{ м}$, $P_{\text{ВД}} = 270 \text{ кВт}$ (выходная мощность на стороне генератора $P_{\text{АГ}} = 250 \text{ кВт}$) при расчетной (обеспечивающей номинальные параметры) скорости ветра $v_{\text{расч}} = 12 \text{ м/с}$. Начальная скорость ветра, при

которой ВД начинает выдавать мощность в электрическую сеть, $v_{\text{нач}} = 4 \text{ м/с}$.

В табл.1 приведены расчетные данные параметров указанного ВД.

В качестве асинхронного генератора ВЭУ примем асинхронную машину серии 4А мощностью $P_n = 250 \text{ кВт}$; $n_c = 1000 \text{ об/мин}$; $\cos \phi_n = 0,895$; $\eta = 0,95$; $U_n = 660 \text{ В}$; $I_n = 257 \text{ А}$; $M_n = 2390 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Параметры схемы замещения (о.е.):

$x_m = 4$; $x_{ss} = 0,11$; $x_{sr} = 0,13$; $r_s = 0,021$; $r_r = 0,015$; $|s_{\text{ном}}| = 0,016$; $|s_k| = 0,062$.

Расчет коэффициентов уравнений (1) и (2):

$k_{\text{ВД}} = 1,87$; $k_n = \sqrt{k_{\text{ВД}}} = 1,37$; $b_a = 0,0217$; $c_a = 0,243$; $e_a = 1,0275$; $d_a = 0,00525$; $A_{\text{эм}} = 1,094$; $B_{\text{эм}} = 3,968$; $C_{\text{эм}} = 0,0158$; $D_{\text{эм}} = 0,042$.

В табл.2 приведена зависимость парамет-

ров ВЭУ с АГ при постоянстве сетевого напряжения $u_s = 1$ при изменении скорости ветра v от $v_{\text{нач}}$ до $v_{\text{расч}}$.

При управлении напряжением на зажимах АГ по оптимальному соотношению (6) скольжение в рабочем диапазоне изменения скорости ветра от 4 до 12—25 м/с остается постоянным и равным

$$|s|_{\text{опт}} \approx |s|_{\text{ном}} = 0,016.$$

Соответственно остаются постоянными и $R_{\text{АГопт}} = 0,486$; $X_{\text{АГопт}} = 0,43$; $Z_{\text{АГопт}} = 0,96$; $\cos \varphi_{\text{опт}} = \frac{R_{\text{АГопт}}}{Z_{\text{АГопт}}} = 0,896$.

Однако очевидно, что на практике «организовать» управление по выражению (6) очень сложно. Анализ этого выражения применительно к ветродвигателям современных типов показывает, что начиная с определенного значения скорости ветра кривая $u_s = f(v)$, полученная в соответствии с выражением (6), хорошо аппроксимируется линейным выражением вида (погрешность не более 15%):

$$u_{\text{ск.оп}} = u_{\text{sh}} - \frac{u_{\text{sh}} u_{\text{нач}}}{v_{\text{рас}} - v_{\text{нач}}} (v_{\text{рас}} - v), \quad (12)$$

где $u_{\text{ск.оп}}$ — квазиоптимальное (линейное) изменение подводимого статорной обмотке АГ ВЭУ напряжения; $u_{\text{sh}} = 1$ номинальное напряжение АГ; $u_{\text{нач}}$ — начальное значение напряжения, соответствующее начальной скорости ветра $v_{\text{нач}}$.

Для ветродвигателя с АГ, рассматриваемого в статье в качестве примера, эту линеаризацию следует начинать со скорости ветра $v_{\text{нач}} = 6$ м/с при $u_{\text{sh}} = 0,12$, т.е. необходимо

изменять напряжение по соотношению $u_{\text{ск.оп}} = 1 - 0,15(12 - v)$, а до скорости 6 м/с, т.е. в диапазоне от 4 до 6 м/с, чтобы не усложнять регулятор, следует держать напряжение неизменным и равным начальному $u_{\text{sh}} = 0,12$ (здесь следует отметить, что в указанном диапазоне изменения скорости ветра погрешность значительно превысит указанное значение, однако ввиду того, что выходная мощность ВЭУ в этом диапазоне не превышает 6% номинальной, то такое управление предпочтительно, так как не приводит к усложнению регулятора).

В табл.3 приведены расчетные данные значения параметров системы при квазиоптимальном управлении по выражению (12).

На рис.2 дан сопоставительный анализ характеристик системы с регулированием и без регулирования подводимого к АГ напряжения. Здесь приведены кривые изменения $|s| = f(v)$; $i_s = f(v)$ и $\cos \varphi = f(v)$ соответственно при постоянстве напряжения $u_s = 1$ (сплошные кривые) и при линейном регулировании напряжения по выражению (12) (пунктирные линии). Как видно из рис.2, при квазиоптимальном регулировании $u_{\text{ск.оп}}$ коэффициент мощности $\cos \varphi$ практически во всем рабочем диапазоне изменения скорости ветра остается постоянным и достаточно высоким ($\cos \varphi = 0,88 \div 0,89$) и существенно уменьшается ток статора АГ в диапазоне скорости ветра от 4 до 8 м/с за счет уменьшения реактивной составляющей. На рис.2 не приведены кривые при строгом оптимальном управлении напряжения по выражению (6), так как в этом случае $s = f(v)$ и $\cos \varphi =$

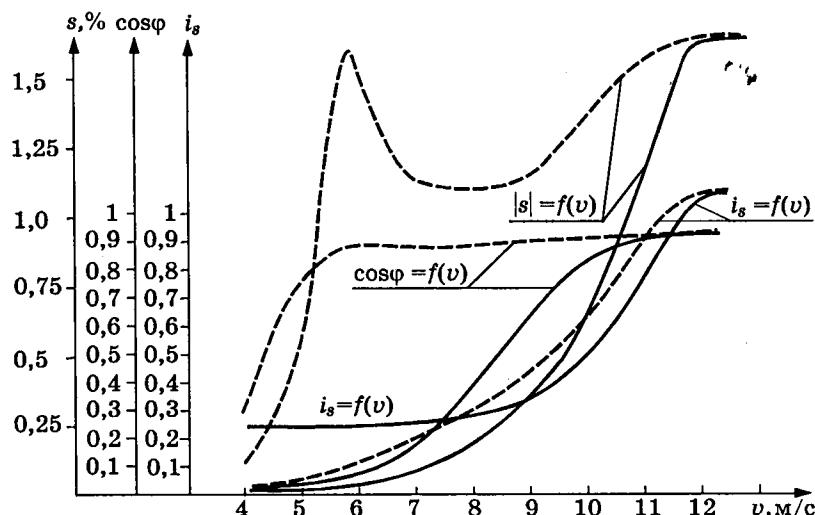


Рис.2. Статические характеристики системы с регулированием и без регулирования подводимого к АГ напряжения

= $f(v)$ будут постоянными величинами, равными приблизительно их номинальным значениям, а $i_s = f(v)$ практически не будет отличаться от кривой соответствующего тока при квазиоптимальном управлении (пунктирная кривая $i_s = f(v)$).

В заключение необходимо отметить, что если к зажимам АГ подключена батарея статических конденсаторов (рис.1), то это обстоятельство ничего нетривиального в расчет не внесет, только кривые $\cos \phi$ «пойдут» несколько выше изображенных на рис.2 в зависимости от «глубины» компенсации. Кроме того, батарея статических конденсаторов может быть подключена и до регулятора напряжения, т.е. между элементами 5 и 6.

Выводы

1. Для обеспечения оптимальных энергетических характеристик АГ ВЭУ, работающего на электрическую сеть, необходимо регулировать амплитуду подводимого к статорной обмотке АГ напряжения по закону акад. М.П.Костенко.

2. Для получения квазиоптимальных характеристик АГ ВЭУ необходимо регулировать амплитуду напряжения в линейной за-

висимости от скорости ветра, что помимо улучшения характеристик АГ, существенно упрощает конструкцию регулятора и вследствие этого делает возможным реализацию указанного закона на практике.

Список литературы

1. Мустафаев Р.И. Пуск и управление ВЭУ с асинхронными генератором, работающим на электрическую сеть//Электротехника. 1990. № 5.
2. Ветроэлектрические станции/В.Н.Андронов, Д.Н.Быстрицкий, К.П.Вашкевич, В.Р.Секторов/М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960.
3. Мустафаев Р.И. Динамические режимы электромеханических преобразователей ВЭУ, работающих на электрическую сеть. Дис... доктора техн.наук. М.: МЭИ, 1989.

Мустафаев Рауф Исмаил оглы — зам. директора по науке Азербайджанского института энергетики и энергетического проектирования. В 1964 г. окончил МИИСП. В 1990 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Динамические режимы электромеханических преобразователей ВЭУ, работающих на электрическую сеть» в МЭИ. Член-корреспондент Международной инженерной академии.

Гашимова Ашура Рза кызы — старший преподаватель Азербайджанского индустриального института. В 1974 г. окончила АзИнефтехим им. М.Азизбекова.

Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей за американское переиздание журнала "Электротехника" за 1997 г. Для получения гонорара следует обращаться в РАО по адресу: 103670, Москва, ул. Б.Бронная, 6а, комн. 110.

Справки по телефону: 203-35-33

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 30.08.99. Подписано в печать 14.10.99. Формат 60x88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 50

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в АООТ «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, к. 3

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ И ПОДПИСЧИКИ!

Журнал “ЭЛЕКТРОТЕХНИКА” издается с января 1930 г.

В журнале регулярно публикуются статьи о последних достижениях по теории и практике электротехники, о разработках перспективных и современных видов электротехнического оборудования, их производстве и эксплуатации, а также наиболее актуальная информация о предприятиях, НИИ, КБ и других фирмах электротехнического профиля и смежных научно-технических направлений.

Широкая география распространения, в том числе и за пределами СНГ, значительный тираж, профессиональный уровень читателей и подписчиков журнала обеспечивают высокую адресность и эффективность рекламных объявлений, опубликованных на его страницах.

Журнал “ЭЛЕКТРОТЕХНИКА” переводится на английский язык и выходит в США в издательстве “ALLERTON PRESS, INC.” в полном объеме. Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей, опубликованных в журнале.

Журнал “Электротехника” распространяется по подписке — через АРЗИ (г.Москва) по объединенному каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации. Подписной индекс — 71111 (подписка на полугодие).

Подписаться на журнал можно также и в редакции журнала по адресу, Москва, Зоологическая ул., д. 11, комн. 213, тел. 254-11-52.

В редакции можно купить и отдельные номера за прошлые и нынешний годы.

/

одн



**Технологии и оборудование в энергетике
и электротехнической промышленности**

Отопительные системы

Вентиляционная техника, кондиционеры

ОГРАНИЗАТОР:

Национальный выставочный центр Украины

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПОНСОРЫ:

Еженедельники: "Энергобизнес", "Пресс-биржа"

журналы: "Энергетика и электрификация", "Уголь Украины",

"Энергетика та ринок", "Час відродження" (г.Киев),

"Электричний журнал" (г. Запорожье),

"Энергетический бюллетень" (г. Львов),

"Электротехника" (г. Москва)

тел.: (044) 251-92-80, 251-91-32 (23)

факс: (044) 251-91-12 (26)

