

ISSN 0013-5860

Э
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
Т
1 *2005*

1930-2005



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

У Ч Р Е Д И Т Е Л И

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 «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

С О В Е Т У Ч Р Е Д И Т Е Л Е Й

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить в
INTERNET через службу ИНФОМАГ, организованную
в Московском физико-техническом институте.
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном
объёме и выходит в США в издательстве "ALLERTON
PRESS, INC" (18 West 27th Street New York,
N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединённому каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс —
71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого
месяца и приобрести отдельные номера за прошлые
и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой
зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (095) 361-95-96
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.
Научный редактор Л.А. Романова.
Редактор З.П. Фёдорова

Слано в набор 04.11.2004. Подписано в печать 21.12.2004. Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 111
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078. Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

СОДЕРЖАНИЕ

Кочетков В.Д. 75 лет журналу «Электротехника»	2
Поздравления журналу	4

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Динамические характеристики асинхронного электропривода с векторным управлением	11
Хашимов А.А., Туляганов М.М. Решение оптимизационных задач высокоинерционного автоматизированного электропривода методом Ньютона-Рафсона с расширенной областью применения ...	15
Волков А.В. Регулирование скорости в асинхронных электроприводах с релейным частотно-токовым управлением	20

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В. Трёхфазные бесконтактные моментные индукторные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем	30
Захаренко А.Б. Проектирование погружного электродвигателя с сосредоточенной обмоткой статора	39

Белассел Моханд-Тахар, Беспалов В.Я., Шетат Бухемис. Ёмкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя питаемого от ШИМ-преобразователя	44
---	----

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Кувалдин А.Б., Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Шатов В.А. Электротепловая модель коаксиальной индукционно-резистивной системы нагрева	48
---	----

ИССЛЕДОВАНИЯ

Архипов А.С. Расчёт объёмно-компенсирующей способности гофрированных баков герметичных трансформаторов	53
Копылов И.П. Энергетический кризис и проблема чистой воды	61

ХРОНИКА

Итоги V Международной конференции по электротехническим материалам и компонентам "МКЭМК-2004"	59
Альтов В.А. Международной Академии электротехнических наук – 10 лет	61

ИНФОРМАЦИЯ

Юренко И.К. Сертификационный центр ОАО "ВЭЛНИИ"	63
---	----

CONTENTS

Kochetkov V.D. Of 75 years of magazine of "Electrical engineer"	2
Congratulation of magazine	4

THE ELECTRIC DRIVE

Potapenko Ye.M., Potapenko Ye.Ye. Dinemic characteristics of induction machin with vector control	11
Hashimov A.A., Tylayganov M.M. Solution of the optimization problems of the high inertial automated electrical drive by the Newton-Rafson method with extended application	15
Volkov A.V. Speed regulation by asynchronous electric drives with a relay frequency – current control	20

ELECTRIC MACHINES

Epifanov O.K., Salova I.A., Khruschov V.V. Three-phase brushless inductor torque motors with magnetic biasing by magnetostatic field	30
Zakharenko A. B. Design of submergible electric motor with concentrated stator winding	39

Belassel Mokhand-Takhar, Bespalov V.J., Shetat Bukhemis. Capacitor parameters and an overstrain (overvoltage) in a winding of the asynchronous engine, a feed from the SHIM-converter	44
---	----

ELECTROTHERMICS

Kuvaldin A.B., Strupinskij M.L., Hrenkov N.N., Shatov V.A. Electrothermal model coaxial inductio-resistive system of heating	48
--	----

RESEARCHES

Arhipov A.S. Analytic method of calculation of capacity-compensating ability of sealed transformer's	53
Kopylov I.P. Energy crisis and a problem of pure water	61

THE CHRONICLE

Results V of the International conference on electro-technical material and components ICEMC-2004	59
Altov V.A. International academy of electrotechnical sciences – 10 years	61

INFORMATION

Yurenko I.K. Stock Co "VELNII" Certification Centre	63
--	----

75 лет журналу "Электротехника"

В январе 2005 г. журналу "Электротехника" исполняется 75 лет.

Решение об издании журнала под названием "Вестник электропромышленности" было принято правлением Всесоюзного Электротехнического объединения.

Первый и второй номера журнала читатели получили в феврале 1930 г. в сдвоенном виде. Первым ответственным редактором был назначен Петр Иванович Воеводин, видный государственный деятель, Герой Социалистического труда. Новый журнал объединил печатные издания "Известия ГЭТ(а)" и "Электросвязь".



П.И. Воеводин

Предпосылкой основания журнала явился ряд обстоятельств.

Во-первых, журнал был основан в эпоху интенсивного развития электрификации страны по плану ГОЭЛРО, непрерывно нарастающего внедрения электрической энергии во все сферы народного хозяйства: промышленности, транспорта, строительства, сельского хозяйства, быта и т.д.

Промышленность и другие отрасли требовали всё в больших объёмах электрических генераторов, электродвигателей, трансформаторов, тягового и кранового электрооборудования, электрооборудования для связи и т.д. И, естественно, для удовлетворения потребностей необходимо было иметь развитую электротехническую промышленность.

Именно в эти годы ускоренными темпами начались реконструкция и строительство новых специализированных предприятий по выпуску широкой номенклатуры электротехнических изделий. Было положено начало создания электротехнической промышленности – новой самостоятельной отрасли в стране.

Во-вторых, в этот период происходили организационное объединение отдельных электротехнических производств и их специализация, вызванные тем, что при огромных масштабах электрификации интересы различных областей приложения электричества взаимно переплелись.

Поэтому нужен был единый информационный печатный орган, который отражал бы наиболее полно деятельность электротехнической отрасли.

Журнал "Вестник электропромышленности" (с 1963 г. "Электротехника") на протяжении своей истории сыграл огромную роль в становлении и развитии отечественной электропромышленности, её научного и производственного потенциала.

С первых дней журнал стал органом коллективного творчества по обмену опытом учёных, инженеров, специалистов производства, обсуждению и выработке рекомендаций по важнейшим проблемам развития элек-

тротехнической отрасли. Невозможно переоценить заслуги журнала в подготовке и воспитании кадров специалистов-электротехников.

В работе журнала принимали участие известные в стране и мире учёные: К.А. Круг, К.И. Шенфер, В.С. Кулебакин, М.П. Костенко, М.А. Шателен, И.А. Глебов, П.В. Вологдин.

В журнале систематически выступали руководители электротехнической отрасли – министры, заместители министра, руководители производственных предприятий и научных организаций.

На страницах журнала нашли отражение материалы международных конференций и выставок, тематических симпозиумов и других мероприятий.

Сегодня журнал "Электротехника" является популярным и авторитетным научно-техническим изданием и занимает одно из ведущих мест в отечественной и мировой информационной системе по проблемам электротехники.

Журнал включён Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК) в число изданий, рекомендуемых для публикации научных статей соискателей учёной степени доктора наук. Журнал является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ, переводится и издаётся на английском языке в США.

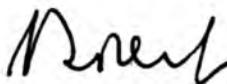
Успех журнала стал возможен потому, что во все времена в его руководстве и в редколлегии работали ведущие учёные и специалисты электротехники, способные формировать совместно с многочисленным авторским коллективом научные и производственные направления развития электротехники (А.Г. Иосифьян, Г.Н. Петров, Н.А. Оболенский, И.А. Глебов, М.П. Костенко, И.П. Копылов и др.).

За все годы своей деятельности журнал не имел перерывов в работе, не менял своей направленности и тематики, постоянно осуществлял информационное обеспечение научно-технического и производственного развития электротехнической промышленности.

В настоящее время журнал работает устойчиво, имея в своём активе достаточно широкий круг читателей и надёжный высококвалифицированный авторский коллектив.

Поздравляя всех почитателей журнала с юбилейной датой, желаю коллективам редакции и редколлегии, авторам и читателям дальнейших творческих успехов в работе в интересах дальнейшего развития электротехнической промышленности.

Главный редактор



В.Д. Кочетков

Главному редактору научно-технического журнала "Электротехника" В.Д. Кочеткову



Федеральное агентство по промышленности поздравляет коллектив редакции журнала "Электротехника" с 75-летием.

За прошедшее время журнал сформировался как ведущий научно-технический печатный орган в отечественной электротехнике. Публикации журнала содействуют развитию электротехнической промышленности страны. В журнале печатаются статьи видных учёных и практиков отрасли. Журнал смог пережить сложные годы переходного периода, которые не все научно-технические издания смогли преодолеть, и в настоящее время продолжает функционировать и развиваться.

Журнал получил мировое признание. Он в полном объёме переводится на английский язык и выходит в США.

Желаю коллективу редакционной коллегии научно-технического журнала "Электротехника", всем его авторам и читателям доброго здоровья, личного счастья, новых достижений во благо России.

**Руководитель Федерального агентства
по промышленности,
член-корреспондент Российской академии наук**

Б.С. Алешин

Главному редактору журнала "Электротехника" В.Д. Кочеткову

Уважаемый Виктор Дмитриевич!

Примите сердечные поздравления в связи с 75-летием со дня основания журнала.

В течение 75 лет журнал "Электротехника" освещает актуальные вопросы основных направлений электротехнической науки и технических достижений промышленных предприятий. Благодаря высокому качеству публикуемых статей журнал вызывает большой интерес в научных и инженерных кругах специалистов электротехников и электроэнергетиков широкого профиля и получил признание в отечественных и зарубежных кругах научно-технической общественности.

В связи с юбилеем искренне желаю дальнейших успехов в деле освещения новых тенденций отечественной электротехники, здоровья и счастья членам редколлегии журнала и новых творческих успехов.

**Почётный Президент РАО "ЕЭС России",
Президент Корпорации
"Единый электроэнергетический комплекс",
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор**

А.Ф. Дьяков

Коллективу журнала "Электротехника"

Дорогие коллеги!

Сердечно поздравляю Вас со славным юбилеем – 75-летием со дня образования журнала. В течение 75 лет Ваш журнал содействовал прогрессу электротехнической науки, практике проектирования и эксплуатации электротехнических установок. Журнал "Электротехника" с первых номеров активно участвовал в пропаганде и обобщении передового опыта, анализировал состояние и тенденции развития электротехнической продукции, способствовал формированию научных направлений в области электромашиностроения, электропривода, преобразовательной техники.

Журнал бережно хранит славные традиции отечественной электротехнической науки. Высокое качество публикаций статей обеспечило журналу широкую известность, уважение и любовь научно-технической общественности, сделало журнал настольной книгой работников электротехнической промышленности, научных работников, студентов вузов.

Сейчас это один из рупоров печатных органов в энергетическом и электротехническом машиностроении, который объединял и объединяет вокруг себя научные организации и промышленные предприятия.

Успеху журнала способствовало постоянное привлечение к сотрудничеству видных учёных-электротехников и руководителей электротехнической отрасли промышленности. За это Вам большое спасибо и низкий поклон.

Желаю коллективу вашего журнала дальнейшего процветания, счастья и новых творческих успехов на благо великой России.

**Председатель Объединенного Научного Совета РАН
по комплексной проблеме "Электротехника,
электроэнергетика, электрофизика",
академик РАН**



К.С. Демирчян

**Главному редактору журнала "Электротехника"
Кочеткову Виктору Дмитриевичу и редакционной
коллегии журнала "Электротехника"**

Дорогие коллеги!

Президиум Академии электротехнических наук Российской Федерации сердечно поздравляет Вас, всех членов редакции и читателей журнала со славным юбилеем – 75-летием со дня образования журнала.

Все прошедшие годы журнал был активным проводником передовых идей научно-технического прогресса в области электротехники и электроэнергетики. И в настоящее время журнал является трибуной российских и зарубежных учёных и инженеров для пропаганды результатов теоретических и научно-практических исследований в этих областях науки и техники. В нём регулярно публикуются статьи ведущих учёных России и дру-

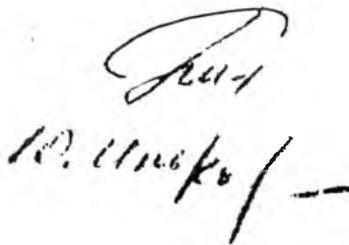
гих стран СНГ, что постоянно привлекает внимание к журналу научно-технической общест­венности как у нас в стране, так и за рубежом. Много внимания журнал уделяет освещению передовых технологий, реализуемых в электротехнической промышленности и энергомашиностроении, на его страницах постоянно обсуждаются наиболее интересные монографии, учебники и учебные пособия для студентов вузов.

В день юбилея примите, дорогие коллеги, искренние пожелания дальнейших успехов в вашей благородной деятельности, чтобы ваш высокий профессионализм был всегда востребован, а также крепкого здоровья, творческих радостей, благополучия и счастья в семье. Мы благодарим Вас за тесное взаимодействие и надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество на благо отечественной науки и техники.

С искренним уважением

Президент АЭН РФ

Главный учёный секретарь АЭН РФ



Б.И. Петленко

Ю.М. Иньков

Правление Общества силовой электроники поздравляет учредителей, редакцию, авторов, читателей – всех электротехников России с юбилейной датой – 75-летием со дня организации журнала "Электротехника".

Журнал "Электротехника" играет важную роль в развитии одного из важнейших научно-технических направлений, оказывающих решающее влияние на все сферы деятельности человека. Можно без преувеличения сказать, что состояние народного хозяйства и всей экономики в огромной степени определяется уровнем электротехники.

Без электротехники не могут быть решены проблемы экономии энергетических ресурсов и экологии, особо остро вставшие перед человечеством в конце XX и в начале XXI веков.

Журнал "Электротехника", охватывающий все направления науки и техники, основанные на использовании физических явлений электричества и магнетизма, по широте тематики не имеет себе равных среди других журналов.

Журнал "Электротехника" представляет специалистам всех направлений возможность публиковать новинки в области науки и техники и знакомит с достижениями в смежных областях.

Выполняя задачи информационного обеспечения специалистов, журнал "Электротехника" решает исключительно важные народно-хозяйственные задачи, способствуя прогрессу экономики.

В этот знаменательный день призываем всех электротехников активно участвовать в работе юбилея.

**По поручению Правления
Общества инженеров Силовой электроники
доктор технических наук, профессор**

Ф.И. Ковалёв

Журналу "Электротехника"

Ассоциация "Автоматизированный электропривод" сердечно поздравляет коллектив редакции, редакционную коллегию и читателей журнала "Электротехника" с 75-летием со дня основания.

История журнала – история большого этапа развития отечественной электротехнической отрасли.

За все годы своей деятельности журнал осуществлял и продолжает осуществлять информационное обеспечение научно-технического и производственного развития электротехнической промышленности нашей страны.

С первых дней своего основания журнал стал органом коллективного творчества по обмену опытом учёных, инженеров, специалистов производства, обсуждению и выработки рекомендаций по важнейшим научно-техническим проблемам, координации научных исследований, использованию достижений науки и производства.

В журнале систематически выступали известные учёные академии наук, руководители электротехнической и смежных отраслей, руководители научных организаций и предприятий по стратегическим вопросам развития электротехнической отрасли страны.

Сегодня журнал "Электротехника" является популярным и авторитетным научно-техническим изданием и занимает одно из ведущих мест в информационной системе проблем электротехники.

Это стало возможным потому, что в разные годы в руководстве редакции и редколлегии работали ведущие учёные и специалисты электротехники, способные формировать совместно с многочисленным авторским коллективом, научные и производственные направления развития электротехники.

Много внимания журнал уделяет проблемам электропривода, а специалисты по электроприводу по праву считают его своим основным печатным органом и уверены, что в каждой новой их разработке есть доля труда и журнала "Электротехника".

От имени электроприводчиков РФ желаю коллективу редакции и редколлегии дальнейших успехов в работе.

Президент Ассоциации



Юньков М.Г.

Журналу "Электротехника"

Коллектив Всероссийского электротехнического института им. В.И. Ленина сердечно поздравляет редакцию и редакционную коллегию журнала "Электротехника" с 75-летием со дня выхода в свет первого номера журнала.

Сотрудники института имеют тесные связи с журналом, рассказывают на его страницах о своих достижениях.

Журнал играет важную роль в развитии отечественной электротехники. Все крупные проблемы, связанные с созданием, освоением производства и эксплуатацией электротехнического оборудования, постоянно освещаются на страницах журнала. За время своего существования на опубликованных в журнале статьях воспитывались несколько поколений учёных и инженеров, успешно работающих в области электротехники и электроэнергетики.

Желаем Вам дальнейших успехов в деле пропаганды новых научных идей и эффективных технических решений, в деле обеспечения высокого научно-технического уровня электротехнического оборудования!

Генеральный директор ГУП ВЭИ им. В.И. Ленина



В.Д. Ковалёв

Редакционной коллегии журнала "Электротехника"

Научно-производственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А.Г. Иосифьяна" сердечно поздравляет Вас с 75-летием основания журнала.

За долгие годы издания журнал объединяет на своих страницах многих учёных и инженеров, работающих в электротехнической и смежных областях техники и пропагандирует новейшие достижения отечественной электротехники.

Основатель и первый директор ВНИИЭМ профессор А.Г. Иосифьян в 1955-1965 годах был главным редактором журнала, и именно при нём название "Вестник электропромышленности" изменилось на более наукоёмное теперешнее, отражающее суть перемен в работе журнала.

В былые времена научные публикации в ВЭП'е для многих из нас были первыми шагами при защите диссертаций, что было чрезвычайно важно.

Ведущие специалисты нашего института и теперь постоянно сотрудничают с журналом, а ряд номеров журнала (электромеханика в космосе, автоматизация электротехнического оборудования и др.) был целиком посвящены работам ВНИИЭМ.

В современных условиях работа журнала имеет большое значение в сохранении старых и налаживании новых научно-технических связей между производителями и потребителями электротехнического оборудования.

Журнал получил признание отечественных и зарубежных научных кругов и представляет большой интерес для специалистов широкого профиля.

Примите, уважаемые коллеги, наши поздравления с юбилеем и пожелания дальнейших творческих успехов в Вашей очень нужной работе.

Генеральный директор



С.А. Стома

Редакционной коллегии журнала "Электротехника"

Уважаемые коллеги!

Примите самые сердечные поздравления и наилучшие пожелания от коллективов Ассоциации "Электрокабель" и Всероссийского научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности (ОАО "ВНИИКП") в связи с 75-летием со дня основания журнала "Электротехника".

На протяжении всего существования журнал "Электротехника" освещает на своих страницах фундаментальные вопросы теоретической и прикладной электротехники, пропагандирует новейшие достижения промышленных предприятий отрасли, внося достойный вклад в развитие российской электротехнической промышленности и науки.

В трудные годы зарождения рыночных отношений Ваш коллектив сумел не потерять свой высокий научно-технический потенциал, продолжая успешную издательскую деятельность и уверенно вступил в XXI век, занимая достойное место среди самых распространенных и авторитетных печатных изданий в электротехнической отрасли. Это стало возможным благодаря тому, что усилия руководства и творческого коллектива постоянно направлены на повышение актуальности публикаций, их научного и технического уровня, прикладной значимости и приближение к разносторонним интересам специалистов-электротехников.

На протяжении истекших 75 лет выросли и сменились несколько поколений читателей и авторов журнала "Электротехника", но одно осталось неизменным – стремление журнала оперативно откликаться на самые животрепещущие проблемы, которые ставит жизнь перед электротехнической наукой и техникой во всем их многообразии.

В этот знаменательный для Вашего коллектива день мы желаем Вам, дорогие друзья, крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, дальнейших творческих успехов и счастья в личной жизни.

Президент Ассоциации "Электрокабель"



И.Б. Пешков

Генеральный директор ОАО "ВНИИКП"

Г.И. Мещанов

Журналу "Электротехника"

Московский энергетический институт поздравляет журнал "Электротехника" с юбилеем.

Мы – Ваши ровесники, нам в этом году тоже 75, и нас объединяет сходная и непреходящая миссия – внедрять технические знания и культуру независимо от конъюнктурных и политических процессов, происходящих в стране и мире. Многие сотрудники и выпускники МЭИ являются читателями, авторами публикаций и даже членами редколлегии Вашего журнала, поэтому мы глубоко чувствуем лежащую на Вас ответственность.

Вы рождены в период интенсивного развития крупной индустрии в СССР, в основе которого была электрификация народного хозяйства, когда возникла неотложная потребность в создании широкой аудитории квалифицированных специалистов-электротехников, обмену информацией и опытом между ними. Во все последующие периоды – защиты отечества, восстановления хозяйства, автоматизации, компьютеризации, перестройки, очередного восстановления – Вы были верны своим главным принципам: воспитанию гражданской ответственности, уважению к традициям Российской и мировой школы электротехники, беспристрастному принятию всего нового, если оно технически и экономически обосновано, независимо от его ведомственной или национальной принадлежности. Эта верность – гарантия Ваших сегодняшних и завтрашних успехов и долголетия.

Желаем журналу процветания, его коллективу – здоровья, благополучия, творческих успехов. Надеемся, что наше сотрудничество послужит общему делу – совершенствованию электротехнического образования, науки и практики.

**Ректор МЭИ,
член-корреспондент РАН**



Е.В. Аметистов

Редакции журнала "Электротехника"

Коллектив научно-технических работников холдинговой компании "Элинар" сердечно поздравляет редакцию журнала "Электротехника" с 75-летием со дня основания.

С первого номера и до сегодняшнего дня Ваш журнал относится к числу наиболее важных и читаемых научно-технических изданий. В настоящее время журнал продолжает свои лучшие традиции, и материалы публикаций являются единственным источником научно-технических новостей по многим направлениям электротехники.

Желаем сотрудникам редакции крепкого здоровья и творческих успехов.

**Генеральный директор,
кандидат технических наук,
член-корреспондент АЭН РФ**

И.Е. Куимов

Динамические характеристики асинхронного электропривода с векторным управлением

ПОТАПЕНКО Е.М., ПОТАПЕНКО Е.Е.

Рассмотрены основные результаты разработки алгоритмов векторного управления асинхронным приводом. Численное моделирование подтвердило хорошие динамические характеристики привода с синтезированными алгоритмами.

Main elaboration results of vector control algorithms of induction drive are adduced and discussed. Digital modeling confirmed well dynamics characteristics of drive with synthesized algorithms.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) являются самыми распространенными электродвигателями. Это обусловлено их простотой, дешевизной и хорошими эксплуатационными качествами. Недостаток этих двигателей – сложность динамических процессов, происходящих в работающем двигателе, что являлось причиной их плохих регулировочных характеристик. Прогресс электропреобразовательной и вычислительной техник стимулировал разработку и внедрение новых принципов управления – векторного управления (ВУ). АД с ВУ обладают регулировочными характеристиками, не уступающими характеристикам двигателей постоянного тока. В настоящее время электроприводы на базе АД с ВУ разрабатываются и поставляются несколькими крупными фирмами дальнего зарубежья. Однако эти электроприводы, их наладка и ремонт очень дороги. К сожалению, по ряду политических и экономических причин в странах СНГ, в том числе и на Украине, такие электроприводы не производятся. Поскольку алгоритмы ВУ поставляемых из-за рубежа электроприводов засекречены, авторы начиная с 1999 г. проводят работу по синтезу и анализу алгоритмов ВУ АД.

В качестве источника напряжения рассматривался преобразователь частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Поскольку токи и напряжения на выходе ПЧ представляют собой полезные сигналы, на которые наложены высокочастотные помехи, обусловленные ШИМ, то были синтезированы фильтры, выделяющие полезные сигналы без искажений их амплитуд и фаз при всех скоростях ротора АД [1–4]. Помимо этого, разработаны алгоритмы оценки и компенсации погрешностей датчиков тока и напряжения [5, 6]. Была составлена простая, но точная математическая модель магнит-

ного насыщения АД, с помощью которой минимизирована потребляемая мощность как в обычном режиме, так и в режиме ослабления магнитного потока (при скоростях выше номинальной) [7–12]. Разработан робастный алгоритм формирования электромагнитного момента, построенный на наблюдении и компенсации нагрузки и разброса параметров АД [7–9]. Для управления только по клеммным измерениям (по выходным напряжениям и токам ПЧ) были синтезированы алгоритмы оценки векторов потокоцеплений ротора, статора и угловых скоростей вращения этих векторов, инвариантные по отношению к сопротивлению ротора [5, 14, 15]. С целью улучшения качества управления были разработаны алгоритмы идентификации параметров АД (в первую очередь, сопротивлений статора и ротора) в реальном времени в процессе штатной работы [16, 17]. Алгоритм оценки сопротивления статора использует в качестве информации только клеммные токи и напряжения АД. Таким образом, алгоритмы информационного обеспечения представляют собой совокупность подсистем разностных уравнений с односторонними связями: подсистемы первого порядка для идентификации сопротивления статора, подсистемы второго порядка для оценки векторов потокоцеплений ротора и статора и двух подсистем первого порядка для определения скорости и сопротивления ротора. Это существенно снижает объём вычислений при оценке перечисленных параметров и переменных по сравнению с их одновременной оценкой [18]. Были исследованы известные алгоритмы управления токовыми контурами и синтезирован новый алгоритм управления, который снимает противоречия между быстродействием и точностью, с одной стороны, и перерегулированием и колебательностью, с другой стороны, харак-

терные для традиционных ПИ-регуляторов [19]. Кроме того, синтезированный алгоритм устраняет необходимость компенсации перекрестных связей между токовыми контурами, на порядок снижает уровень пульсаций скорости, обусловленных ШИМ, что существенно опускает нижнюю границу диапазона регулирования скорости. Разработаны алгоритмы управления как с датчиком скорости, так и без него с использованием только клеммных измерений тока и напряжения АД.

Результаты моделирования

При моделировании динамических процессов на ПЭВМ рассматривался АД типа А2-81-4 с номинальной угловой скоростью ротора 1460 об/мин (около 150 с^{-1}) мощностью 32 кВт и номинальным моментом нагрузки 262 Н·м. Частота импульсов ШИМ ПЧ принималась равной 4 кГц. В алгоритмы были введены ограничения тока и напряжения, а также осуществлено моделирование эффектов ШИМ и бросков напряжения питающей сети. Поскольку синтезированные фильтры позволяют замерять напряжение непосредственно на выходе ПЧ, то тем самым устраняется погрешность определения напряжения, обусловленная изменением напряжения питающей сети, запаздыванием открытия и закрытия транзисторов ПЧ, мёртвым временем и падением напряжения на транзисторах. Алгоритмы управления представлены в дискретном виде с тактом счёта 100 мкс.

Результаты моделирования ВУ АД с датчиком скорости, как более очевидные, с целью сокращения объёма статьи не приводятся, а их описание дано в заключении.

На рис.1–6 показаны процессы управления только по клеммным измерениям (без использования датчиков скорости и потокосцепления). Рис.1,2 иллюстрируют следующую последовательность операций: намагничивание магнитной цепи (0–0,5 с), разгон до скоростей 150 и $0,5 \text{ с}^{-1}$, соответственно, включение (1,1 с) и выключение (1,8 с) нагрузки, реверс, скачкообразный провал напряжения сети на 30% (3,2 с) и восстановление номинального напряжения (3,4 с). Нагрузка m_1 подчинялась зависимостям $m_1 < 0$ при $\omega > 0$, $m_1 = 0$ при $\omega \leq 0$. На рис.2 интервал времени 1,4–1,6 с можно рассматривать как разгон под нагрузкой. Рис.3 иллюстрирует процесс стабилизации нулевой скорости при набросе и сбросе нагрузки $m_1 < 0$. Результаты моделирования свидетельствуют о хороших динамических характеристиках системы во всем диапазоне скоростей, включая нулевую скорость. Тот факт, что раз-

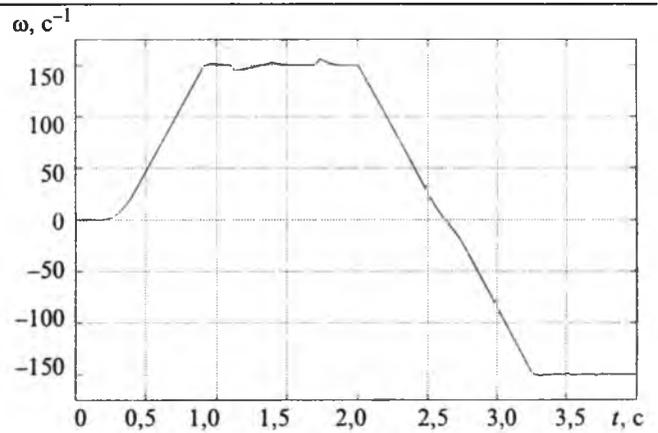


Рис.1

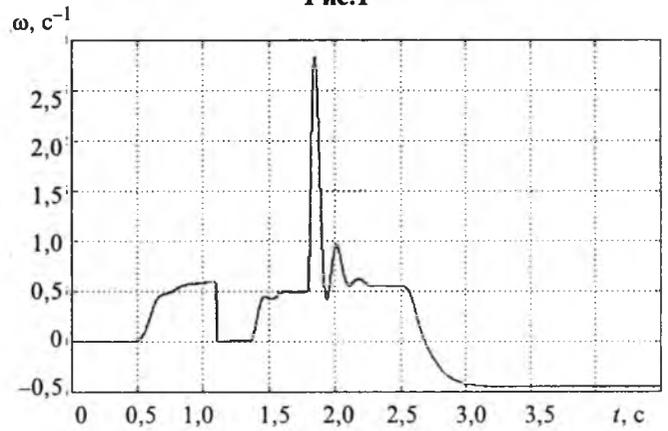


Рис.2

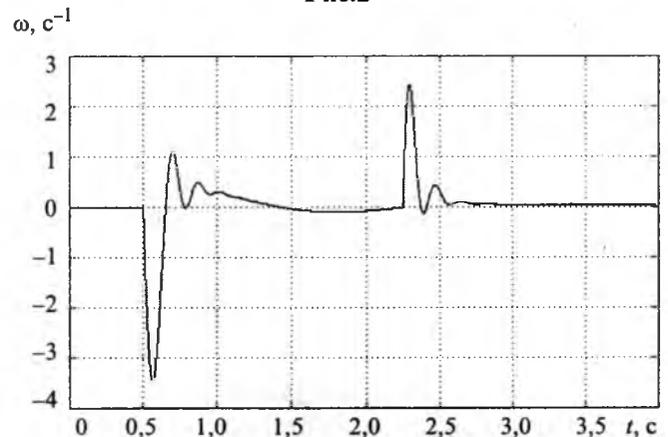


Рис.3

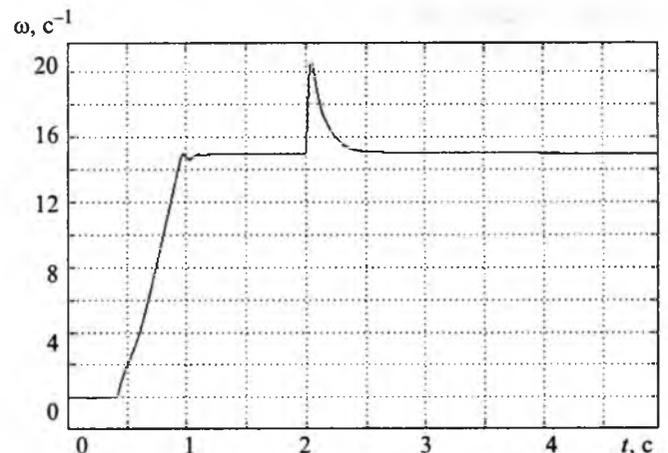


Рис.4

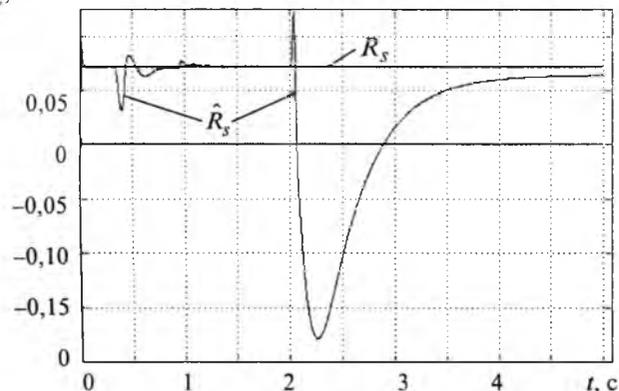
R_s , Ом

Рис.5

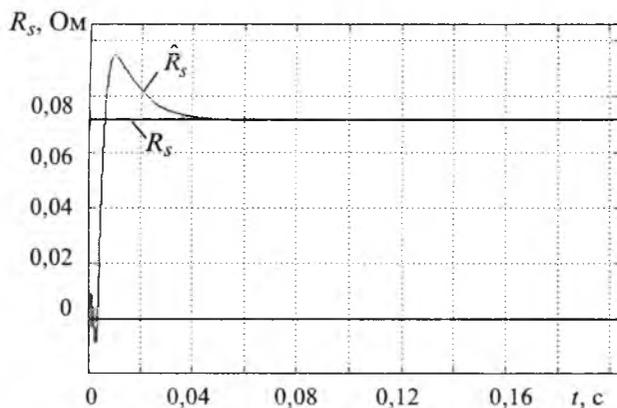


Рис.6

работанные алгоритмы управления по клеммным измерениям обеспечивают стабилизацию нулевой скорости, открывают перспективу позиционного управления без датчика скорости даже по сигналам релейного двух- или трёхпозиционного датчика положения. Таким образом, возможности управления без датчика скорости близки к возможностям управления с датчиком скорости за исключением полосы пропускания системы, которая в случае управления по клеммным измерениям на порядок меньше.

На рис.4 представлено изменение скорости в процессе намагничивания (0–0,4 с), разгона под нагрузкой –262 Н·м (0,4–1 с), сброса нагрузки при $t = 2$ с. На рис.5 представлен процесс идентификации сопротивления статора $R_s = 0,072$ Ом при начальной его оценке $R_s = 0,144$ Ом в процессе работы АД, представленной на рис.4. На рис.6 изображен процесс идентификации R_s в начальный момент намагничивания в увеличенном масштабе. Идентификация с большим быстродействием происходит в режимах намагничивания АД при нулевой скорости и отсутствии электромагнитного момента, при разгоне АД с нагрузкой и без неё, при вращении ротора и наличии достаточно медленно изменяющейся нагрузки. В режиме холостого хода идентификация

осуществляется гораздо медленнее. При скоростях, больших половины номинальной скорости АД, точность идентификации ухудшается. Это связано с тем, что с увеличением скорости ротора влияние неточности знания R_s на динамику АД уменьшается. При больших по модулю рывках и при набросах и сбросах нагрузки происходит нарушение идентификации. В этом случае процесс идентификации следует приостанавливать или переходить к цифровой фильтрации с большой постоянной времени.

Выводы

Численное моделирование работы АД при управлении с датчиком скорости дало следующие результаты:

1. Система обладает астатизмом по отношению к нагрузке АД и изменениям напряжения питающей сети.

2. Процессы мгновенных наброса и сброса номинальной нагрузки, а также броски напряжения питающей сети при работе в районе номинальной скорости вызывают погрешность в регулировании скорости порядка 0,3%.

3. Система в зависимости от нагрузки автоматически меняет как намагничивающую, так и моментную составляющие тока статора, оптимизируя потребляемую мощность.

4. Система обладает хорошей робастностью по отношению к отклонениям сопротивлений статора и ротора от их номинальных значений.

Моделирование работы АД при управлении только по клеммным измерениям (без датчика скорости) показало:

1. Система обладает астатизмом по отношению к нагрузке АД и изменениям напряжения питающей сети.

2. Постоянная скорость, в том числе и нулевая, как при наличии постоянной нагрузки, так и без неё поддерживается с точностью $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Если допустить погрешность минимальной скорости 20%, то диапазон регулирования скорости составляет 1:40000.

3. Синтезированный алгоритм обеспечивает быструю идентификацию сопротивления статора во всех основных режимах работы АД, за исключением моментов времени с большими рывками, а также в режиме холостого хода.

4. Управление по клеммным измерениям уступает управлению с измерением скорости только в ширине полосы пропускания, которая в первом случае на порядок меньше.

5. Известные алгоритмы информационного обеспечения с близким к нашему диапазону

регулирования скорости [20,21] оценивают те же параметры и переменные, что и в нашем случае, решая систему разностных уравнений седьмого порядка с коэффициентом объема вычислений [18], равным $7^3 = 343$. В нашем случае, вследствие расщепления системы уравнений на ряд подсистем с односторонними связями, коэффициент объема вычислений равен $2^3 + 1^3 + 1^3 + 1^3 = 11$. Поэтому наши алгоритмы информационного обеспечения требуют в 30 раз меньшего объема вычислений, чем известные алгоритмы того же назначения.

Таким образом, синтезированные алгоритмы векторного управления по динамическим характеристикам не уступают лучшим известным алгоритмам, но существенно проще в вычислительном отношении.

Список литературы

1. Потапенко Е.Е. Определение скорости плоского вращения вектора, заданного его проекциями // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. (Запорожье, ЗНТУ). 2002. №1. С.143–146.
2. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Фильтрация многофазных нестационарных неопределенных гармонических сигналов // Электротехника. 2003. №3. С.55–57.
3. Потапенко Е.Е. Синтез и анализ аналого-цифровых адаптивных наблюдателей многофазных неопределенных сигналов // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2003. №1. С.139–142.
4. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Синтез и анализ компенсационных фильтров многофазных неопределенных сигналов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». 2003. №10, т.2. С.342–344.
5. Потапенко Е.Е., Соломаха А.В., Куликов А.А. Оценка потокосцеплений асинхронных двигателей при наличии погрешностей измерений тока и напряжения // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2003. №2. С.159–161.
6. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Оценка двухфазных неопределенных сигналов при наличии погрешностей датчиков // Электротехника. 2004. № 6. С.29–31.
7. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Энергосберегающее робастное управление асинхронными приводами // Механіка та машинобудування. (Харків, ХДПУ). 1999. №1. С.106–111.
8. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Синтез экстремального робастного управления асинхронным приводом // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Част. 6. Київ (ІЕ НАНУ). 2000. С.34–37.
9. Бичай В.Г., Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Робастное экстремальное управление асинхронным приводом // Автоматика-2000. Міжнародна конференція з автоматичного управління. Львів, 11–15 вересня 2000. Львів: ДНДІП. 2000. Т.5. С.27–31.
10. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Синтез оптимальных алгоритмов управления асинхронным приводом с учетом нелинейностей // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник НТУ «ХПИ». Сер.

«Электротехника, электроника и электропривод». 2001. Вып. 10. С.107–110.

11. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., Бичай В.Г. Согласование оптимальных режимов векторного управления асинхронным двигателем // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник НТУ «ХПИ». Сер. «Электротехника, электроника и электропривод». Вып. 10. 2002. №12, т.1. С.93–97.

12. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., Кулинич Э.М. Оптимизация алгоритмов векторного управления асинхронным двигателем при больших скоростях с учетом нелинейностей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. (Кременчук). 2002. Вип.1. С.50–53.

13. Пиза Д.М., Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Оптимальное векторное управление АД с учетом нелинейностей // Матеріали міжнарод. конф. з автоматичного управління «Автоматика-2002». Донецьк: ДНТУ. 2002. Т.1. С.148–151.

14. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. Синтез быстродействующих алгоритмов оценки вектора состояния АД // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 4. Київ (ІЕ НАНУ). 2002. С.33–36.

15. Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е. Оценка векторов потокосцеплений и их скоростей в двигателях переменного тока // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». 2003. №10, т.1. С.105–107.

16. Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М. К вопросу идентификации параметров и восстановления вектора состояния асинхронного двигателя // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Вестник ХГПУ, 1999. Вып. 61. С.82–84.

17. Потапенко Е.Е. Информационное обеспечение векторного управления асинхронным двигателем // Радіотехніка. Информатика. Управление. 2004. №1.

18. Шмидт Дж. Линейные и нелинейные методы фильтрации // Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / М.: Мир, 1980. С.49–73.

19. Потапенко Е.М., Даниличев Д.С., Потапенко Е.Е. и др. Оптимизация и исследование динамики токовых контуров системы векторного управления асинхронным двигателем // Электротехніка і електроенергетика. 2003. №1. С.42–47.

20. Kim R., K.Sul S. and Park M.H. Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter // IEEE Trans. Ind. Applications. 1994. Vol. 30, №5. P. 1225–1233.

21. Kubota H., Sato I., Tomura Y., Matsuse K. e.c. Regenerating-Mode Low-Speed Operation of Sensorless Induction Motor Drive with Adaptive Observer // IEEE Trans. Ind. Applications. 2002. Vol. 38, №4. P.1081–1086.

Потапенко Евгений Михайлович – профессор Запорожского национального технического университета (ЗНТУ). Окончил моторостроительный факультет Харьковского авиационного института в 1962 г. В 1970 г. защитил кандидатскую диссертацию по системам управления космическими аппаратами. В 1975 г. защитил докторскую диссертацию по робастным системам управления. С 1999 г. занимается векторным управлением асинхронными двигателями.

Потапенко Евгений Евгеньевич – аспирант ЗНТУ. Окончил электротехнический факультет ЗНТУ в 2001 г.

Решение оптимизационных задач высокоинерционного автоматизированного электропривода методом Ньютона-Рафсона с расширенной областью применения

ХАШИМОВ А.А., ТУЛЯГАНОВ М.М.

Предлагается методика и алгоритм расчета оптимальных пусков высокоинерционного автоматизированного электропривода на ЭВМ с помощью расширения области применения метода Ньютона - Рафсона. На основе данной методики рассчитываются оптимальные динамические режимы высокоинерционного частотно-регулируемого асинхронного электропривода с учетом тепловых процессов. Рассмотрены пути повышения энергетической эффективности электродвигателя за счет снижения потребления мощности в динамических режимах.

It is offered methods and algorithm of the calculation of the optimum starting process of the high inertial automated electrical drive on COMPUTER by means of expansions of the application of the method Newton - Rafson. On the base of given method the optimum dynamic modes high inertial frequency-controlled anisochronous electrical drive with taking into consideration of heat processes are calculated. The ways of increasing of energy efficiency of the electric motor to account of the reduction of the power consumption in dynamic mode is considered.

Один из наиболее эффективных методов исследования задач оптимального управления динамики высокоинерционных автоматизированных частотно-регулируемых электроприводов (ЭП) – математическое моделирование их на ЭВМ, нахождение оптимальных законов управления для оценки их предельных возможностей и улучшение регулировочных, энергетических и эксплуатационных характеристик ЭП.

При решении этой задачи важное значение имеет дальнейшее развитие численных методов оптимизации и расширение области применения существующих методов [1].

Пусть состояние объекта описывается интегральными уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \bar{X} &= \int_{t_0}^T \bar{f}(\bar{x}(t), \bar{U}(t), t) dt; \\ J_T &= \int_{t_0}^T dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с краевыми условиями $\bar{x}(t_0) = \bar{x}_0$, $\bar{x}(T) = \bar{x}_T$,

где $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ – вектор состояния, представляющий собой набор координат, описывающих поведение объекта; $\bar{U}(t)$ – вектор управлений объектом; $\bar{X}(t_0)$ – координаты объекта в начальный момент времени; $\bar{X}(T)$ – координаты объекта в конечный момент времени.

Согласно принципу взаимности [2] в задачах оптимального управления с интегральными связями уравнения экстремалей не изменятся, если будем искать экстремум интеграла J_T при усло-

вии постоянства \bar{X} или экстремум интеграла \bar{X} при постоянстве J_T .

Преобразуем систему согласно принципу максимума. Определим систему дифференциальных уравнений, сопряженную (1), для вспомогательных ψ -функций:

$$\dot{\psi} = \left[\frac{\partial \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, t)}{\partial \bar{x}} \right] \bar{\psi}. \quad (2)$$

Из необходимого условия оптимальности [3] функция Гамильтона H должна иметь максимум по U , и таким образом

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0. \quad (3)$$

Условие (3) чаще всего выражается в виде алгебраического уравнения:

$$a_1 U^n + a_2 U^{n-1} + \dots + a_n U + a_{n+1} = 0, \quad (4)$$

где a_1, a_2, \dots, a_n – коэффициенты, зависящие от \bar{x} и вспомогательных уравнений сопряженной системы $\bar{\psi}$.

Когда в (4) порядок алгебраического уравнения высок ($n \geq 3$), использование метода Ньютона-Рафсона осложняется тем, что при вычислении матрицы Якоби [1] возникает необходимость определения частных производных от вектора управлений U^* по вспомогательным переменным, при котором U^* выражается из (4) в неявной форме.

Эту задачу можно решить численно следующим образом.

Для вычисления вектора управлений U^* из алгебраического уравнения используем один из численных методов [4]: итерации, половинного

деления или Ньютона на каждом шаге интегрирования и, подставляя численные значения U^* в дифференциальные уравнения (1) и (2), перейдём к решению краевой задачи.

Для вычисления частных производных $du/d\psi$ в элементах матрицы Якоби [1], поступаем следующим образом. Обозначим левую часть (4) через $F(\bar{A}, U)$:

$$F(\bar{A}, U) = 0, \quad (5)$$

где $\bar{A} = [a_1, a_2, \dots, a_{n+1}]$ – вектор коэффициентов алгебраического уравнения.

Для нахождения производной неявной функции, воспользуемся формулой, приведённой в [5]:

$$\frac{\partial U}{\partial \psi} = - \frac{\frac{\partial F}{\partial \psi}}{\frac{\partial F}{\partial U}} \quad (6)$$

Таким образом, можно расширить область применения метода Ньютона-Рафсона, так как управление в неявной форме уже не является препятствием к решению подобных задач оптимизации.

Блок-схема подпрограммы алгоритма решения уравнения (5) по методу Ньютона приведена на рис.1. Как отмечено в [4], метод Ньютона эффективен для решения тех уравнений, для которых значение модуля производной $|F'_u|$ близ корня достаточно велико, т.е. график функции F в окрестности данного корня имеет большую крутизну. По приведенным выше соображениям для решения алгебраического уравнения в нашем случае применен метод Ньютона.

Рассмотрим систему интегральных уравнений, описывающую совместные электромеханические и тепловые процессы, протекающие в высокоинерционном частотно-регулируемом асинхронном ЭП (тяжелые балансировочные станки, центробежные большегрузные сепараторы, центрифуги, турбомолекулярные насосы, механические аккумуляторы кинетической энергии и др.), добавив к ним функционал быстрого действия:

$$\left. \begin{aligned} \theta_d &= \int_{t_0}^T \left(\frac{P_r}{C_i} + k_1 \theta_{oc} - k_2 \theta_d \right) dt; \\ \omega &= \int_{t_0}^T \left(\frac{P}{J} (M_3 - M_c) \right) dt; \quad J_T = \int_{t_0}^T dt, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где θ_d – средняя температура; ω – угловая ско-

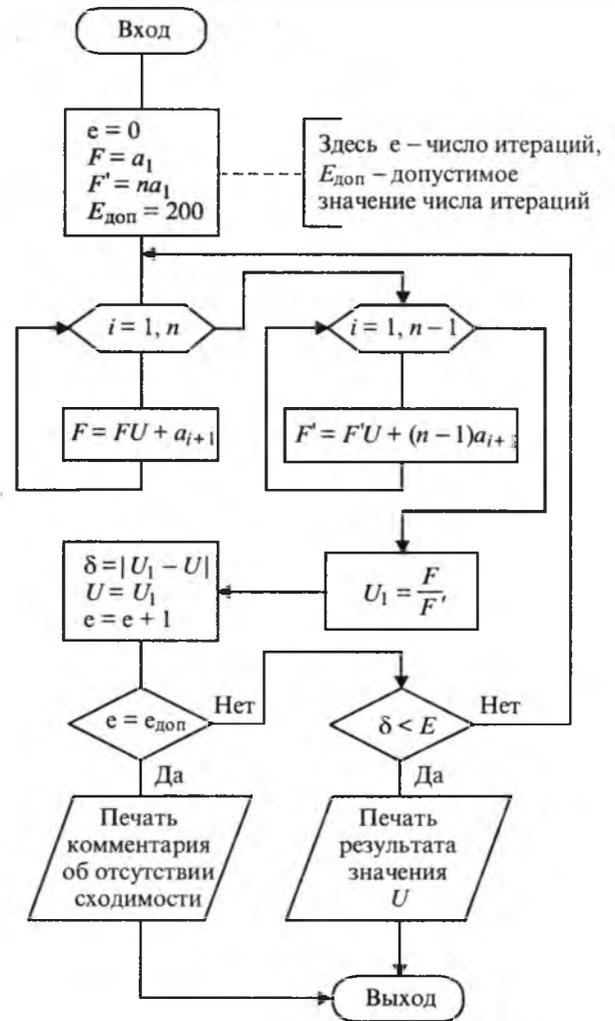


Рис.1. Блок-схема подпрограммы алгоритма расчёта решения алгебраического уравнения методом Ньютона

рость вращения вала; C_i – теплоёмкость двигателя; k_1, k_2 – коэффициенты отражающие тепловую связь двигателя с окружающей средой; p – число пар полюсов двигателя; J – момент инерции вращающихся частей АД; M_3 – электромагнитный момент; M_c – момент сопротивления на валу.

Обобщённая математическая модель (7), при которой АД рассматривается как единое гомогенное тело с учётом взаимовлияния всех параметров включает в себя два интегральных уравнения: первое – теплового баланса АД с окружающей средой, второе – уравнение движения ЭП.

В качестве тепловых потерь P_r за время переходного процесса взяты электрические потери в обмотках статора и ротора АД [6].

Преобразуем систему (7) для режима постоянного магнитного потока:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{д} &= \int_{t_0}^T \left[m_1 \Phi^2 C_k^2 f_{1н}^2 \frac{\left[r_1 + \frac{r_1 x_2'}{x_0} \right]^2 \beta^2 + \frac{r_1^2 x_2'^2}{x_0^2} + r_1 r_2 \beta^2}{r_1 (x_2'^2 \beta^2 + r_2'^2)} + k_1 \theta_{oc} - k_2 \theta_{д} \right] dt; \\ \omega &= \int_{t_0}^T \frac{p}{J} \left[\frac{p m_1 \Phi^2 C_k^2 f_{1н}^2 r_1' \beta}{\omega_{1н} (x_2'^2 \beta^2 + r_2'^2)} - M_c \right] dt, \quad J_T = \int_{t_0}^T dt. \end{aligned} \right\} (8)$$

Основой для написания уравнений (8) послужили положения [6].

Здесь приняты следующие обозначения: β – относительный параметр абсолютного скольжения; m_1 – число фаз; r_1 – активное сопротивление статора; r_2' – активное сопротивление ротора; x_1, x_2, x_0 – индуктивное сопротивление статора, ротора и намагничивающей ветви; Φ – магнитный поток в воздушном зазоре; C_k – конструктивная постоянная АД; $f_{1н}$ – номинальная частота питания АД; ω_1 – угловая частота вращения поля статора.

Находим координаты и оптимальные управляющие воздействия ЭП, минимизируя при этом среднюю температуру нагрева АД.

Минимизация $\theta_{д}$ связана с минимизацией тока статора и ротора АД. Электрические потери в этих обмотках в переходном процессе являются основными потерями и соответственно равны $m_1 I_2'^2 r_1'$ и $m_1 I_2'^2 r_2'$ [6]. Такая постановка задачи является развитием закона частотного управления по минимуму квадрата тока статора АД [7].

Поскольку неучёт насыщения стали магнитопровода АД приводит к существенным ошибкам в расчётах, то насыщение учитывается формулой Архангельского, выражающей поток через ток намагничивания [7]:

$$\Phi = A \arctg B i_0, \quad (9)$$

где A и B – коэффициенты аппроксимации.

Сопротивление x_0 намагничивающей цепи (входящее в формулы математической модели)

$$x_0 = b - c \Phi^2, \quad (10)$$

где b и c – постоянные коэффициенты.

В качестве управляющих возьмём промежуточные переменные: параметр абсолютного скольжения β и x_0 . Для этого частные производные от промежуточной функции H по β и x_0 приравниваем к нулю.

Если ввести обозначения:

$$k_5 = r_1^2 r_2' k_3 \Psi_1 \left[1 + \frac{2x_2'}{x_0} + \frac{r_2'}{x_0} \right]; \quad k_6 = (x_2' r_2' k_4 \Psi_2)^2;$$

$$\left. \begin{aligned} k_7 &= -x_2' k_4 \Psi_2; \quad a_1 = -\beta (\Psi_1 k_3 \beta r_1^2 + k_4 \Psi_2 + r_1 r_2'^2 \beta \Psi_1 k_3); \quad a_2 = 0; \quad a_3 = \Psi_1 k_3 r_1^2 (x_2'^2 \beta - 2\beta b x_2' + r_2'^2); \\ a_4 &= -2r_1^2 b k_3 \Psi_1 (r_2'^2 + \beta^2 x_2'^2); \\ F(\bar{A}, \bar{x}_0) &= a_1 x_0^3 + a_2 x_0^2 + a_3 x_0 + a_4; \\ \bar{A} &= [a_1, a_2, a_3, a_4], \end{aligned} \right\}$$

то в итоге можно записать окончательно краевую двухточечную задачу, решение которой будет определять оптимальные управляющие воздействия частотно-регулируемого АД при постоянстве момента сопротивления на валу АД:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_{д}}{dt} &= k_3 \frac{b - x_0}{c} \frac{\left[r_1 + \frac{r_1 x_2'}{x_0} \right]^2 \beta^2 + \frac{r_1^2 x_2'^2}{x_0^2} + r_1 r_2 \beta^2}{r_1 (x_2'^2 \beta^2 + r_2'^2)} + k_1 \theta_{oc} - k_2 \theta_{д}; \\ \frac{d\omega}{dt} &= k_4 \frac{(b - x_0) \beta}{x_2'^2 \beta^2 + r_2'^2} - \frac{p}{J} M_c; \\ \frac{d\Psi_1}{dt} &= k_2 \Psi_1; \quad \frac{d\Psi_2}{dt} = 0; \\ \beta^* &= \frac{-k_5 \pm \sqrt{k_5^2 + k_6}}{k_7}; \quad F(\bar{A}, x_0^*) = 0. \end{aligned} \right\} (11)$$

Краевые условия:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{д(t=0)} &= \theta_{д0}; \quad \theta_{д(t=T)} = \theta_{дT}; \\ \omega_{(t=0)} &= \omega_0; \quad \omega_{(t=0)} = \omega_T. \end{aligned} \right\}$$

Далее задачу решаем на ЭВМ, пользуясь методом Ньютона-Рафсона согласно блок-схеме рис.2.

По изложенному алгоритму был произведен расчёт оптимальных пусков АД АЭ 92-4 мощностью 40 кВт, защищённого исполнения в режиме постоянного магнитного потока с высоким моментом инерции в соответствии с критерием оптимальности по минимуму электрических потерь с учётом насыщения. При расчётах суммарный момент инерции рабочего механизма и вращающихся частей АД в 17 раз превышал собственный момент инерции ротора.

Графики основных параметров пуска при номинальной частоте питания и оптимального пуска для нулевых начальных условий координат в относительных единицах приведены соот-

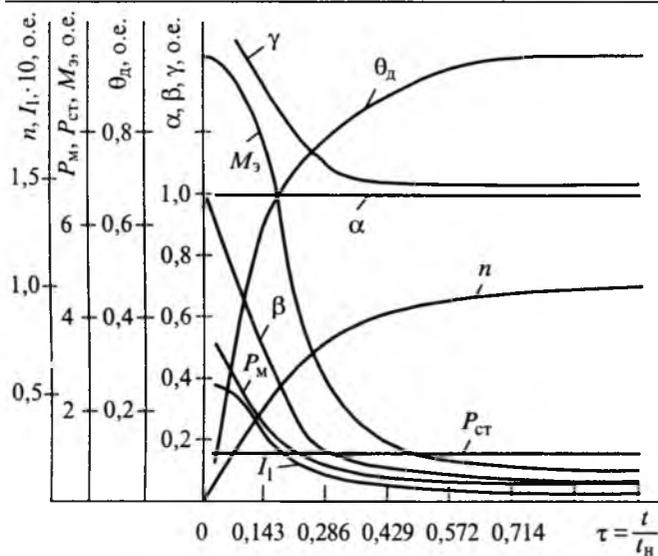


Рис.3. Пуск АД АЭ-92-402 при номинальной частоте питания

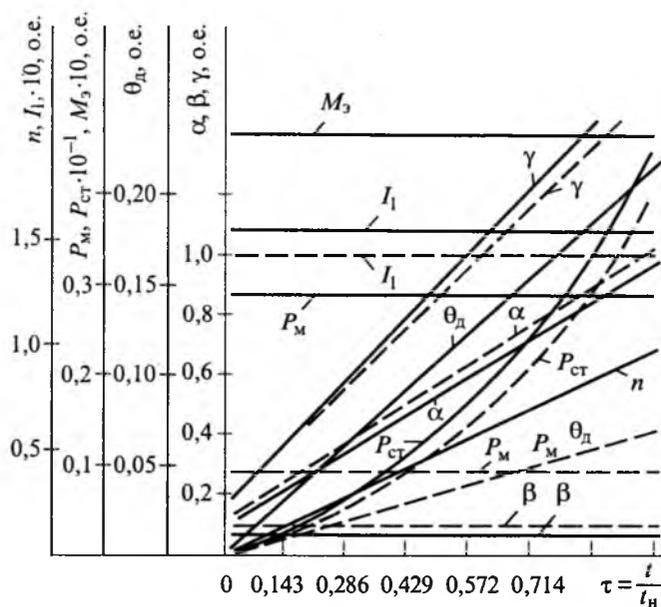


Рис.4. Кривые оптимальных пусков АД АЗ92-4 в системах частотно-регулируемого ЭП:

— кривые 1; --- кривые 2

ответственно на рис.3 и 4.

Кривые 1 на рис.4 соответствуют частотно-регулированию для критерия оптимальности минимума электрических потерь в статоре и роторе АД, кривые 2 – для критерия минимума электрических потерь только в статоре АД.

Чтобы дать количественную оценку выбранному режиму, результаты расчёта сопоставим с результатами режима пуска при номинальной частоте питания. За базисные параметры приняты параметры АД в номинальном режиме работы, за исключением средней температуры. За

базисную температуру нагрева принята средняя температура нагрева АД в конце переходного процесса при пуске из холодного состояния до номинальной частоты вращения в режиме постоянного магнитного потока с номинальной частотой питания. Как видно из рис.3, 4 для АД АЭ92-4 средняя температура режима по минимуму электрических потерь в статоре и роторе АД может быть снижена почти на 77% по отношению к пуску АД на номинальной частоте.

Если считать, что переходной процесс заканчивается при $\tau = t/t_n = 1$ и значения всех электромеханических и тепловых зависимостей режима по минимуму электрических потерь в статоре и роторе принять за 100%, то можно отметить: при оптимальном частотном пуске по минимуму электрических потерь в статоре и роторе по достижении номинальной частоты вращения $n = n_n = 1405$ об/мин относительный параметр абсолютного скольжения β за то же время пуска отличается от значения β режима по минимуму электрических потерь в статоре АД на 23,1%, относительное напряжение питания АД γ – на 7,3%, ток статора – на 6,6%, относительная частота питания АД – на 1,8 %, потери в стали – на 15,3%, потери в меди и средняя температура АД – на 67,3% в сторону увеличения. Угловые скорости вращения вала и электромагнитные моменты обоих режимов совпадают.

Из сказанного следует, что режим по минимуму электрических потерь в статоре и роторе отличается от режима по минимуму электрических потерь в статоре на величину, характеризующую дополнительный учёт электрических потерь в обмотке ротора АД. Таким образом, в высокоинерционных ЭП с АД учёт электрических потерь в обмотке ротора позволит избежать крайне нежелательных перегревов лимитирующих частей АД и наиболее полно использовать двигатель по теплу.

Как видно из рис.4, оптимальный закон управления предполагает характер изменения угловой скорости вращения монотонным и близким к линейному. Значит путём стабилизации ускорения в переходном процессе можно получить высокие технико-экономические показатели электропривода.

Предлагаемая методика и алгоритм расчёта оптимальных пусков, и полученные законы управляющих воздействий позволяют сформулировать конкретные требования к системам автоматического управления и регулирования частотного ЭП, реализующие оптимальные динамические режимы.

Список литературы

1. Хофер Э., Лундерштедт Р. Численные методы оптимизации. М.: Машиностроение, 1981.
2. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учётом ограничений по нагреву. Л.: Энергия, 1971.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961.
6. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Светозарова Г.И., Сигитов Е.В., Козловский А.В. Практикум по программированию на алгоритмических языках. М.: Наука, 1980.
5. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. М.: Наука, 1968. Т.1. С. 250–252.
7. Шубенко В.А., Шрейнер Р.Т., Мищенко В.А. Оптимизация частотно-управляемого асинхронного электропривода по минимуму тока // Электричество. 1970. № 9. С.23–25.

8. Хашимов А.А., Петрушин А.Д. Оптимальные режимы работы частотно-регулируемых асинхронных электроприводов с учётом тепловых процессов. Ташкент: Фан, 1990.

Хашимов Арипджан Адылович – профессор Ташкентского государственного технического университета, доктор техн. наук. Окончил энергетический факультет Ташкентского политехнического института в 1962 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Теория и методы расчёта частотно-управляемых асинхронных электроприводов" в 1990 г.

Туляганов Мурот Муслимович – доцент Ташкентского государственного технического университета, канд. техн. наук. Окончил факультет "Автоматизированные системы управления" Ташкентского политехнического института в 1982 г. Защитил диссертацию по теме "Математическая модель и алгоритм расчёта оптимальных динамических режимов высокоинерционного частотно-управляемого асинхронного электропривода с учётом тепловых переходных процессов" в 1995 г.

Регулирование скорости в асинхронных электроприводах с релейным частотно-токовым управлением

ВОЛКОВ А.В., доктор техн.наук

Запорожский Национальный технический университет, Украина

Разработана с применением принципов подчинённого регулирования и посредством цифровой модели исследована система автоматического управления скоростью асинхронного электропривода с релейным частотно-токовым управлением на основе автономного инвертора напряжения или непосредственного преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией.

Using principles of subordinate regulation and by means of a digital model, an automatic speed control system by asynchronous electric drives with relay frequency – current control on the base of a pulse – with modulation autonomous voltage inverter or direct frequency converter is elaborated and researched.

Особую актуальность и практический интерес представляют разработка и исследование систем автоматического управления (САУ) скоростью современных частотно-управляемых асинхронных электроприводов на основе преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с системами векторного регулирования статорного тока релейного типа [1–4]. Наиболее известная из релейных систем, получившая название "DTC – управления" [4], вместе с относительной простотой и быстродействием обладает рядом присущих ей недостатков: повышенным уровнем пульсаций фазных потокосцеплений и статорных токов двигателя,

приводящих, в свою очередь, к увеличению модуляционных электромагнитных потерь мощности асинхронного двигателя (АД). К настоящему времени в научно-технической литературе вопросы расчёта регуляторов, исследования устойчивости САУ скоростью, переходных электромеханических процессов и статических механических характеристик привода применительно к релейному управлению асинхронными электроприводами на основе трёхфазных автономного инвертора напряжения (АИН) или непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) с ШИМ рассмотрены недостаточно. Предложенная статья направлена в определённой степени

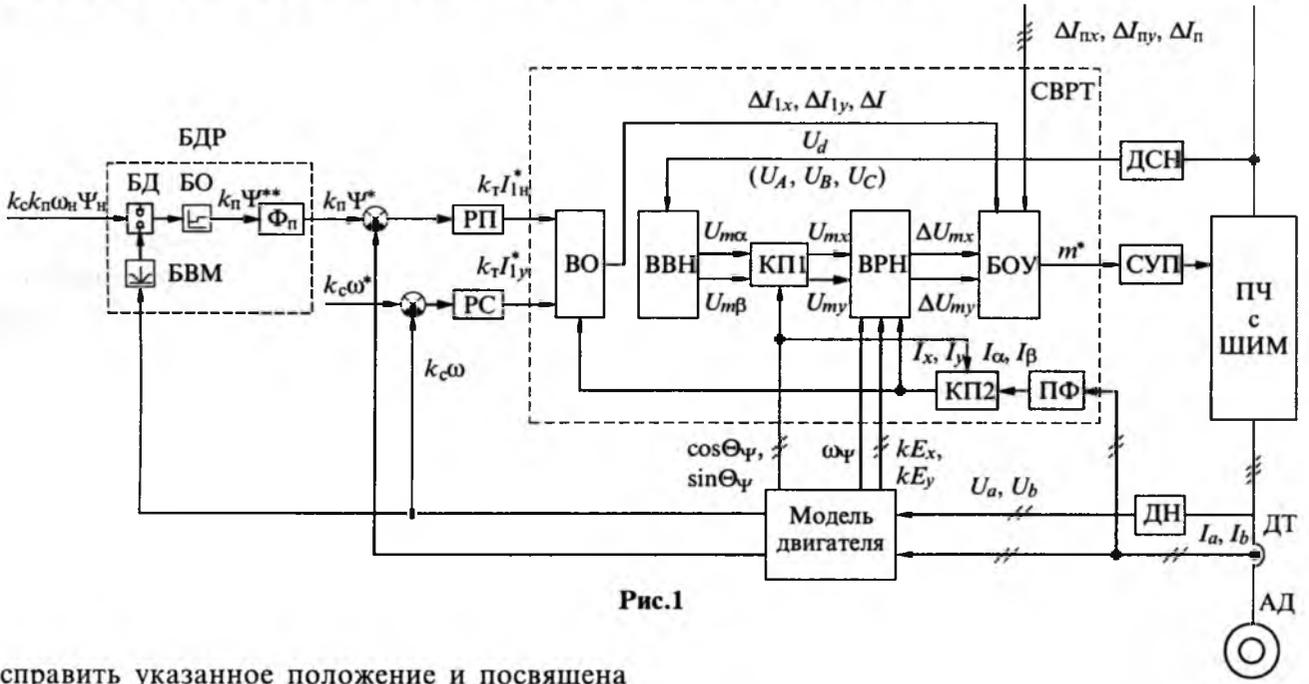


Рис.1

исправить указанное положение и посвящена расчёту и исследованию САУ скорости асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ, реализованной с применением принципов подчиненного регулирования и релейного частотно-токового управления.

Функциональная схема САУ скоростью асинхронного электропривода с указанными типами ПЧ с ШИМ представлена на рис.1. Во внутреннем (токовом) контуре регулирования данной САУ реализована релейного типа система векторного регулирования тока (СВРТ) электропривода, для функционирования которой установлены: датчик сетевого напряжения ДСН (входного напряжения U_d – для АИН-ШИМ или трёхфазной питающей сети U_A, U_B, U_C – для НПЧ-ШИМ), а также – датчик ДТ фазных статорных токов двигателя [2]. СВРТ на рис.1 содержит: вычислитель отклонений (ВО) статорных токов, вычислитель выходного напряжения (ВВН) преобразователя частоты с ШИМ, прямые координатные преобразователи КП1 и КП2, вычислитель результирующего напряжения (ВРН), блок оптимального управления (БОУ) и преобразователь фаз (ПФ).

При этом алгоритм релейного регулирования статорного тока АД заключается в следующем [1,2]: во-первых, непрерывно контролируются (с помощью ДТ, ПФ, КП2) фактические текущие значения ортогональных проекций I_x и I_y обобщённого вектора статорного тока \bar{I} на оси вращающейся координатной системы "x-y" (связанной вещественной осью "x" с обобщённым вектором потока сцепления ротора двигателя). Во-

вторых, определяются (посредством ВО) отклонения $\Delta I_{1x}, \Delta I_{1y}$:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{1x} &= I_{1x}^* - I_x; \\ \Delta I_{1y} &= I_{1y}^* - I_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

указанных проекций I_x и I_y от их заданных значений I_{1x}^*, I_{1y}^* (соответствующих заданному обобщённому вектору \bar{I}_1^* основных гармоник статорного тока).

В-третьих, в зависимости от значения амплитуд указанных отклонений: либо сохраняются прежними состояния открытых и закрытых силовых ключей преобразователей с ШИМ (в том случае, когда амплитуды указанных отклонений проекций не выходят за пределы соответствующих токовых "коридоров" с шириной $\Delta I_{px}, \Delta I_{py}$:

$$\left. \begin{aligned} |\Delta I_{1x}| &< 0,5 \Delta I_{px}; \\ |\Delta I_{1y}| &= 0,5 \Delta I_{py} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

при регулировании проекций обобщённого вектора статорного тока в токовых "коридорах" [2] или когда отклонение ΔI заданной I_1^* и фактической I амплитуд обобщённого вектора статорного тока – не выходит за пределы токовой "трубки" с шириной ΔI_n :

$$\left. \begin{aligned} |\Delta I| &= |I_1^* - I| < 0,5 \Delta I_n; \\ I_1^* &= [(I_{1x}^*)^2 + (I_{1y}^*)^2]^{1/2}; \\ I &= (I_x^2 + I_y^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

при регулировании модуля I обобщённого вектора статорного тока в токовой "трубке" [1]).

При этом нахождение заданной I_1^* и фактической I амплитуд статорного тока и определение их отклонения ΔI из (3) осуществляются *ВО*, а запрет переключения силовых ключей ПЧ с ШИМ – в *БОУ*.

В том же случае, если нарушается хотя бы одно условие (при регулировании в токовых "коридорах") из (2) или первое соотношение (при регулировании в токовой "трубке") из (3) – изменяются задаваемые *БОУ* на рис.1 открытые и закрытые состояния силовых ключей преобразователей с ШИМ на новые, обеспечивающие регулирование намагничивающей проекции I_x обобщённого вектора статорного тока в пределах

$$I_{1x}^* - 0,5\Delta I_{\text{пх}} \leq I_x \leq I_{1x}^* + 0,5\Delta I_{\text{пх}} \quad (4)$$

и оптимальную по быстродействию обработку активной проекции I_x указанного вектора тока [2].

При этом нахождение необходимых новых открытых и закрытых состояний силовых ключей ПЧ с ШИМ осуществляется следующим образом: во-первых, рассчитываются посредством вычислителя ВВН (через сетевые напряжения U_d или U_A, U_B, U_C и текущие состояния силовых ключей ПЧ с ШИМ, обозначаемые условным номером m из [1]) ортогональные проекции $U_{m\alpha}, U_{m\beta}$ (на оси неподвижной относительно статора координатной системы " α - β ") обобщённых векторов выходного напряжения \bar{U}_m ПЧ с ШИМ. Во-вторых, через указанные значения проекций $U_{m\alpha}, U_{m\beta}$ и гармонических функций $\cos\Theta_\psi, \sin\Theta_\psi$ (от аргумента Θ_ψ обобщённого вектора потокосцепления ротора $\bar{\Psi}$) преобразователь *КПИ* определяет соответствующие значения проекций U_{mx}, U_{my} обобщённых векторов выходного напряжения ПЧ с ШИМ на оси вращающейся ортогональной координатной системы " x - y " (связанной осью " x " с обобщённым вектором потокосцепления ротора).

В-третьих, вычислителем *ВРН* находятся из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{mx} &= U_{mx} - kE_x + \omega_\psi L_\sigma I_y; \\ \Delta U_{my} &= U_{my} - kE_y - \omega_\psi L_\sigma I_x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ортогональные проекции $\Delta U_{mx}, \Delta U_{my}$ для всех результирующих обобщённых векторов напряжения $\Delta \bar{U}_m$ (которые могут создаваться от действия каждого m -го из всех N возможных обобщённых векторов напряжения \bar{U}_m на выходе

преобразователей частоты). При этом присутствие последних слагаемых в уравнениях системы (5) обусловлено упомянутым нахождением проекций $\Delta U_{mx}, \Delta U_{my}$ обобщённого результирующего вектора напряжения $\Delta \bar{U}_m$ из [1] во вращающейся с угловой частотой ω_ψ относительно статора координатной ортогональной системе " x - y " (ω_ψ – угловая частота вращения обобщённого вектора потокосцепления ротора; L_σ – суммарная индуктивность рассеяния двигателя; kE_x и kE_y – проекции на оси вращающейся координатной системы приведенного обобщённого вектора ЭДС ротора $k\bar{E}$ АД).

В-четвёртых, из рассчитанного массива указанных значений $\Delta U_{mx}, \Delta U_{my}$ (где $m = 1, 2, \dots, N$ – целое число) выбираются значения

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{mx}(m^*) &= \Delta U_{xn}; \\ \Delta U_{my}(m^*) &= \Delta U_{yn}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

которые на момент времени начала текущего n -го межкоммутационного интервала ПЧ с ШИМ отвечают условиям:

$$\left. \begin{aligned} \text{sign}(\Delta U_{xn}) &= \text{sign}(\Delta I_{1x}); \\ \text{sign}(\Delta U_{yn}) &= \text{sign}(\Delta I_{1y}); \\ |\Delta U_{yn}| &> |\Delta U_{my}(m \neq m^*)|, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

характеризуются условным из [1] номером m^* и задают (через систему управления преобразователем *СУП* на рис.1) новые состояния открытых и закрытых силовых ключей АИН-ШИМ или НПЧ-ШИМ, соответствующие оптимальному по быстродействию векторному регулированию статорного тока АД [2].

Во внешних (по отношению к токовому) контурах рассматриваемой САУ (рис.1) регулируются модуль Ψ потокосцепления ротора (с помощью автоматического регулятора потокосцепления РП) и скорость ω двигателя (с помощью автоматического регулятора скорости РС). Сигналы обратных отрицательных связей (по потокосцеплению $k_\text{п}\Psi$ и скорости $k_\omega\omega$ с соответствующими передаточными коэффициентами $k_\text{п}$ и k_ω) для указанных регуляторов вычисляются (через фазные статорные напряжения U_a, U_b и токи I_a, I_b , поступающие с выходов *ДН* и *ДТ*) в модели двигателя [5]. Последняя вычисляет также текущие значения: гармонических функций $\cos\Theta_\psi$ и $\sin\Theta_\psi$, угловой частоты ω_ψ и проекций kE_x, kE_y приведенного (к статору) обобщённого вектора ЭДС ротора $k\bar{E}$ двигателя, необхо-

димые для функционирования СВРТ. На практике возможно (вместо измерения датчиком ДН) вычисление фазных статорных напряжений АД через сетевые напряжения U_d или U_A, U_B, U_C и задаваемые состояния m^* открытых и закрытых силовых ключей ПЧ с ШИМ (тогда ДН не устанавливается).

Для уменьшения (ослабления) потокосцепления ротора АД в обратно пропорциональной зависимости от скорости $|\omega|$ во второй зоне управления (выше номинального значения скорости: $|\omega| > \omega_n$) служит блок двухзонного регулирования БДР. Последний выполнен в виде блоков: деления БД, выделения модуля БВМ и ограничения БО, фильтра Φ_n – и реализует на своём выходе следующие зависимости:

$$k_n \Psi^{**} = \begin{cases} k_n \Psi_n & \text{при } |\omega| \leq \omega_n; \\ k_n \Psi_{\min} \leq \frac{k_n \Psi_n}{|\omega|} \leq k_n \Psi_n & \text{при } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \quad (8)$$

где Ψ^{**} , Ψ_n и Ψ_{\min} – соответственно заданное, номинальное и минимальное значения модуля потокосцепления ротора; ω_n – номинальное значение скорости двигателя; фильтр Φ_n (с передаточной функцией $W_{\Phi_n}(p)$, рассчитанной позднее) служит для нормирования переходных процессов регулирования потокосцепления ротора.

Во вращающейся (ориентированной по полю) координатной системе "x-y" и с применением общепринятой для машин переменного тока системы относительных единиц [6] электромагнитные и механические процессы частотно-управляемого идеализированного АД при питании от АИН-ШИМ или НПЧ-ШИМ на произвольном n -м межкоммутационном интервале описываются (после перехода от неподвижной из [5] к вращающейся координатной системе с одновременным разложением всех участвующих обобщённых векторов на их соответствующие проекции на ортогональные оси x и y этой системы) следующими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} U_{xn}(t) &= R_s I_x + L_\sigma \frac{dI_x}{dt} - \omega_\Psi L_\sigma I_y + kE_x; \\ U_{yn}(t) &= R_s I_y + L_\sigma \frac{dI_y}{dt} + \omega_\Psi L_\sigma I_x + kE_y; \\ kR_r I_y &= (\omega_\Psi - \omega)\Psi; \quad L_m I_x = \Psi + T \frac{d\Psi}{dt}; \\ M &= k\Psi I_y; \quad M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где M и M_c – электромагнитный момент двигателя и момент статического сопротивления соответственно; R_s и R_r – активные сопротивления статора и ротора соответственно; L_m – индуктивность намагничивания АД; T и k – электромагнитная постоянная времени ротора и коэффициент связи ротора соответственно; J – приведённый (к валу двигателя) момент инерции привода; t – текущее время.

Значения $U_{xn}(t)$ и $U_{yn}(t)$ представляют собой проекции на оси x и y вращающейся координатной системы обобщённого вектора выходного напряжения $\bar{U}_n(t)$ преобразователя частоты (АИН-ШИМ или НПЧ-ШИМ), создаваемого на рассматриваемом n -м межкоммутационном интервале.

Перейдя из (5) к ортогональным проекциям $\Delta U_{xn}, \Delta U_{yn}$ результирующего обобщённого вектора напряжения $\Delta \bar{U}_n$ [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{xn} &= U_{xn}(t) - kE_x + \omega_\Psi L_\sigma I_y; \\ \Delta U_{yn} &= U_{yn}(t) - kE_y - \omega_\Psi L_\sigma I_x; \\ \Delta \bar{U}_n &= \bar{U}_n(t) - k\bar{E} - j\omega_\Psi L_\sigma \bar{I}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

преобразуем первые два уравнения из системы (9) к виду:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{xn} &= R_s I_x + L_\sigma \frac{dI_x}{dt} = R_s \left(I_x + T_\sigma \frac{dI_x}{dt} \right); \\ \Delta U_{yn} &= R_s I_y + L_\sigma \frac{dI_y}{dt} = R_s \left(I_y + T_\sigma \frac{dI_y}{dt} \right), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где

$$T_\sigma = L_\sigma / R_s \quad (12)$$

– электромагнитная постоянная времени рассеяния двигателя.

При высокочастотной ШИМ (частота переключения силовых ключей преобразователей не менее 3 кГц) с достаточной для инженерных расчётов точностью можно полагать неизменными проекции и значение результирующего обобщённого вектора в пределах каждого n -го межкоммутационного интервала [1, 2]:

$$\Delta U_{xn}, \quad \Delta U_{yn}, \quad \Delta \bar{U}_n = \text{const} \quad (13)$$

(например, равными их соответствующим значениям в начале данного межкоммутационного интервала).

В структурной схеме на рис.2 для рассматриваемых электроприводов с АИН-ШИМ и НПЧ-

ного тока двигателя, соответствующая созданию значения M_c момента статического сопротивления.

Автоматические регуляторы (с регулированием по отклонению) потокоцепления и скорости, обозначенные на рис.2 передаточными функциями $W_{р.п}(p)$ и $W_{р.с}(p)$ соответственно, и установленные на их задающих входах фильтры (с передаточными функциями $W_{ф.п}(p)$ и $W_{ф.с}(p)$ соответственно) служат для формирования заданного (нормированного) качества статических характеристик и переходных электромеханических процессов привода. При этом выходные сигналы этих регуляторов прямо пропорциональны (с коэффициентом k_T) заданным значениям

основных составляющих I_{1x}^* , I_{1y}^* проекций статорного тока АД (которые в установившихся режимах задают собой положения середин токовых "коридоров" для регулируемых проекций I_x и I_y статорного тока). Ограничением максимальных абсолютных значений выходных сигналов

этих регуляторов: $k_T |I_{1x}^*| \leq k_T I_{\text{хм}}$ и $k_T |I_{1y}^*| \leq k_T I_{\text{ym}}$ достигается следующий режим токоограничения электропривода:

$$I \leq [(I_{\text{хм}} + 0,5\Delta I_{\text{пх}})^2 + (I_{\text{ym}} + 0,5\Delta I_{\text{пу}})^2]^{1/2} \quad (17)$$

при регулировании в токовых "коридорах" или

$$I \leq [(I_{\text{хм}})^2 + (I_{\text{ym}})^2]^{1/2} + 0,5\Delta I_{\text{п}} \quad (18)$$

при регулировании в токовой "трубке" [1] (I – амплитуда обобщённого вектора статорного тока, равная, как известно, амплитудам фазных статорных токов двигателя).

Найдём передаточные функции $G_{\text{тх}}(p)$, $G_{\text{ты}}(p)$ замкнутых контуров регулирования проекций I_x , I_y статорного тока:

$$\left. \begin{aligned} G_{\text{тх}}(p) &= \frac{K_x / R_s (T_{\sigma} p + 1)}{1 + k_T K_x / R_s (T_{\sigma} p + 1)} = \frac{1/k_{\text{тх}}}{T_{\text{тх}} p + 1}; \\ G_{\text{ты}}(p) &= \frac{K_y / R_s (T_{\sigma} p + 1)}{1 + k_T K_y / R_s (T_{\sigma} p + 1)} = \frac{1/k_{\text{ты}}}{T_{\text{ты}} p + 1} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

в которых передаточные коэффициенты $1/k_{\text{тх}}$, $1/k_{\text{ты}}$ и эквивалентные постоянные времени $T_{\text{тх}}$, $T_{\text{ты}}$ каналов регулирования проекций I_x и I_y статорного тока находятся из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} 1/k_{\text{тх}} &= 1/k_T (1 + 1/a); \\ 1/k_{\text{ты}} &= 1/k_T (1 + 1/\epsilon); \\ T_{\text{тх}} &= T_{\sigma} / (a + 1); \quad T_{\text{ты}} = T_{\sigma} / (\epsilon + 1). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В (20) a , ϵ – переменные коэффициенты,

$$\left. \begin{aligned} a &= k_T K_x / R_s = \Delta U_{\text{хн}} / R_s \Delta I_x; \\ \epsilon &= k_T K_y / R_s = \Delta U_{\text{yn}} / R_s \Delta I_y. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Анализ формул (19)–(21) свидетельствует о том, что в стационарных режимах работы рассматриваемых электроприводов (характеризуемых малыми отклонениями: $|\Delta I_x| \leq \Delta I_{\text{пх}}$, $|\Delta I_y| \leq \Delta I_{\text{пу}}$ и $|\Delta I| \leq 0,5\Delta I_{\text{п}}$, где $\Delta I_{\text{пх}}$, $\Delta I_{\text{пу}}$, $\Delta I_{\text{п}} \leq 0,1$ о.е. – ширина токовых "коридоров" и "трубки" [1,2]) коэффициенты a и ϵ могут принимать большие значения (более 100–1000). Следовательно, при этом результирующие коэффициенты усиления замкнутых каналов регулирования проекций I_x и I_y статорного тока ($1/k_{\text{тх}}$ и $1/k_{\text{ты}}$ соответственно) практически приближаются к значению $1/k_T$. Вместе с этим эквивалентные постоянные времени $T_{\text{тх}}$ и $T_{\text{ты}}$ каналов регулирования проекций статорного тока становятся существенно ниже электромагнитной постоянной времени рассеяния T_{σ} двигателя (составляющей на практике от 5 до 50 мс и более для общепромышленных АД мощностью свыше 1 кВт, где малые значения T_{σ} относятся к малым мощностям двигателей, а большие значения – к мощностям общепромышленных АД свыше 100 кВт).

И, наоборот, при малых значениях проекций $\Delta U_{\text{хн}}$, ΔU_{yn} результирующего вектора напряжения (например, для двигательного режима и высоких скоростей АД) и при больших отклонениях ΔI_x , ΔI_y проекций статорного тока (например, из-за быстрых и больших изменений сигналов задания I_x^* , I_y^* в динамических режимах привода) эквивалентные постоянные времени $T_{\text{тх}}$ и $T_{\text{ты}}$ замкнутых токовых каналов увеличиваются (приближаясь к значению T_{σ}), а результирующие коэффициенты усиления $1/k_{\text{тх}}$ и $1/k_{\text{ты}}$ токовых каналов при этом уменьшаются – до соответствующих значений из (20).

Отметим следующие особенности структурной схемы САУ, приведённой на рис.2:

1. Передаточные функции $G_{\text{тх}}(p)$ и $G_{\text{ты}}(p)$ замкнутых контуров регулирования проекций I_x и I_y статорного тока в общем случае численно различаются и характеризуются варьируемыми значениями коэффициентов усиления $1/k_{\text{тх}}$, $1/k_{\text{ты}}$ и эквивалентных постоянных времени $T_{\text{тх}}$, $T_{\text{ты}}$ как на различных межкоммутационных интервалах (в функции соответствующих значений проекций $\Delta U_{\text{хн}}$ и ΔU_{yn} результирующего обобщённого вектора напряжения), так и в пределах одного данного n -го межкоммутационного интервала (в

функции значений текущих отклонений ΔI_x и ΔI_y проекций статорного тока).

2. При функционировании рассмотренных электроприводов при изменении значения модуля Ψ обобщённого вектора потокосцепления ротора прямо пропорционально изменяется передаточный коэффициент звена скорости.

3. Не учитывается временно́е запаздывание, вносимое датчиками проекций статорного тока (что на практике справедливо при применении в электроприводах с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ быстродействующих датчиков тока, например, производства фирмы LEM, для которых указанное запаздывание не превышает 1 мкс).

4. Вследствие же фактических значительных временно́ых запаздываний (составляющих от десятых долей до единиц миллисекунд), вносимых датчиками потокосцепления (при вычислении модуля потокосцепления ротора двигателя) и скорости (из-за необходимости фильтрации выходного сигнала электромашиных или импульсных датчиков скорости) в структурной схеме САУ на рис.2 осуществляется учёт указанных запаздываний. Это выполнено путём введения в цепи отрицательных обратных связей по потокосцеплению и скорости (со статическими коэффициентами передачи указанных датчиков, равными k_n и k_c соответственно) инерционных звеньев (фильтров) со значениями постоянных времени $T_{\phi.n}$ и $T_{\phi.c}$.

5. Принимая во внимание, что согласно (15) в исходной структурной схеме на рис.2 сигналы ξ_{xn}/p и ξ_{yn}/p учитывают воздействия (соответственно на модуль потокосцепления Ψ и скорость ω) лишь высокочастотной модуляционной составляющей \bar{I}_n обобщённого вектора статор-

ного тока, во всех дальнейших структурных преобразованиях и расчётах регуляторов САУ (по управлению и возмущению) будем полагать: $\xi_{xn} = 0$ и $\xi_{yn} = 0$. Последнее означает, что при синтезе регуляторов (потокосцепления и скорости) САУ электропривода ограничимся исключительно лишь рассмотрением интересующего на практике воздействия выходных сигналов указанных регуляторов на основные составляющие потокосцепления ротора и электромагнитного момента двигателя (которые создаются, как известно из [1], именно основной составляющей \bar{I}_1 обобщённого вектора статорного тока \bar{I} , задаваемой в САУ с помощью соответствующих ортогональных проекций: I_{lx}^* , I_{ly}^*).

С учётом этого путём эквивалентных преобразований из теории автоматического управления приведём (внеся инерционности датчиков потокосцепления и скорости в прямые каналы регулирования) структурную схему на рис.2 к виду, представленному на рис.3. Для полной компенсации воздействия форсирующих звеньев $(T_{\phi.n}p + 1)$ и $(T_{\phi.c}p + 1)$ выберем передаточные функции $W_{\phi.n}(p)$ и $W_{\phi.c}(p)$ [7] фильтров, установленных на задающих входах контуров потокосцепления и скорости

$$\left. \begin{aligned} W_{\phi.n}(p) &= \frac{1}{T_{\phi.n}p + 1}; \\ W_{\phi.c}(p) &= \frac{1}{T_{\phi.c}p + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Далее методами подчинённого регулирования [8] из структурной схемы САУ на рис.3 про-

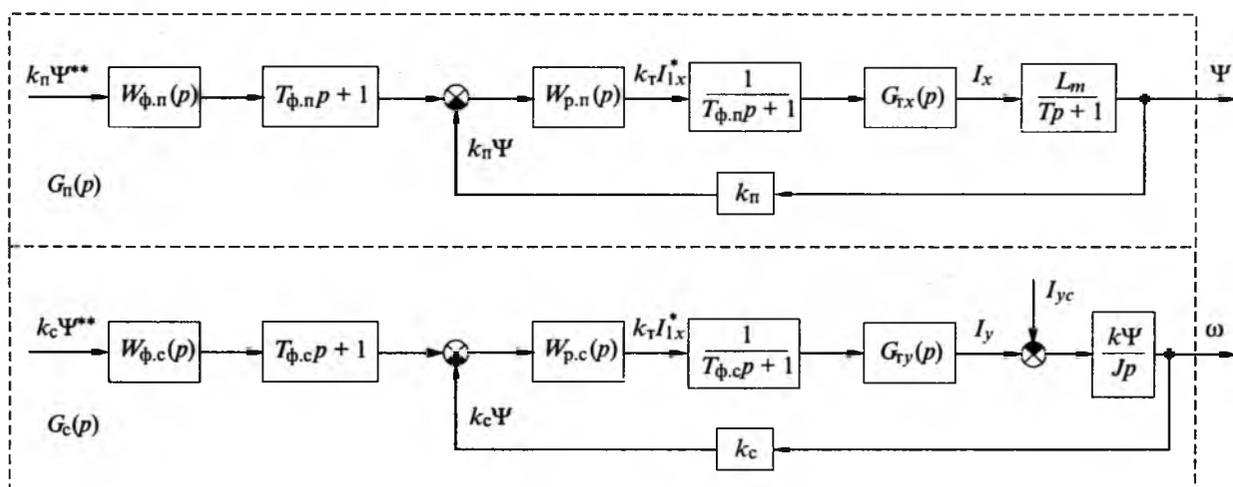


Рис.3

изведём расчёт автоматических регуляторов. В частности, задавшись желаемой передаточной функцией разомкнутого контура регулирования потокосцепления ротора, соответствующей настройке на модульный оптимум (МО):

$$W_{ж.п}^{MO}(p) = \frac{1}{2T_{\mu\pi}p(T_{\mu\pi}p + 1)}, \quad (23)$$

рассчитаем пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор потокосцепления:

$$W_{р.п}^{MO} = \frac{Tp + 1}{2T_{\mu\pi}p \left(\frac{L_m k_{\pi}}{k_{тх}} \right) p}, \quad (24)$$

в котором малая (некомпенсируемая) постоянная времени $T_{\mu\pi}$ контура потокосцепления находится в виде:

$$T_{\mu\pi} = T_{ф.п} + T_{тх}. \quad (25)$$

Аналогично, задавшись желаемыми передаточными функциями разомкнутого контура регулирования скорости по управлению (при $M_c = I_{сy} = 0$) для настроек на МО и симметричный оптимум (СО):

$$\left. \begin{aligned} W_{ж.с}^{MO}(p) &= \frac{1}{2T_{\mu c}p(T_{\mu c}p + 1)}; \\ W_{ж.с}^{CO}(p) &= \frac{4T_{\mu c}p + 1}{8T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c}p + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

рассчитаем передаточные функции пропорционального (П) регулятора скорости с настройкой на МО

$$W_{р.с}^{MO}(p) = \frac{Jk_{тy}}{2T_{\mu c}k_c k\psi} \quad (27)$$

и пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора скорости с настройкой на СО

$$W_{р.с}^{CO}(p) = \frac{4T_{\mu c}p + 1}{\left(\frac{8T_{\mu c}^2 k_c k\psi}{Jk_{тy}} \right) p}, \quad (28)$$

где эквивалентная малая (некомпенсируемая) постоянная времени $T_{\mu c}$ контура скорости принимается равной:

$$T_{\mu c} = T_{ф.с} + T_{тy}. \quad (29)$$

Передаточные функции соответствующих замкнутых контуров регулирования потокосцепления $G_{\pi}^{MO}(p)$ и скорости $G_c^{MO}(p)$ или $G_c^{CO}(p)$ по управлению для настроек на МО или СО с

рассчитанными автоматическими регуляторами имеют стандартный для систем подчинённого регулирования вид функций Боттерворта второго и третьего порядков [8]:

$$\left. \begin{aligned} G_{\pi}^{MO}(p) &= \frac{1/k_{\pi}}{2T_{\mu\pi}^2 p^2 + 2T_{\mu\pi}p + 1}; \\ G_c^{MO}(p) &= \frac{1/k_c}{2T_{\mu c}^2 p^2 + 2T_{\mu c}p + 1}; \\ G_c^{CO}(p) &= \frac{1/k_c}{8T_{\mu c}^3 p^3 + 8T_{\mu c}^2 p^2 + 4T_{\mu c}^2 p^2 + 1} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

характеризующих нормированный характер протекания электромеханических процессов рассматриваемых приводов (зависящий лишь по быстродействию от значений эквивалентных малых постоянных времени $T_{\mu\pi}$ и $T_{\mu c}$ указанных контуров). При этом приведённые передаточные функции (30) учитывают установку на задающих входах контуров потокосцепления и скорости (с настройкой на МО) инерционных звеньев из (22), а для контура скорости с настройкой на СО – фильтра с передаточной функцией вида [7]:

$$\begin{aligned} W_{ф.с}(p) &= \frac{1}{(4T_{\mu c}p + 1)(T_{ф.с}p + 1)} \approx \\ &\approx \frac{1}{(4T_{\mu c} + T_{ф.с})p + 1}. \end{aligned} \quad (31)$$

Переходные процессы САУ скорости при ступенчатом возмущении по нагрузке имеют также нормированный известный вид [8] и рассчитываются с помощью эквивалентных (преобразованных из рис.3 путём приведения возмущающего воздействия $I_{yc}(p)$ ко входу регулятора скорости) структурных схем на рис.4 (для настроек: рис.4,а – на МО, рис.4,б – на СО) из следующих соотношений соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega^{MO}(p) &= -\frac{I_{yc}}{p} \frac{G_c^{MO}(p) (T_{ф.с}p + 1)}{W_{р.с}^{MO}(p) G_{тy}(p)} = \\ &= -\frac{I_{yc}}{p} \frac{2T_{\mu c}k\psi(T_{\mu c}p + 1)}{J(2T_{\mu c}^2 p^2 + 2T_{\mu c}p + 1)}; \\ \Delta\omega^{CO}(p) &= -\frac{I_{yc}}{p} \frac{G_c^{CO}(p) (T_{ф.с}p + 1)(4T_{\mu c}p + 1)}{W_{р.с}^{CO}(p) G_{тy}(p)} = \\ &= -I_{yc} \frac{8T_{\mu c}^2 k\psi(T_{\mu c}p + 1)}{J(8T_{\mu c}^3 p^3 + 8T_{\mu c}^2 p^2 + 4T_{\mu c}p + 1)}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

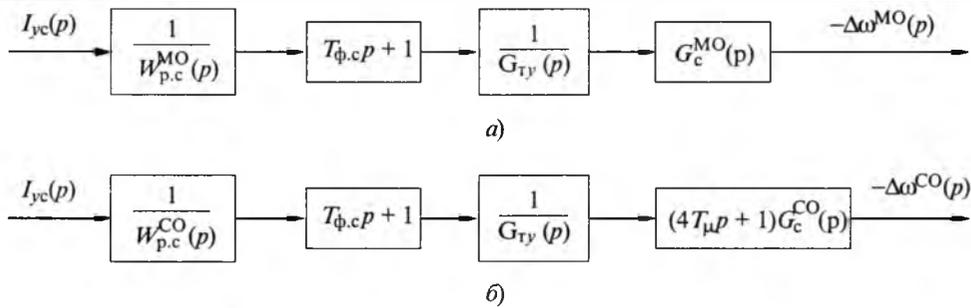


Рис.4

Установившиеся (статические) значения ошибки по скорости при возмущении по нагрузке находятся для настроек по МО и СО из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega_{уст}^{MO} &= \lim_{p \rightarrow 0} [p\Delta\omega^{MO}(p)] = \\ &= -\frac{2T_{\mu c} k_{\Psi}}{J} I_{cy} = -\frac{2T_{\mu c}}{J} M_c; \\ \Delta\omega_{уст}^{CO} &= \lim_{p \rightarrow 0} [p\Delta\omega^{CO}(p)] = 0. \end{aligned} \right\} (33)$$

Аналогично электроприводам постоянного тока с подчиненным регулированием [8] при возмущении по нагрузке настройке контура скорости рассматриваемых частотно-управляемых асинхронных электроприводов на СО соответствует нулевое значение статической ошибки, а настройке на МО – ненулевые значения указанной ошибки $\Delta\omega_{уст}^{MO}$.

Из анализа полученных передаточных функций (24), (27) и (28) для регуляторов потокосцепления и скорости следует (принимая во внимание возможное варьирование передаточных коэффициентов $k_{\tau x}$, $k_{\tau y}$ и постоянных времени $T_{\tau x}$, $T_{\tau y}$ каналов регулирования тока), что для формирования нормированных процессов регулирования потокосцепления и скорости в произвольных динамических режимах электропривода требуется реализация указанных регуляторов адаптивными (т.е. с переменными значениями параметров их передаточных функций). В тоже время, для обеспечения в стационарных режимах устойчивого функционирования рассматриваемых электроприводов, с учётом ранее отмеченных особенностей таких режимов:

$$k_{\tau x} \approx k_{\tau y} \approx k_{\tau}; \quad T_{\tau x} \approx T_{\tau y} \approx 0, \quad (34)$$

достаточно реализовать на практике автоматические регуляторы с передаточными функциями (24), (27) и (28) с неизменными параметрами, со-

ответствующими условию (34) и вытекающим из него соотношениям:

$$T_{\mu п} = T_{\phi, п}, \quad T_{\mu c} = T_{\phi, c}. \quad (35)$$

Последнее позволяет, очевидно, в существенной степени упростить (технически или программно) указанные автоматические регуляторы (которые в этом случае характеризуются неизменными параметрами передаточных функций) при одновременном достижении гарантированного устойчивого функционирования электроприводов в стационарных режимах, а вместе с тем, значительной степени приблизить к нормированным протекающие переходные электрохимические процессы в электроприводах (по управлению и возмущению).

Для рассматриваемого релейного частотно-токового управления, характеризуемого зависимостями (1)–(8), посредством цифровых моделей асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ исследованы стационарные и динамические режимы с рассчитанными автоматическими регуляторами. Указанные модели основаны на идеализированном представлении АД из [5] (описываемого в неподвижной относительно статора координатной системе с использованием общепринятой системы относительных единиц и уравнения движения привода из [6]) и учитывают фактическую дискретность рассматриваемых ПЧ с ШИМ соответствующими значениями обобщённых векторов выходного напряжения из [1] на текущих межкоммутационных интервалах (при идеальном представлении силовых ключей). Расчёты производились методом Рунге-Кутты с неизменным временным шагом дискретности расчёта $\Delta t(i) = 10 \text{ мкс}$ для электродвигателя АО2-51-6 мощностью 5,5 кВт ($J = 0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 = 21,6 \text{ о.е.}$). При расчётах полагались неизменными параметры, отвечающие условиям (34) и (35), передаточных функций (24) и (28) регуляторов потокосцепления и скорости, а также фильтров из (22) и (31); задавалось

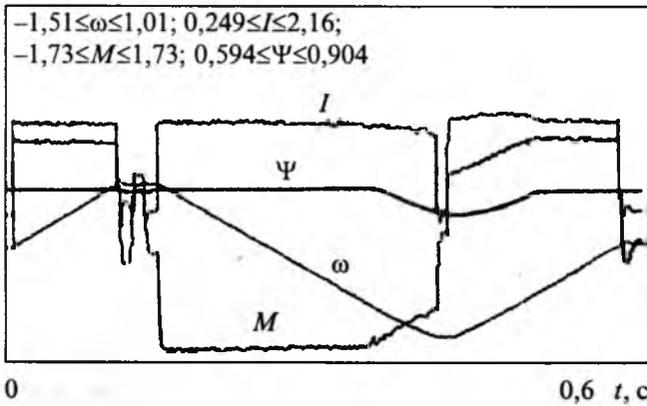


Рис.5

управление потокосцеплением ротора АД согласно зависимостям (8). Передаточные коэффициенты k_T , k_n и k_c датчиков тока, потокосцепления и скорости в расчётах принимались равными единице, а постоянные времени $T_{ф.п}$ и $T_{ф.с}$ двух последних из перечисленных датчиков – равными 1 мс.

На рис.5 приведены рассчитанные на данной цифровой модели (при настройке контура скорости на СО и для значений токовых "коридоров": $\Delta I_{пх} = \Delta I_{пу} = 0,1$ о.е.) переходные процессы режимов: разгона, наброса и сброса номинальной нагрузки ($M_c = M_n = 0,8$ о.е.), реверса и торможения рассматриваемых асинхронных электроприводов с релейным частотно-токовым управлением и функциональной схемой по рис.1. В верхнем левом углу на рис.5 показаны (в относительных единицах) пределы изменения рассчитываемых параметров: скорости ω , модуля статорного тока I , электромагнитного момента M и потокосцепления ротора Ψ двигателя.

Выполненные исследования автоматических регуляторов (с неизменными параметрами) в составе моделей асинхронных электроприводов с АИН-ШИМ и НПЧ-ШИМ свидетельствуют о хорошем совпадении:

- статических механических характеристик с рассчитанными по (33);
 - относительное отклонение менее 1%;
 - переходных процессов регулирования потокосцепления и скорости с известными стандартными процессами систем подчинённого регулирования;
 - относительное отклонение не более 5–10%.
- По статическим и динамическим свойствам рассмотренная САУ скоростью полностью отвечает требованиям, предъявляемым к большинству существующих общепромышленных автоматизированных электроприводов широкого назначения (с диапазонами регулирования скорости не ниже 1:100 и не выше 1,5:1 вверх от номинальной).

Список литературы

1. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и регулирование асинхронных частотно управляемых электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // Электротехника. 2002. №1. С.2–10.
2. Волков А.В. Оптимальное по быстродействию векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией // Электротехника. 2003. №12. С.34–42.
3. Изосимов Д.Б., Козаченко В.Ф. Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока // Электротехника. 1999. №4. С.41–51.
4. Дацковский Л.Х., Роговой В.И., Абрамов В.И. и др. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) // Электротехника. 1996. №10. С.18–28.
5. Волков А.В. Идентификация потокосцепления ротора частотно-регулируемого асинхронного двигателя // Электротехника. 2002. №6. С.40–46.
6. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев: Штиинца, 1982.
7. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1988.
8. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии. М.: Металлургия, 1977.

ПОПРАВКА

В статье Бургина Б.Ш. "Использование синтезированной ДЭМС стабилизации скорости для управления четырёхмассовой электромеханической системой", опубликованной в журнале "Электротехника" № 11 за 2004 г., на рис.1 (с. 25) во втором звене структуры

вместо $\frac{1}{1 + \tau_7 p_*$ должно быть записано $\frac{1}{\tau_7 p_*$.

Автор приносит свои извинения.

Трёхфазные бесконтактные моментные индукторные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем¹

ЕПИФАНОВ О.К., САЛОВА И.А., ХРУЩЕВ В.В.

Приводятся результаты теоретических исследований и анализа принципов построения, моментных характеристик и геометрии воздушного зазора. На основе расчётных моделей вариантов двигателей определены условия и рекомендации по достижению максимальных значений вращающих моментов и минимизации их пульсаций от угла поворота ротора. Результаты аналитических расчётов подтверждены численными характеристиками, полученными при моделировании конструкций двигателей методом конечных элементов.

Results of theoretical investigation and analysis of design principals, torque characteristics and geometry of the air gap are given. Conditions and recommendations on attaining maximum values of torques and minimization of their pulsations when the rotor rotates have been determined on the basis of designed models for versions of the motors. Results of the analytical calculations have been confirmed by numerical characteristics obtained in simulation of the motors designs by the finiteelement method.

Благодаря интенсивному развитию и миниатюризации микроэлектроники и вычислительной техники наряду с достижениями в области теории и практики оптимального управления электроприводами интенсивно проводятся исследования по совершенствованию и поиску новых вариантов принципиально-конструктивного построения бесконтактных моментных двигателей постоянного тока (БДПТ) для безредукторных следящих систем, управляемых цифровыми электронными устройствами [1–16]. Многовариантность принципиально-конструктивного и технологического построения БДПТ обусловлена в общем случае следующими основными факторами:

– возможностью выполнения практически любого способа и алгоритма управления, особенно цифровыми устройствами (контроллерами) [3, 4, 8, 9, 12–14];

– стремлением разработать наиболее оптимальный и лучший по технико-эксплуатационным и экономическим показателям управляемый электропривод для конкретных технических задач и областей применения [1, 2, 4–9, 11–13].

Из многообразия видов БДПТ малой и средней мощности в настоящее время интенсивно развиваются и совершенствуются два типа БДПТ: с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) и с самовозбуждением, обладающие электромагнитной редукцией частоты вращения ротора [1, 3, 4, 7–11, 13].

К первому типу БДПТ относятся в общем случае два вида электродвигателей с m -фазными обмотками управления: с ПМ в воздушном зазоре (БДПТ-П) [2, 5, 6] и с ПМ в магнитопроводе ротора или статора (БДПТ-М) [1–3, 15, 16]. Ко второму типу БДПТ относятся вентильные индукторно-реактивные двигатели (ВИРД) [4, 7–

9, 11, 13] с m -фазными обмотками самовозбуждения – управления. Следует отметить, что БДПТ-М и ВИРД относятся к классу индукторных двигателей постоянного тока. Одним из смешанных и перспективных вариантов построения БДПТ являются индукторные m -фазные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем (БДПТ-Н), содержащие m -фазную обмотку управления и подмагничивающую обмотку возбуждения или ПМ (или то и другое вместе) [2, 10, 15, 16].

Указанные типы БДПТ по своему конструктивно-технологическому построению идентичны, а по удельным технико-эксплуатационным характеристикам БДПТ-П и БДПТ-М занимают в настоящее время лидирующие позиции [1, 2, 4–9]. Вместе с тем, вопросам теории построения и разработки конструкций ВИРД уделяется в настоящее время большое внимание, а исследованиям БДПТ-Н – внимание весьма незначительное. Поэтому восполнение имеющегося отставания в теории БДПТ-Н и определение возможностей их дальнейшего развития как в части их потенциально-конкурентных способностей относительно двигателей типа ВИРД, так и в части возможностей достижения уровня характеристик БДПТ-П и БДПТ-М является актуальной задачей. В первую очередь имеем в виду преодоление основных недостатков присущих ВИРД, к которым относятся [4, 7–9, 11–14, 17]:

– высокие электрические и магнитные потери, приводящие к существенному снижению удельных энергетических характеристик и предельному тепловому режиму в условиях отсутствия принудительного охлаждения и, как след-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

стве, к снижению показателей надёжности и долговечности;

– высокие значения пульсаций пускового и вращающего моментов при сопоставимом уровне развиваемых моментов и работе ВИРД в составе управляемого моментного безредукторного электропривода;

– возникающие ограничения при выполнении плоских конструкций, приводящие к снижению энергетических и функциональных характеристик;

– сложная архитектура программной и аппаратной реализации контроллеров управления.

Принципиальное конструктивное построение БДПТ-Н

1. ВДПТ-Н с электромагнитным возбуждением. Принципиальная конструктивная схема БДПТ-Н с электромагнитным возбуждением (ЭВ) [2, 10] изображена на рис.1. Магнитная система статора состоит из $2k_1$ групп полюсов по три полюса в каждой. На полюсах выполнены Z_1 зубцов. На роторе имеется Z_2 зубцов, равномерно расположенных по окружности. Зубцовые деления на полюсах статора и роторе одинаковы $t_{zs} = t_{zr} = t_z$. В пределах группы полюса смещены друг относительно друга по воздушному зазору на $\mp t_z/3$, где знак минус соответствует сближению полюсов, а знак плюс – их раздвижению. Группы полюсов смещены друг относительно друга на $t_z n_1/2$ (n_1 – целое число) с целью образования паза для размещения обмотки возбуждения (ОВ), создающей постоянное подмагничивание. Толщина зубцов на полюсах b_{z1} и роторе b_{z2} выбирается из условия получения максимально приближенной к синусоидальной зависимости магнитной проводимости воздушного зазора под полюсом от угла поворота ротора $Z_2\alpha$: $b_{z1} = k_{z1}t_z$; $b_{z2} = k_{z2}t_z$. Ширина шлица между полюсами равна $b_{ш} = (1 - k_{z1} \mp 1/3)t_z$, а расстояние между группами полюсов $b_{ш1} = b_{ш} + t_z n_1/2$. Между Z_1, Z_2 , числом n_1 и числом по-

люсов p при $k_1 = p/6$ существует соотношение:

$$Z_2 = k_1(6z_1 + n_1 \mp 2). \quad (1)$$

На полюсах статора размещены обмотки управления (ОУ), образующие при их последовательном соединении фазы двигателя $k = 0, 1, 2$. Если n_1 – нечётное число, то фазные катушки в соседних группах включены согласно и $F_{k+3} = F_k$, где F_k – МДС катушки с током управления. При n_1 – чётном числе фазные катушки соединены встречно и $F_{k+3} = -F_k$. На рис.1 МДС катушек приняты положительными, если они направлены от статора к ротору. Магнитные проводимости воздушного зазора под полюсами статора с учётом постоянной составляющей λ_0 и первой гармоники λ_1 магнитной проводимости (МП) воздушного зазора равны:

$$\left. \begin{aligned} \lambda'_k &= \lambda_0 + \lambda_1 \cos(Z_2\alpha - \alpha_k); \\ \alpha_k &= \mp(k-1)2\pi/3, \quad n_1 - \text{чётное}; \\ \lambda'_k &= \lambda_0 \pm \lambda_1 \cos(Z_2\alpha - \alpha_k); \quad n_1 - \text{нечётное}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При n_1 – нечётное знак плюс перед λ_1 относится к полюсам с номерами $k = 0, 1, 2, 6, 7, 8, \dots$, а знак минус – к полюсам с номерами $3, 4, 5, 9, 10, 11 \dots$. Как показано в [10], пусковой момент двигателя при $i_k = -I_m \sin(Z_2\alpha - \alpha_k)$

$$M = M_{п} + M_{\text{пульс}}; \quad M_{п} = \frac{p}{2} \Phi_m^n \frac{\lambda_1}{\lambda_0} Z_2 I_m w_k;$$

$$M_{\text{пульс}} = -\frac{p}{12} \sum_0^5 i_k^2 w_k^2 \frac{d\lambda'_k}{d\alpha},$$

где $M_{п}$ – пусковой момент от взаимодействия магнитного поля ОВ и токов в фазах; w_k – число витков в катушке фазы; $\Phi_m^n = i_0 w_0 \lambda_0$ – постоянная составляющая магнитного потока полюса от ОВ; $i_0 w_0$ – ток и число витков ОВ; $M_{\text{пульс}}$ – пульсирующий момент, обусловленный зависимостью λ'_k от α .

Подставляя (2) в выражение для $M_{\text{пульс}}$ и учитывая, что $i_{k+3} = i_k$, получаем при n_1 – чётном

$$M_{\text{пульс}} = -\frac{p}{6} I_m^2 w_k^2 \lambda_1 Z_2 \sum_{k=0}^2 \sin^3(Z_2\alpha - \alpha_k),$$

но

$$\sin^3(Z_2\alpha - \alpha_k) = \frac{1}{4} [3 \sin(Z_2\alpha - \alpha_k) - \sin 3(Z_2\alpha - \alpha_k)], \quad \text{поэтому}$$

$$\sum_{k=0}^2 \sin^3(Z_2\alpha - \alpha_k) = -\frac{3}{4} \sin 3Z_2\alpha \quad \text{и, следовательно,}$$

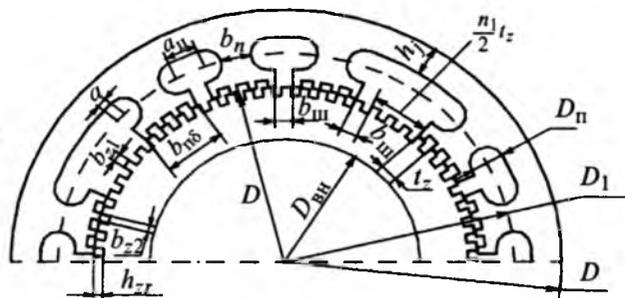


Рис.1. Принципиальная конструктивная схема БДПТ-Н

$$M_{\text{пульс}} = \frac{p}{8} I_m^2 w_k^2 \lambda_1 Z_2 \sin 3Z_2 \alpha =$$

$$= \frac{p}{8} \left(\frac{S_y k_{3.п} j_y}{2} \right)^2 \lambda_1 Z_2 \sin 3Z_2 \alpha;$$

а при n_1 – нечётном:

$$\sum_0^5 i_k^2 \frac{d\lambda'_k}{d\alpha} = \sum_0^2 i_k^2 [-\lambda_1 Z_2 \sin(Z_2 \alpha - \alpha_k) +$$

$$+ \lambda_1 Z_2 \sin(Z_2 \alpha - \alpha_k)] = 0$$

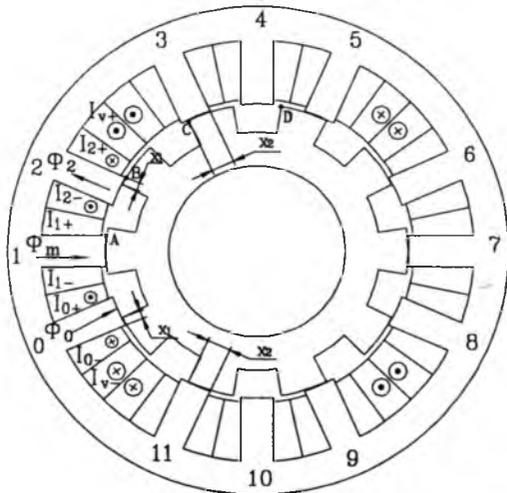
и, следовательно, $M_{\text{пульс}} = 0$.

2. Варианты построения БДПТ-Н с подмагничиванием. Далее, для упрощения будем рассматривать частные случаи БДПТ-Н без зубцов на полюсах ($Z_1 = 1$). Из выражения (1) следует, что при $n_1 = 1$:

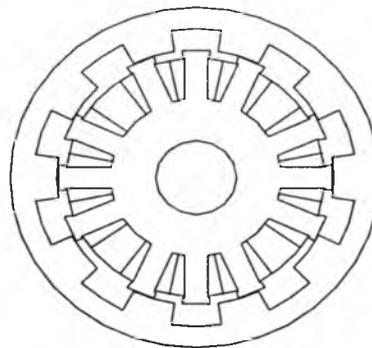
$$Z_2 = k_1(6 + 1 \mp 2) = \begin{cases} 5k_1 - \text{при сближении полюсов;} \\ 9k_1 - \text{при раздвижении полюсов;} \end{cases}$$

тогда

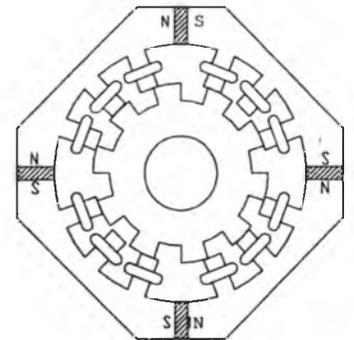
$$\frac{p}{Z_2} = \frac{6}{5}; \quad \frac{6}{9}. \tag{3}$$



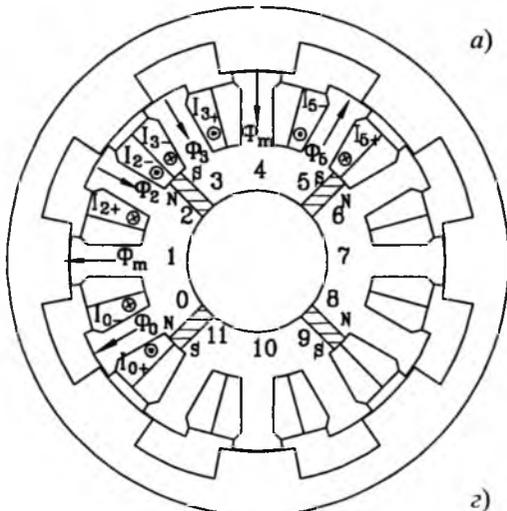
а)



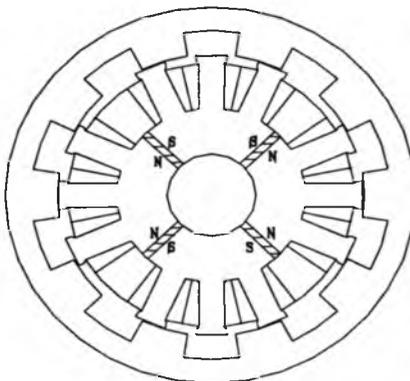
б)



в)



з)



д)

Для соотношений (3) принципиальные конструктивные схемы такого двигателя [рис.2,а и б (прямая и обращенная конструкции)] будут соответствовать классу БДПТ-Н типа ВИРД при $k_1 = 2$ и $n_1 = 1$, но с подмагничиванием от ОВ.

Аналогично для $n_1 = 0$:

$$Z_2 = k_1(6 \mp 2) = \begin{cases} 4k_1 - \text{при сближении полюсов;} \\ 8k_1 - \text{при раздвижении полюсов;} \end{cases}$$

тогда

$$\frac{p}{Z_2} = \frac{6}{4}; \quad \frac{6}{8}. \tag{4}$$

БДПТ-Н при $n_1 = 0$ не имеет паза под ОВ и его реализация возможна только при наличии подмагничивания от ПМ (БДПТ-НПМ). В [15,16] приведены схемы таких двигателей, у которых их ПМ расположены на магнитопроводах статора прямоугольной формы (рис.2,в). В варианте обращенной конструкции такая схема двигателя представлена на рис.2,г. В БДПТ-Н при $n_1 = 1$ (рис.2,д) постоянное магнитное поле может создаваться либо только от ПМ, либо от ОВ и ПМ. Такой БДПТ-Н является многовариантным двигателем (БДПТ-НПМОВ). На рис.2,а и з за положительное направление магнитного потока от тока в фазных катушках принято направление от статора к ротору.

Рис.2. Варианты принципиально-конструктивных схем БДПТ-Н с подмагничиванием: а, б – типа ВИРД; в, г – БДПТ-НПМ; б, г – обращенные; д – БДПТ-НПМОВ

Моментные характеристики БДПТ-Н

1. Условия отсутствия остаточного момента.

Одним из основных требований к магнитным системам БДПТ является отсутствие остаточного момента, обусловленного асимметрией воздушного зазора при нулевых токах в обмотках управления. Достижение симметрии воздушного зазора сводится к условию равенства площадей воздушного зазора под группами полюсов. Из рис.2 следует, что:

$$k_{z1}t_z + 2x_1 = 2x_2. \quad (5)$$

Значение x_1 можно найти из отрезка AB (см. рис.2,а):

$$(1 - k_{z1} - \frac{1}{3} + k_{z1}) t_z = \frac{k_{z2} - k_{z1}}{2} t_z + (1 - k_{z2}) t_z + x_1,$$

а x_2 – из отрезка CD :

$$t_z = x_2 + (1 - k_{z1} - \frac{1}{3} + k_{z1}) t_z + \frac{1 - k_{z2} - k_{z1}}{2} t_z.$$

При $k_{z2} = 1/2$

$$x_1 = \frac{1}{2} \left(k_{z1} - \frac{1}{6} \right) t_z; \quad x_2 = \frac{1}{2} \left(k_{z1} + \frac{1}{6} \right) t_z. \text{ Под-}$$

становка этих выражений в уравнение (5) дает значение $k_{z1} = 1/3$. Площадь перекрытия по воздушному зазору под группой полюсов равна $S = k_{z1}t_z + 2x_1 = 2x_2 = t_z / 2$. Можно показать, что это соотношение сохраняется при повороте ротора относительно статора на любой угол.

2. Оценка пускового момента двигателя. Рассмотрим механизм образования момента при подаче в обмотки фаз токов, изменяющихся по закону $i_k = -I_m \sin(Z_2\alpha - \alpha_k)$. Для магнитной системы на рис.2,а полюса сдвинуты, поэтому $\alpha_k = -(k-1)2\pi/3$. При $Z_2\alpha = 0$: $i_0 = \sqrt{3} I_m / 2$; $i_1 = 0$; $i_2 = -\sqrt{3} I_m / 2$. Магнитные индукции от токов в обмотках возбуждения ($B_{\delta=}$) и управления ($B_{\delta y}$) под полюсами с номерами 0, 5, 6, 11 складываются, а под полюсами 2, 3, 8, 9 – вычитаются. Аналогично для магнитной системы, изображённой на рис.2,з, $n_1 = 0$, обмотки соседних групп включены встречно и при $Z_2\alpha = 0$:

$i_0 = \sqrt{3} I_m / 2$; $i_1 = 0$; $i_2 = -\sqrt{3} I_m / 2$. Магнитные индукции от постоянных магнитов и токов в обмотках управления под полюсами 0, 3, 6, 9 складываются, а под полюсами с номерами 2, 5, 8, 11 – вычитаются. Обозначим суммарные

индукции соответственно $B_{\delta 1} = B_{\delta=} + B_{\delta y}$ и $B_{\delta 2} = B_{\delta=} - B_{\delta y}$. Изменение энергии магнитного поля под этими полюсами при смещении ротора на угол $\Delta\alpha$

$$\Delta W_{m1} = k_1 \frac{B_{\delta 1}^2}{\mu_0} \delta k_\mu l_s \frac{D}{2} \Delta\alpha;$$

$$\Delta W_{m2} = k_1 \frac{B_{\delta 2}^2}{\mu_0} \delta k_\mu l_s \frac{D}{2} \Delta\alpha, \quad (6)$$

где δ – воздушный зазор; l_s , D – соответственно длина пакета статора и диаметр расточки; $k_\mu \approx 1,1 \div 1,5$ – коэффициент, учитывающий магнитное сопротивление статора (стали).

Пусковой момент, приложенный к ротору,

$$M_n = \frac{\Delta W_{m1}}{\Delta\alpha} + \frac{\Delta W_{m2}}{\Delta\alpha} = \frac{k_1}{2\mu_0} (B_{\delta 1}^2 - B_{\delta 2}^2) \delta k_\mu l_s D. \quad (7)$$

При примерно равных значениях $B_{\delta=}$ и $B_{\delta y}$

$$M_n = \frac{k_1}{2\mu_0} B_{\delta 1}^2 \delta k_\mu l_s D. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет оценить значение пускового момента двигателя при максимально допустимой индукции в зазоре. Из него также следует, что при заданном наружном диаметре D_n оптимизация двигателя по M_n представляет многокритериальную задачу. С одной стороны, чем больше воздушный зазор, тем больше момент, но с другой стороны, его значение определяется максимальной индукцией в зазоре от обмотки возбуждения или постоянного магнита $B_{\delta=} \approx B_{\delta 1} / 2$. Индукция $B_{\delta=}$ для двигателя (рис.2,а,б), в свою очередь, зависит от площади, отводимой в поперечной геометрии под ОВ, плотности тока и воздушного зазора: $B_{\delta=} = \mu_0 i_0 w_0 / 2\delta k_\mu$. Индукция под полюсами, создаваемая токами обмотки управления, $B_{\delta y} = \mu_0 i_y w_k / (\delta k_\mu)$. При пуске ($Z_2\alpha = 0$) она будет под полюсами фаз 0 и 2 и равна $B_{\delta y} = \pm \mu_0 \sqrt{3} S_y k_{з.п} j_y / (4\delta k_\mu)$, где S_y – площадь ОУ; $k_{з.п} \approx 0,3$ – коэффициент заполнения паза медью. Кроме того, $B_{\delta 1} = B_{\delta=} + B_{\delta y}$ не должна превосходить индукцию насыщения стали магнитопровода. Площадь под ОВ ($S_{п.в}$) зависит от отношения D/D_n и конфигурации паза. Плотность тока $j_{ОВ}$ определяется предельными температурными режимами эксплуатации двигателя. Зазор для двигателей по рис.2,а,б определяется как $\delta = \mu_0 S_{п.в} k_{з.п} j_{ОВ} / (2B_{\delta=} k_\mu)$. Для

малогабаритных двигателей (с наружным диаметром 100–300 мм) воздушный зазор может быть ограничен из технологических соображений.

Для БДПТ (рис.2,з,д) индукция магнитного поля в воздушном зазоре, создаваемая магнитным потоком ПМ, определяется выражением

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_m}{S/2} = \frac{4\Phi_m}{t_z} = \frac{4h_m H_c}{t_z \left(\frac{h_m H_c}{l_m B_r} + k_{\sigma} \frac{8\delta k_{\mu}}{\mu_0 t_z} \right)}; \quad (9)$$

где Φ_m – магнитный поток одного магнита; h_m , l_m – соответственно толщина и длина магнита в направлении намагничивания; H_c , B_r – коэрцитивная сила и остаточная индукция магнита; k_{σ} – коэффициент рассеяния магнита.

Длина ПМ (l_m) может ограничиваться внутренним диаметром статора. Кроме того, из условия размагничивания магнита магнитным потоком от тока в ОУ его толщина h_m не может быть меньше $h_m = \chi j_y S_y k_{з.п} / 2H_c$, где $\chi \approx 1,5 \div 2$.

Расчётные исследования пусковых характеристик БДПТ-Н

1. Аналитические расчёты пусковых моментов. Расчёты выполнены для двигателей, магнитные системы которых моделируются с помощью метода конечных элементов. Геометрические размеры магнитопроводов и плотности токов в обмотках, а также результаты расчётов по указанным формулам приведены в табл.1.

2. Моделирование методом конечных элементов. Для определения пускового момента при заданных плотностях токов в ОВ (толщине t_m ПМ) и плотностях токов в ОУ используем программный комплекс конечно-элементного моделирования физических полей "ELCUT" [18]. Моделирование проводилось для рассмотренных на рис.2,а,б,з и д магнитных систем вариантов БДПТ-Н. Исходные данные для моделирования представлены в табл.1. На рис.3 изображены магнитные поля (рис.3,а и б) БДПТ-Н типа ВИРД (рис.2,а) при отключённых и включённых ОУ при $\alpha = 0$ и соответственно картины распределения индукции по воздушному зазору (рис.3,в,г). На рис.4 изображены распределения магнитных полей (рис.4,а,б,д,е) обращённого БДПТ-НПМ (рис.2,з) и картины распределения индукции по воздушному зазору (рис.4,в, г,ж,з) при отключённых и включённых ОУ для $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$. Особый интерес представляет значение пульсации момента при различных схемах построения рассматриваемых БДПТ-Н. В табл.2 представлены результаты расчётов зависимости пускового момента от угла поворота α в пределах $0-\pi$ для рассмотренных выше вариантов построения БДПТ-Н. Пульсации момента вычислялись по формуле

$$\Delta M = \pm \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2M_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$$

где M_{\max} , M_{\min} , $M_{\text{ср}}$ – максимальный, минимальный, средний моменты.

Таблица 1

Параметры вариантов исполнений БДПТ-Н	БДПТ-Н типа ВИРД (рис.2,а)	БДПТ-Н типа ВИРД (рис.2,б)	БДПТ-НПМ (рис.2,з)	БДПТ-НПМОВ (рис.2,д)
Наружный диаметр статора (ротора), мм	160	160	160	160
Диаметр расточки, мм	96,6	120	120	120
Воздушный зазор, мм	0,3	0,3	0,3	0,3
Площадь под ОВ, мм ²	358	281,4	–	–
Площадь под ОУ, мм ²	283	182,5	274,6	182,5
Толщина магнита, мм	–	–	3	3-5
Длина магнита, мм	–	–	19,5	19,5
Плотность тока ОВ, А/мм ²	5-6	5	–	–
Плотность тока ОУ, А/мм ²	7-20	7	7	7-20
Число полюсов статора/ зубцов ротора	12/10	12/10	12/8	12/10
n_1	1	1	0	1
Коэффициент k_{μ}	1,3	1,2	1,2	1,2
Индукция от постоянного магнитного поля подмагничивания B_{δ} , Тл	0,86	0,73	0,72	0,81
Индукция от обмотки управления $B_{\delta y}$, Тл	0,82	0,57	0,86	0,57
Пусковой момент M_n , Н·м	87,0	53,5	86,4	65,6

Примечание: значения B_{δ} , $B_{\delta y}$ и M_n рассчитаны на длину статора в 1 м при плотности тока в обмотках управления 7 А/мм², в обмотке возбуждения 5 А/мм².

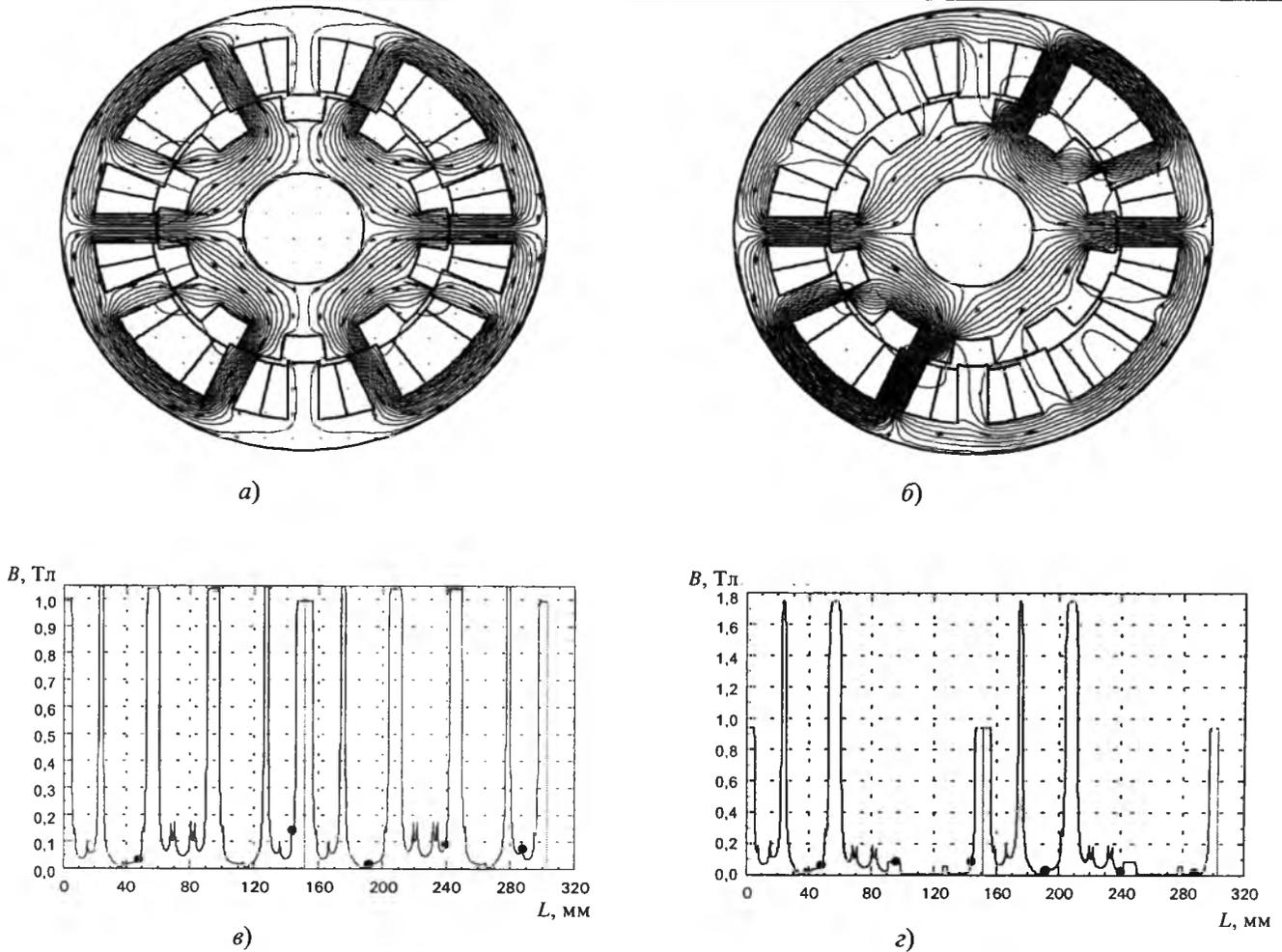


Рис.3. Распределения магнитного поля и индукции в БДПТ-Н типа ВИРД:
 а, в - $\alpha = 0$, $j_y = 0$; б, г - $\alpha = 0$, $j_y \neq 0$

ный и средний момент соответственно.

Следует отметить, что в данных, приведённых в табл.2, содержатся пульсации момента, обусловленные неравномерностью построения сетки при решении задачи на "ELCUT". Из табл.2 следует, что пульсации момента в зависимости от угла поворота $Z_2\alpha$ для БДПТ-Н с $n_1 = 0$ (рис.2,г) значительно больше, чем для остальных вариантов исполнения, соответствующих $n_1 = 1$. На рис.5 представлены пусковые характеристики двигателей (M_n) для вариантов исполнения, представленных на рис.2,а и д при различных значениях подмагничивания постоянного магнитного поля и толщины ПМ.

Анализ и сравнение полученных результатов

Предложенная в статье оценка пусковых моментов по изменению энергии магнитного поля в приведённом воздушном зазоре подтверждена численным экспериментом с помощью программного комплекса "ELCUT" для значений $k_\mu = 1,1 \div 1,3$. Об этом свидетельствуют сравнительные данные, приведённые в табл. 1 и 2. Для больших значений плотностей тока в ОУ, харак-

терных для кратковременных пусковых режимов, при которых имеет место сильное насыщение магнитопроводов ($k_\mu > 1,5$) и индукция в воздушном зазоре больше индукции насыщения материалов магнитопроводов, более надёжные результаты получаются при численном моделировании.

В табл.2 и на рис.5 приведены результаты моделирования для плотностей тока в ОУ от 7 до 20 А/мм².

Синусоидальная зависимость токов управления (токов в фазах) от угла поворота ротора позволяет для анализа БДПТ-Н использовать хорошо известные соотношения из теории синхронных машин для расчёта рабочих характеристик и магнитных потерь при любых скоростях вращения ротора двигателя.

Как следует из результатов численных расчётов, приведенных в табл.2, значения пульсаций пусковых моментов в трехфазных БДПТ-Н с подмагничиванием постоянным магнитным полем для $n_1 = 1$ (рис.2,а) при допустимых по длительности тепловому режиму (не более 100–120°C)

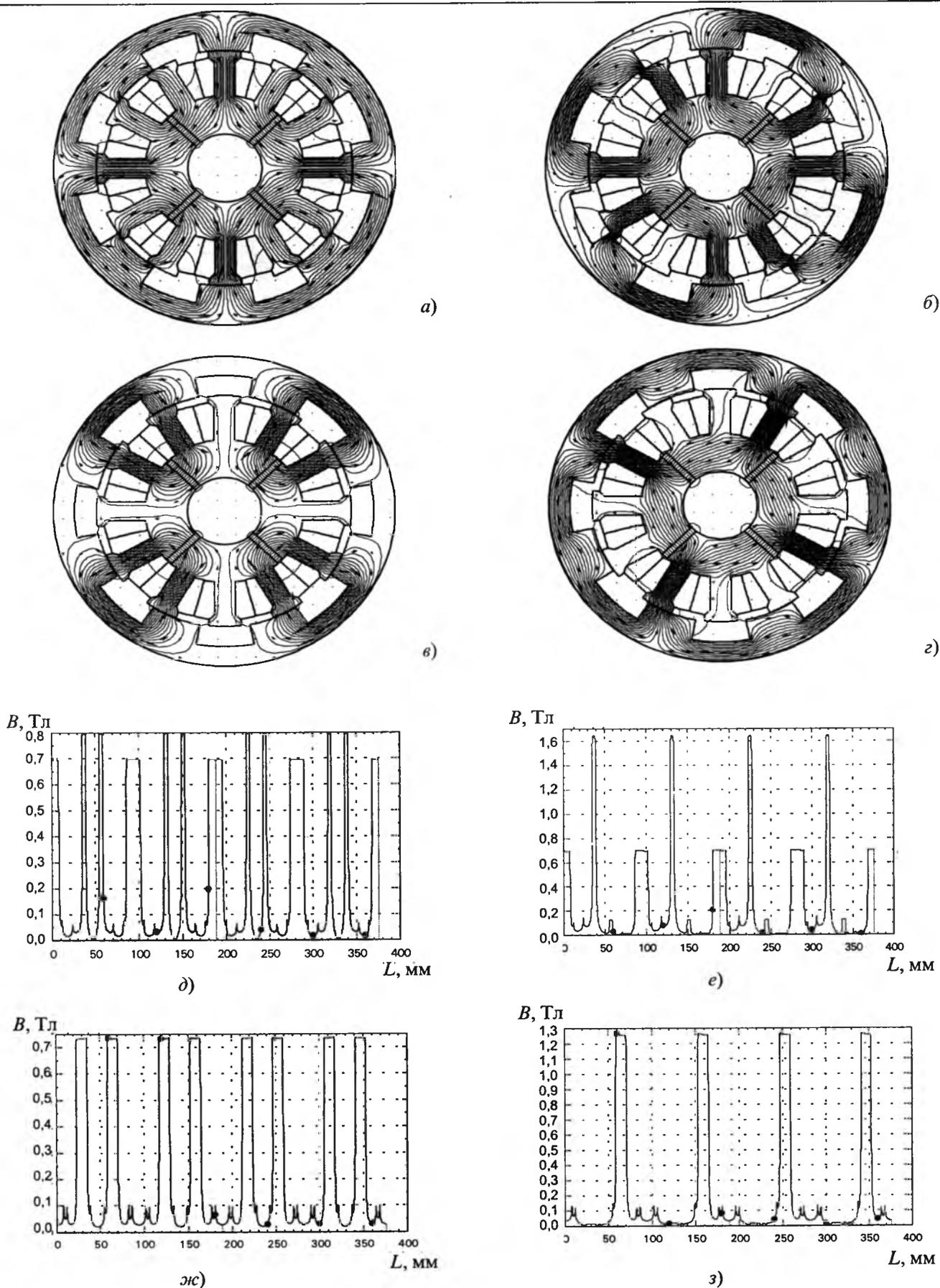


Рис.4. Распределения магнитных полей и индукции по воздушному зазору обращённого БДПТ-НПМ:

a, д - $\alpha = 0, j_y = 0$; *б, е* - $\alpha = 0, j_y \neq 0$; *в, ж* - $\alpha = \pi, j_y = 0$; *з, з* - $\alpha = \pi, j_y \neq 0$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Угол поворота, $Z_{2\alpha}$, эл. град.	Пусковой момент на единицу длины 1 м, Н·м										
	БДПТ-Н типа ВИРД (рис.2,а)			БДПТ-Н типа ВИРД (рис.2,б)	БДПТ-НПМ (рис.2,в)			БДПТ-НПМ (рис.2,з)		БДПТ-НПМОВ (рис.2,д)	
	Плотности тока управления j_y и возбуждения $j_{ОВ}$, А/мм ² ; t_m , мм										
	$j_y=7, j_{ОВ}=5$	$j_y=10, j_{ОВ}=6$	$j_y=20, j_{ОВ}=6$	$j_y=7, j_{ОВ}=5$	$j_y=7, t_m=3$	$j_y=10, t_m=3$	$j_y=20, t_m=3$	$j_y=7, t_m=5$	$j_y=7, t_m=5$	$j_y=10, t_m=5$	$j_y=20, t_m=5$
0	84,6	140,0	218,8	52,3	96,8	136,7	201,4	83,7	56,2	85,8	129,8
45	84,4	139,1	231,2	52,4	94,7	133,8	196,2	59,0	58,1	88,2	149,9
90	82,7	141,7	241,7	53,6	92,6	129,1	190,1	75,0	59,8	90,6	179,0
135	80,7	135,9	211,5	50,3	92,5	125,5	182,2	87,2	54,5	83,9	139,3
180	84,2	139,9	217,2	52,2	96,7	136,6	199,6	46,1	56,7	86,8	129,5
$M_{ср}$, Н·м	83,32	139,3	224,1	52,16	94,43	132,3	193,9	70,2	57,06	87,06	145,5
ΔM , %	2,3	2,2	6,7	3,15	2,25	4,2	4,95	29	4,6	3,8	17

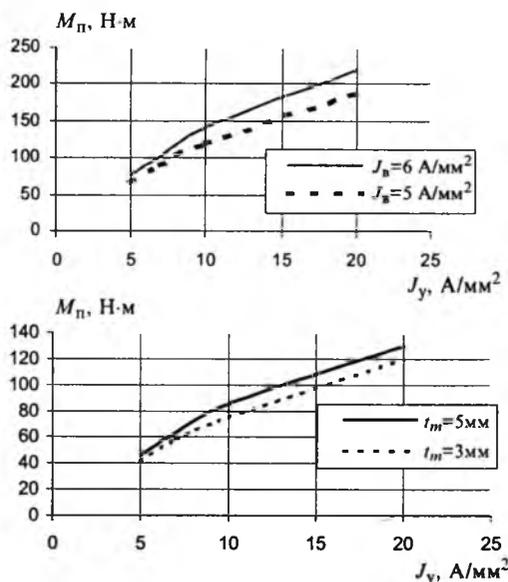


Рис.5. Пусковые характеристики двигателей для исполнений, представленных на рис.2,а и д, при различных значениях подмагничивания и толщины ПМ

плотностях токов ($j_y = 15 \text{ А/мм}^2, j_{ОВ} = 6 \text{ А/мм}^2$) не превосходят 2–4,5%, при этом сопоставимый вращающий момент относительно ВИРД по [12,13] равен 9 Н·м при 8 Н·м в ВИРД. Из табл.2 и рис.5 следует, что в сравнении с параметрами базисных конструкций ВИРД [12, 13] при плотности тока в катушках обмоток управления 20 А/мм² средние значения пускового момента рассматриваемых БДПТ-Н (рис.2,а и в) при одинаковых пульсациях момента соответствуют лучшим вариантам исполнений ВИРД. Положительной особенностью БДПТ-Н, как указывалось выше, является традиционный способ управления – от трёхфазных унифицированных и широко распространённых инверторов с синусоидальным напряжением (током). Использование для этих целей современных цифровых инверторов (контроллеров) позволяет при программном формировании трёхфазных синусоидальных напряжений управления учесть гармонический характер пульсаций момента [19], в том числе и путем введения со сдвигом по фазе на 180° соответствующих, пропорциональных по амплитуде, гармонических составляющих напряжений управления. В то же время ВИРД для применения в моментном безредукторном следящем приводе требует специализированных микропроцессорных устройств управления с формированием однополярных дискретных напряжений и применения адаптивных цифровых алгоритмов управления [8, 12–14, 19], что по существу в совокупности с индивидуальными подходами к проектированию и жесткими конструктивно-технологическими ограничениями при повышенных электромагнитных и тепловых нагрузках, при которых у ВИРД появляются конкурентные свойства, делает его специализированным и сложным электромехатронным устройством с весьма неопределенной способностью к повторяемости в производстве от образца к образцу без индивидуальных настроек или регулировок. Последнее, учитывая технологические ограничения при повышенных электромагнитных и тепловых нагрузках на предельных значениях свойств материалов, делает неизбежным ужесточение требований к характеристикам материалов, особого соблюдения технологических режимов их обработки (технологической переработки).

особенностью принципиально-конструктивного построения БДПТ-Н и ВИРД, требующе-

го проведения дополнительных исследований и анализа для преодоления их недостатков применительно к режимам работы и конструкциям безредукторных электроприводов, наряду с большим тепловыделением в замкнутые объёмы приборов, является ограничение по минимизации осевой длины (плоские конструкции), так как лобовые части обмоток становятся сопоставимыми или даже большими активной осевой длины магнитопроводов статора или ротора.

Выводы

Индукторные m -фазные бесконтактные моментные двигатели с подмагничиванием постоянным магнитным полем в вариантах выполнения БДПТ-Н типа ВИРД и БДПТ-НПМ обладают практически одинаковыми с вентильными индукторно-реактивными двигателями по энергетическим и моментным характеристикам, но в 1,5–2 раза меньшими пульсациями момента и несколько меньшим тепловыделением. Указанные БДПТ-Н типа ВИРД и БДПТ-НПМ имеют меньшие ограничения при выполнении плоских конструкций за счёт подмагничивания постоянным магнитным полем. Управление БДПТ-Н в трёхфазном исполнении может быть обеспечено унифицированным инвертором (цифровым контроллером) с синусоидальным напряжением.

Список литературы

1. Епифанов О.К., Оськин А.Б., Салова И.А., Хрущев В.В. Разработка малогабаритных бесконтактных моментных двигателей модульного типа для современных цифровых безредукторных следящих систем навигационных приборов // Гироскопия и навигация. 2001. №1(32). С.50–62.
2. Демагин А.В. Электрические машины для непосредственного привода приборных систем. Л.: ЦНИИ "Румб", 1991.
3. Епифанов О.К., Гутнер И.Е. Электромеханические и электронные элементы цифровых безредукторных следящих систем гироскопов и устройств автоматического управления // Сборник докладов II международной научно-технической конференции "Кибернетика и технологии XXI века" (С&Т*2001), 23-25 октября 2001 г., Воронеж, Россия. Воронеж.: ВГУ. 2001. С.158–170.
4. Петрушин А.Д., Янов В.П. Оптимизация режимов работы тягового вентильно-индукторного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. 1999. №3. С.33–38.
5. Жуков В.П., Нестерин В.А. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5ДВМ // Электротехника. 2000. №6. С.19–21.
6. Нестерин В.А., Жуков В.П., Тойдеряков А.А. Освоение новых изделий электромеханики на основе высокоэнергетических постоянных магнитов // Электротехника. 2001. №11. С.19–21.
7. Смирнов Ю.В. Линейные вентильно-индукторные двигатели // Электричество. 2002. №1. С.37–43.
8. Голандцев Ю.А., Гутнер И.Е. Вентильный индукторно-реактивный двигатель // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т.45, №8. С.12–18.
9. Овчинников Е.И. Электромагнитный момент и механические характеристики вентильного двигателя с реактив-

ным ротором // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т.45, №8. С.5–11.

10. Хрущев В.В., Салова И.А. Теоретические основы бесконтактных моментных двигателей с электромагнитным возбуждением // Электрофорум. 2002. №4. С.33–39.

11. Бут Д.А. Модификация вентильно-индукторных двигателей и особенности их расчётных моделей // Электричество. 2000. №7. С.35–40.

12. Голландцев Ю.А. Пульсации пускового момента вентильного индукторно-реактивного двигателя // Электричество. 2003. №6. С.37–42.

13. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ-ЦНИИ "Электроприбор", 2003.

14. Голландцев Ю.А. Преобразование сигналов в системе управления вентильным индукторно-реактивным двигателем // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46, №10. С.33–39.

15. Пат. US 05825112 США: МКИ³ H02K 1/00; H02K 1/12; H02K 1/14. Двигатель с двойной явно выраженной полюсностью и стационарными постоянными магнитами/ Thomas A. Lipo, Yuefeng Liao, Feng Liang (США). 20 октября 1998 г.

16. Пат. WO 9707583 (PCT/US 96/05618) США: МКИ³ H02K 1/00; H02K 1/22; H02K 17/42; H02K 21/26. Реактивная синхронная машина с постоянными магнитами или вспомогательными обмотками возбуждения./ Thomas A. Lipo, Yuefeng Liao, Feng Liang (США). 27 февраля 1997 г.

17. Красовский А.Б., Бычков М.Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. 2001. №10. С.33–43.

18. ELCUT. Комплект программ моделирования двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.1. Руководство пользователя. СПб: НПК "Тор", 2000.

19. Гутнер И.Е., Никифоров В.О., Чежин М.С., Шапошников А.С. Управление бесконтактным двигателем с большим остаточным моментом // Физические процессы, системы и технологии точной механики. СПб: ИТМО. 2001. Вып. 3(197). С.150–155.

Епифанов Олег Константинович – начальник сектора электрических машин и электромеханических устройств систем автоматики ФГУП ЦНИИ "Электроприбор" (г.С.-Петербург), канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ленинградского института авиационного приборостроения в 1980 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Прецизионный индукционный дискретный преобразователь угла" в 1999 г.

Салова Ирина Александровна – научный сотрудник ФГУП ЦНИИ "Электроприбор" (г.С.-Петербург), доцент Государственного университета аэрокосмического приборостроения (г.С.-Петербург), старший научный сотрудник, канд. техн. наук. Окончила факультет аэрокосмических приборов и систем Ленинградского института авиационного приборостроения в 1974 г. Защитила кандидатскую диссертацию по теме "Методы автоматизированного контроля функционального состояния подсистемы дыхания в экстремальных условиях" в 1982 г.

Хрущев Виталий Васильевич – ведущий научный сотрудник ФГУП ЦНИИ "Электроприбор" (г.С.-Петербург), профессор Государственного университета аэрокосмического приборостроения (г.С.-Петербург), Заслуженный деятель науки и техники России, доктор техн. наук. Окончил физический факультет Ленинградского Государственного университета в 1946 г. Защитил докторскую диссертацию по теме "Высокоточный вращающийся трансформатор" в 1962 г.

Проектирование погружного электродвигателя с сосредоточенной обмоткой статора

ЗАХАРЕНКО А.Б.

Автоматизированное проектирование погружного электродвигателя для привода нефтедобывающего насоса с использованием метода конечных элементов позволило достаточно точно рассчитать магнитную систему, в том числе с учётом реакции якоря, что важно для высокочастотных машин, где потери в стали играют существенную роль. Применение сосредоточенной обмотки статора, особенно технологичной при малых внешних диаметрах, дало возможность получить приемлемую синусоидальную форму ЭДС, т.е. практически не снижая вибрационных показателей повысить надёжность двигателя по сравнению с машинами с распределёнными обмотками.

Рост возможностей вычислительной техники даёт разработчику электрических машин новые возможности синтеза электрических машин (ЭМ) и анализа их полей и процессов. Ранее при разработке расчётных программ приходилось опираться на существенные допущения о характере распределения электромагнитного поля в активной зоне ЭМ, что приводило иногда к значительным погрешностям. Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет с большой точностью рассчитать распределение составляющих электромагнитного поля – векторного и скалярного магнитных потенциалов, потока и его плотности (индукции), напряжённости и т.п. и, в конечном счёте, выходных показателей ЭМ. Существенным недостатком МКЭ является сравнительно медленная сходимость, определяющая значительное время расчёта либо требующая серьёзных ресурсов ПЭВМ. Одной из лучших программ, использующих МКЭ, является ANSYS [1]. Позволяя решать не только задачи механической прочности и динамики жидкостей и газов, но и проводить расчёты тепловых и электромагнитных полей в электрических машинах, эта программа пользуется популярностью среди разработчиков. ANSYS обладает обширными сервисными возможностями, тем не менее сложные расчётные модели удобно строить с привлечением иных программных продуктов.

Потребности экономики России определяют необходимость увеличения объёма добычи нефти. С этой целью мощность отечественных погружных электродвигателей, приводящих в действие широко применяемые регулируемые нефтедобывающие насосы, должна быть увеличена. Представляет интерес проектирование и анализ двигателя номинальной полезной мощностью 300 кВт.

The design augmented by computer of the submersible electric motor for the drive of the oil producing pump with usage of a Method of finite element has allowed precisely enough to calculate a magnet system, including with allowance for armature reactions, that is important for high frequency machines, where the losses in steel play an essential role. The application of concentrated stator winding, specially technologic at small external diameters has enabled to receive the reasonable sinusoidal form of EMF, that is practically not reducing vibrational parameters to improve reliability of the motor as compared with machines with distributed winding.

Следует отметить, что рассматриваемые электрические машины работают в условиях высоких температур и в ограниченном объёме: внешний диаметр их статора ограничен диаметром обсадной трубы скважины. Кроме того, они должны обладать высокой надёжностью, поэтому имеют ряд особенностей. Длина модулей, из которых обычно "составляются" двигатели большой мощности, ограничена возможностью прогиба вала ротора вследствие изгибных колебаний при достаточно высокой номинальной частоте вращения и сложностью укладки обмотки в слишком длинный пакет статора. Потери в кабеле питания и управления находящегося на глубине нескольких километров нефтедобывающего насоса весьма существенны, поэтому напряжение питания значительно выше, чем у традиционных двигателей, ограничено сверху возможностями преобразователя напряжения и частоты и составляет $U = 1300$ В. В связи с этим толщина полиимидно-фторопластовой изоляции обмотки статора также увеличивается по сравнению с эмалевой изоляцией электрических машин традиционной конструкции.

Стремление получить максимальную полезную мощность в ограниченном объёме, в том числе проектирование электрической машины наименьшей длины с целью её использования в наклонных скважинах с минимальным радиусом изгиба, заставляет рассматривать не только традиционно применяемые для этой цели асинхронные двигатели, но и синхронные двигатели с высококоэрцитивными термостойкими постоянными магнитами из самарий-кобальта и неодим-железо-бора. Последний тип электрических машин имеет наилучшие энергетические показатели по сравнению с другими ещё и потому,

что использует постоянные магниты в качестве источника поля и не потребляет ток возбуждения из источника питания, уменьшая потери в питающем кабеле.

Использование датчиков углового положения ротора для регулирования скорости погружных синхронных двигателей с постоянными магнитами (ПСДПМ) затруднено из-за необходимости усилить их сигнал. С другой стороны, эффективность бездатчиковой системы управления значительно снижается при высоких частотах питающего напряжения из-за большой длины кабеля питания и управления. Поэтому существенное увеличение числа полюсов отрицательно сказывается на регулировочных свойствах двигателя. В то же время с ростом числа пар полюсов синхронного двигателя при постоянной массе магнитов снижается масса электротехнической стали, необходимая для обеспечения одного и того же уровня ЭДС, поэтому предпроектные расчёты позволяют выявить оптимальное число пар полюсов: $p = 2$ или 3 . Один из режимов работы шестиполюсной синхронной машины описан в [2], а в этой статье проанализируем проект четырёхполюсного двигателя.

Коэффициент полезного действия центробежного насоса увеличивается с ростом скорости, поэтому номинальная частота вращения приводного двигателя n выбирается достаточно большой: 8–10 тыс. об/мин. В рассматриваемом примере $n = 8500$ об/мин при частоте коммутации обмоток статора $f = 283$ Гц. Следует отметить, что многокилометровый кабель питания и управления представляет собой длинную линию. Обеспечить работу двигателя, регулирование его скорости и достичь наилучших энергетических показателей можно, лишь приблизив эквивалентное комплексное сопротивление электрической машины к согласующему сопротивлению длинной линии, избежав таким образом отражённой волны. При заданных номинальной полезной мощности двигателя, напряжении, а также параметрах длинной линии, в том числе ёмкости изоляции кабеля, определяется максимальная частота изменения напряжения и частота вращения двигателя. При номинальных нагрузке и частоте вращения КПД магнитоэлектрического двигателя не опускается ниже 92,5%.

Традиционно в синхронных машинах обмотку статора выполняют распределенной – с числом пазов на полюс и фазу $q > 1$. Распростра-

нённым является случай, когда $q = 1\frac{1}{5}$ или $1\frac{1}{7}$

для уменьшения влияния пятой и седьмой гармоник в составе ЭДС, однако для выполнения такой обмотки необходимо большое количество пазов, что не очень технологично. Малый наружный диаметр пакета статора ($D_a = 110$ мм) и необходимость обеспечения высокого коэффициента заполнения паза медью должны определять технологию намотки обмотки статора, которая в рассматриваемом примере выполнена

сосредоточенной на зубцах ($q = \frac{1}{2}$). Считается,

что такая обмотка является источником обширного гармонического ряда. Проведём инженерный анализ гармонического состава ЭДС, а также экстремальных точек индукции электромагнитного поля.

Созданию расчётной модели конечно-элементного расчёта предшествовала оптимизация выбранной конструкции двигателя аналогично тому, как это было сделано в [3], с использованием для поверочных расчётов традиционного метода расчёта характеристик синхронной машины [4].

Вследствие большой осевой длины ($l_g = 550$ мм) каждого из четырёх модулей двигателя, намного большей внешнего диаметра, расчётная модель выбранного варианта построена как двумерная (рис.1). Активные материалы и немагнитные промежутки модели описаны с помощью 8-узловой твердотельного магнитного элемента типа Plane 53 [1]. Поскольку для материала

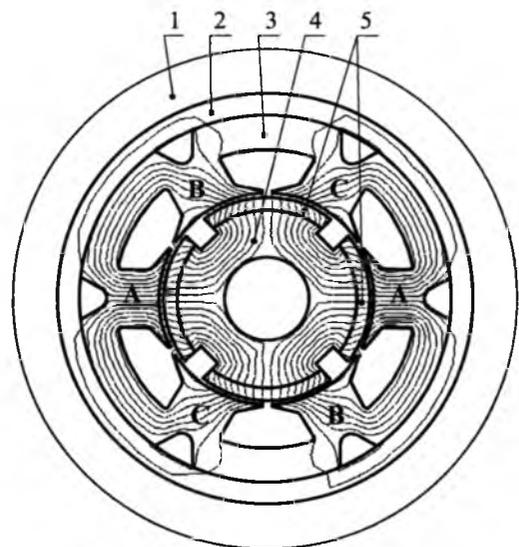


Рис.1. Силовые линии магнитного поля при холостом ходе синхронного двигателя:

1 – окружающее немагнитное пространство; 2 – корпус; 3 – пакет статора; 4 – вал-магнитопровод ротора; 5 – постоянные магниты

ротора внутри постоянных магнитов (стали 40ХН) магнитные свойства не нормированы и справочные данные по этим свойствам отсутствуют, то использована кривая намагничивания для Сталей 3. То же самое можно сказать и о материале корпуса двигателя, магнитная характеристика которого принята аналогичной Сталей 3. Реальная кривая намагничивания электро-технической стали статора 2421 приведена по справочным данным. Исходя из вышеизложенного, расчётная модель состоит из следующих областей:

- немагнитный промежуток (нефть, гильза ротора, промежуток между магнитами и др.);
- пластина пакета статора;
- ротор и корпус;
- постоянные магниты из материала ниодим-железо-бор.

Следует отметить, что каждый постоянный магнит представлен отдельной областью, так как имеет отличающийся пространственный вектор намагниченности. Широко применяемое в расчётных моделях "радиальное" намагничивание постоянных магнитов является ненужным упрощением. С целью определения формы ЭДС определим зависимость потокоосцепления от угла поворота ротора α (в физических градусах) и γ (в электрических градусах), где $\gamma = p\alpha$. При этом, чтобы не модифицировать векторы намагниченности постоянных магнитов, удобно поворачивать статор, а не ротор, поэтому расчёты были проведены для ряда углов поворота статора.

Для нахождения характеристик магнитного поля расчётная модель была разбита неравномерной сеткой, сгущающейся в углах и немагнитном зазоре между статором и ротором. Немагнитная гильза ротора, не оказывающая влияния на расчёт магнитной системы при ХХ, на рис.1 не показана. Решение найдено при единственном граничном условии: векторный магнитный потенциал в направлении, перпендикулярном рассматриваемой плоскости на окружности наибольшего диаметра на рис.1, равен нулю. Иначе говоря, магнитное поле сосредоточено в этом круге.

Следует отметить, что удобно создавать компьютерную экспликацию расчётной модели отчасти вне программы ANSYS. Для этого на языке MS Fortran 5.1 была написана вспомогательная программа, генерирующая отрезки прямых и дуги окружностей, необходимые для описания геометрии в зависимости от угла поворота α . Результатом её выполнения является логический файл (log-файл), который позволяет в среде про-

граммы ANSYS разбить Булевой операцией расчётную область на подобласти, соответствующие поперечному сечению корпуса, листа статора, магнитов, вала и др.

В режиме холостого хода максимальное значение индукции в зубце статора, т.е. в зубце, находящемся напротив постоянного магнита (рис.1), составило $B_{z \max} = 1,75$ Тл, а в ярме $B_a \max = 1,52$ Тл. Пониженные по сравнению с традиционным случаем значения индукций объясняются тем, что потери в активной стали играют в рассматриваемом двигателе существенную роль. Потокоосцепление с витками фазы Ψ (Вб) для машины с сосредоточенной обмоткой находится по формуле (1) в зависимости от угла γ (рис.2):

$$\Psi(\gamma) = w k_w B_z(\gamma) b_z l_\delta, \quad (1)$$

где w – число последовательно соединенных витков фазы; k_w – обмоточный коэффициент, для сосредоточенной обмотки $k_w = \sin(\pi y / 2\tau)$, в данном случае шаг обмотки $y = 2\tau/3$, поэтому $k_w = 0,866$; $B_z(\gamma)$ – индукция в зубце, Тл; b_z – ширина зубца, м; l_δ – длина пакета, м.

Следует отметить, что вследствие симметричности кривой потокоосцепления при ХХ для её построения и инженерного анализа было достаточно провести расчёт магнитной системы при девяти углах поворота γ в интервале $[0; \pi/2]$ электрических радиан. "Ромбами" на рис.2 показана

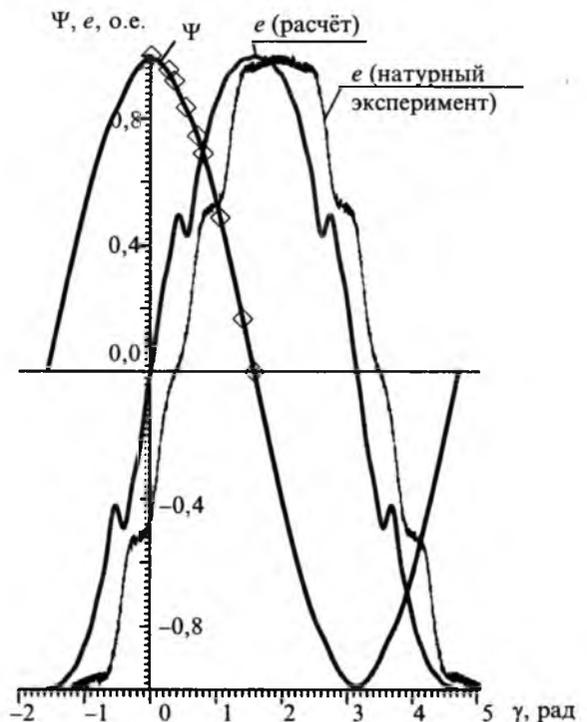


Рис.2. Период зависимостей потокоосцепления Ψ и ЭДС e от угла γ

ны точки, рассчитанные при помощи программы ANSYS, за базовое значение потокосцепления принята величина, рассчитанная при индукции в зубце 1,75 Тл.

Распределение ЭДС e (В), рассчитываем, согласно закону электромагнитной индукции, дифференцирования по времени функции потокосцепления (рис.2):

$$e(\gamma) = -d\Psi(\gamma) / dt = -\omega d\Psi(\gamma) / d\gamma, \quad (2)$$

где использовалось известное выражение связи между углом поворота ротора и его скоростью: $\gamma = \omega t$, причём $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота протекающего по обмотке тока, Гц; t – время, с.

Таким образом, с учётом формы кривой (рис.2) расчётное действующее значение фазной ЭДС двигателя в целом при ХХ и номинальной частоте вращения 8500 об/мин составило 1232 В, т.е. по 308 В на каждый модуль. Последнее значение является базовым для периода ЭДС на рис.2. Измеренные значения ЭДС для каждой из фаз каждого из четырёх модулей находились в пределах 325–333 В, что на 5,5–8,1% больше расчётного значения. Даже принимая во внимание тот факт, что гармонический состав экспериментальной и теоретической кривых совпадает с меньшей точностью (таблица), полученные результаты можно считать вполне удовлетворительными. Период экспериментальной зависимости ЭДС *одного модуля двигателя* от угла γ (рис.2) и её гармонический состав (таблица) зафиксированы при помощи запоминающего осциллографа. Экспериментальная кривая смещена по фазе относительно расчётной для удобства обозрения.

№ гармонической	Амплитуда высшей гармонической кривой ЭДС ХХ, % от основной гармоники	
	Опыт	Расчёт
2	1,67	0,05
3	0,63	0,96
4	0,87	0,02
5	0,89	2,43
6	0,39	0,06
7	4,39	4,99
8	0,30	0,08
9	0,85	2,57
10	0,32	0,00
11	5,52	0,63
12	0,42	0,07
13	2,15	2,10
14	0,52	0,09
15	0,16	1,36

Согласно ГОСТ 183-74 для *синхронных генераторов*, работающих параллельно с сетью, вводится коэффициент искажения синусоидальности кривой линейного напряжения k_{\sin} , определяемый при ХХ и номинальной нагрузке [5]:

$$k_{\sin} = \frac{\sqrt{\sum_{v \neq 1} U_{vm}^2}}{U_{1m}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где в числителе формулы (3) квадратный корень из суммы квадратов амплитуд (или действующих значений) высших гармонических составляющих рассматриваемой периодической кривой, а в знаменателе амплитуда (или действующее значение) её основной гармонической. Для синхронных генераторов мощностью от 1 до 100 кВ·А $k_{\sin} \leq 10\%$, а свыше 100 кВ·А $k_{\sin} \leq 5\%$.

Поскольку коэффициент искажения синусоидальности для фазной ЭДС погружного магнитозлектрического двигателя оказывает заметное влияние на вибрационные показатели привода и, в конечном счёте, на его надёжность, расчёт этого коэффициента представляет интерес. По экспериментальным и расчётным данным (таблица), а также по формуле (3) этот коэффициент равен:

- опыт $k_{\sin} = 7,8\%$
- расчёт $k_{\sin} = 6,7\%$.

Расхождение значений k_{\sin} для опыта и расчёта примерно на 15% можно считать удовлетворительным для инженерного анализа. Кроме того, значение $k_{\sin} < 8\%$ вполне приемлемо для модуля анализируемого двигателя и оправдывает применение сосредоточенной обмотки статора.

При традиционном методе [4] расчёт магнитной системы проводится в режиме ХХ. В режиме *нагрузки* двигателя реакция якоря в целом имеет размагничивающий характер, однако при этом индукция в зубцах при некоторых углах поворота может быть больше, чем при ХХ. Для анализа этого режима необходимо задаться базовым значением тока и его формой: базовое значение в дальнейшем проверяют итерационным путем, форму необходимо взять из эксперимента, например, при углах коммутации 30° (рис.3) и 45° (рис.4). За базовое значение принят номинальный фазный ток, который согласно расчёту с использованием программы, разработанной в НПП ВНИИЭМ, составляет 89 А. Обозначения фаз токов на рис.3 соответствуют чередованию фаз обмоток, обозначенных на рис.1, нулевой угол на рис.3 соответствует положению оси зубца с обмоткой фазы А напротив оси магнита, как это показано на рис.1. В

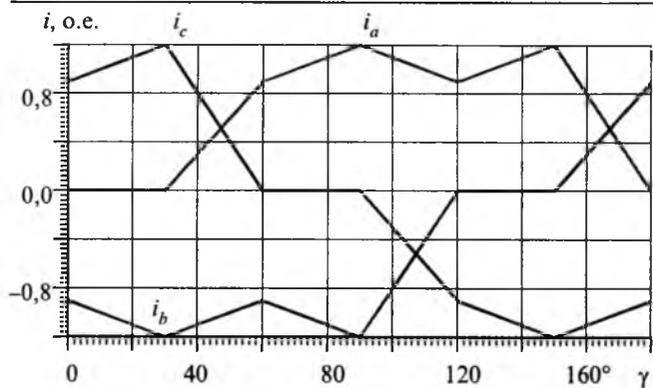


Рис.3. Фазные токи при угле коммутации 30°

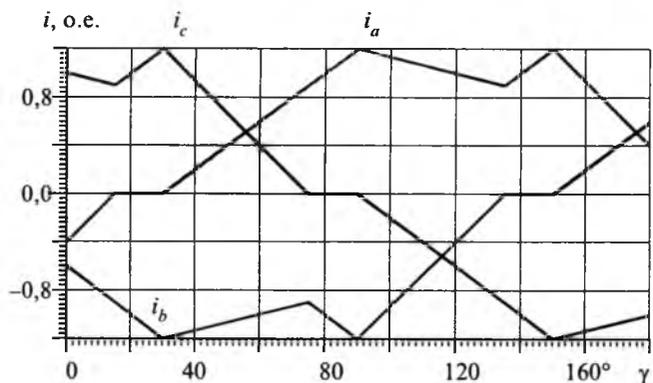


Рис.4. Фазные токи при угле коммутации 45°

режиме нагрузки для построения кривой потокоцепления магнитная система была рассчитана при восьми углах поворота γ в интервале $[0; \pi]$ электрических радиан, которые обозначены "ромбами" на рис.5. Базовые значения потокоцепления и ЭДС при нагрузке – те же, что и при ХХ.

- при угле коммутации 30° $B_{z \max} = 1,73$ Тл, т.е. 0,99 аналогичного значения при ХХ;
- при угле коммутации 45° $B_{z \max} = 1,80$ Тл, т.е. 1,03 аналогичного значения при ХХ.

В окрестности нулевого угла поворота отрицательный ток фазы А (рис.4) создает при угле коммутации 45° слабую намагничивающую реакцию якоря, что необходимо учитывать при расчёте магнитной системы ЭМ, особенно при высоких частотах перемагничивания сердечника, когда потери в стали играют *очень существенную* роль в сумме потерь. На действующем значении ЭДС это, однако, практически не сказывается. Форма ЭДС при угле коммутации 30° представлена на рис.5, её действующее значение составляет 95,9% действующего значения ЭДС ХХ, а при угле коммутации 45° – 96,5% действующего значения ЭДС ХХ.

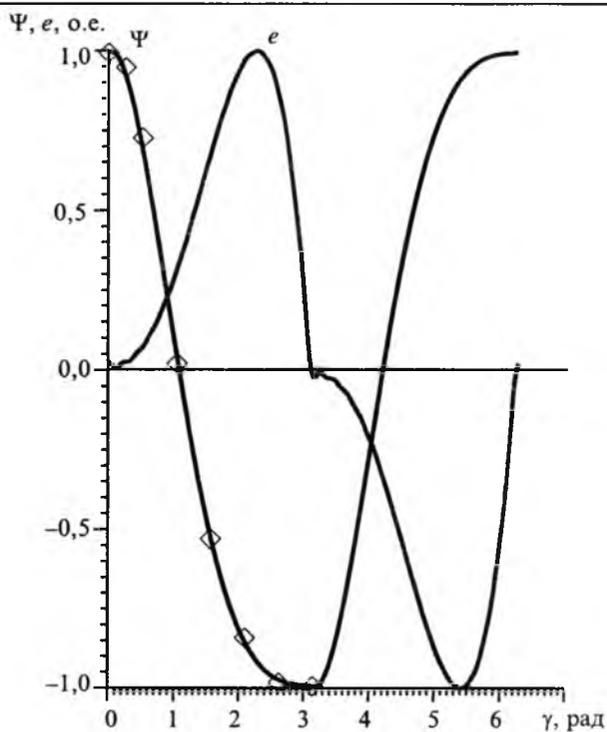


Рис.5. Период зависимостей потокоцепления и ЭДС от угла γ при угле коммутации 30°

В отличие от ХХ гармонический состав ЭДС при нагрузке имеет и синусные, и косинусные коэффициенты, поэтому расчёт коэффициента искажения синусоидальности смысла не имеет. К сожалению, форма ЭДС при нагрузке не может быть проверена экспериментально.

Выводы

1. При значительном номинальном токе расчёт магнитной системы электрической машины следует вести не только в режиме ХХ, но и с учётом реакции якоря при номинальной нагрузке.
2. В результате учёта увеличения индукции в зубцах при нагрузке, обоснованном выборе числа пар полюсов, а также номинальной частоты вращения так, чтобы эквивалентное сопротивление двигателя являлось согласующим сопротивлением длинной линии кабеля питания и управления, удалось спроектировать погружной синхронный магнитоэлектрический двигатель с высоким КПД – не ниже 92,5%.
3. Наиболее технологичная при малом внешнем диаметре двигателя сосредоточенная обмотка статора позволяет получить достаточно приемлемую синусоидальную форму зависимости ЭДС от угла поворота: коэффициент несинусоидальности не превышает 8%. Это даёт возмож-

ность не снижая вибрационные показатели привода нефтедобывающего насоса повысить его надёжность.

Список литературы

1. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003.

2. Захаренко А.Б., Авдонин А.Ф. Анализ магнитного поля и магнитодвижущей силы мотор-колеса // Электротехника. 2004. № 2. С. 27–32.

3. Захаренко А.Б. Оптимизация погружных синхронных электродвигателей // Электротехника. 2002. № 5. С. 50–55.

4. Лопатин В.В., Швецов Н.И., Мордвинов Ю.В., Глазкова Л.В. Многофазная синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов. Математическая модель электромагнитного расчёта. М.: Издательство НПП ВНИИЭМ, 1988.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980.

Захаренко Андрей Борисович – старший научный сотрудник ЗАО НПП "Инкар-М". Окончил электромеханический факультет МЭИ (ТУ) в 1995 г. В 1998 г. защитил кандидатскую диссертацию в области исследования асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными элементами.

Ёмкостные параметры и перенапряжения в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от ШИМ-преобразователя

БЕЛАССЕЛ МОХАНД-ТАХАР, БЕСПАЛОВ В.Я., ШЕТАТ БУХЕМИС

Изложена методика расчёта ёмкостных параметров и перенапряжений в обмотке асинхронного двигателя, питаемого от преобразователя частоты. Представлены математическая модель и результаты моделирования волновых процессов в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором.

Наиболее часто регулируемые электроприводы переменного тока строятся на базе асинхронных двигателей и преобразователей частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, формирование выходных напряжений которых осуществляют посредством ШИМ, т.е. серией импульсов прямоугольной формы.

В большинстве современных ПЧ используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) с частотой переключения 2–8 кГц. Длительность фронта импульсов определяется типом ключевых элементов преобразователя и может составлять 0,2–1 мкс.

Как известно из теории переходных процессов, подача на обмотку асинхронного двигателя (АД) импульса прямоугольной формы с большой скоростью нарастания вызывает протекание в обмотке волновых процессов (ВП). Под волновыми процессами следует понимать весь сложный комплекс физических явлений, сопровождающих возникновение, распространение и быстрое изменение электромагнитного поля цепи или системы. Эти явления вызывают в обмотке значительное перенапряжение, что отрицательно влияет на изоляцию двигателя, при

этом прочность и долговечность машины ухудшаются. Кроме того, при быстром нарастании напряженности электрического поля на фронте волны в изоляции машины возникают заметные электрические потери.

Изучению волновых процессов в электрических машинах и трансформаторах посвящено большое количество работ, которые ранее проводились в основном с целью поиска защиты от грозовых перенапряжений. Однако в настоящее время необходимо также рассматривать волновые явления в электрических машинах, работающих совместно с полупроводниковыми преобразователями частоты, и исследовать их влияние на изоляцию с целью прогнозирования надёжности и долговечности асинхронных двигателей. Для изучения этих явлений можно использовать современную компьютерную технологию, математическое моделирование и проводить эксперименты для оценки адекватности математических моделей, когда это можно сделать.

Целью данной работы является расчёт ёмкостных параметров и составление математических моделей для отыскания перенапряжения в разных точках обмотки АД. Для этого были

использованы размеры, обмоточные данные и свойства материалов АД, который выпускается фирмой "ELECTROINDUSTRIE.AZAZGA" (Алжир).

Методика расчёта ёмкостных параметров [1–6]

Расчёт ёмкостных параметров является одним из самых важных этапов в процессе математического моделирования волновых процессов в обмотках АД, от них зависит так называемое первоначальное распределение напряжения по ёмкостям обмотки. Схема замещения обмотки в этой стадии превращается в чисто ёмкостную цепь с входной ёмкостью $C_{вх}$.

Рассматриваемая асинхронная машина имеет всъшнюю двухслойную концентрическую обмотку со случайным расположением проводников в пазу. Для расчёта её ёмкостных параметров принимается ряд допущений:

1. Неоднородная изоляция в пазу АД заменяется однородной с учётом неплотного заполнения паза медью и изоляцией. Картина электрического поля отдельно взятого проводника при расчёте его ёмкости относительно корпуса или двух проводников при определении ёмкости между ними не зависит от остальных проводников.

2. Не учитывается влияние краевого эффекта в связи с тем, что электрическое поле в пазовой части мало искажается вблизи углов за счёт экранирующего влияния стенки паза, а наличие краевого эффекта в лобовых частях вносит небольшую погрешность.

3. Поперечная ёмкость секции принимается равной суммарной ёмкости относительно корпуса проводников, находящихся в наружном слое секции. Ёмкость проводников, лежащих во внутренних слоях, на несколько порядков меньше ёмкости проводников наружного слоя, так как ёмкость отдельного проводника относительно корпуса обратно пропорциональна квадрату расстояния до корпуса, а число проводников во внутренних слоях обычно меньше.

Число проводников наружного слоя секции, прилегающих к стенкам паза, может быть подсчитано по формуле:

$$n_i = \frac{P_n}{d'}, \quad (1)$$

где P_n – периметр свободной площади паза; d' – расстояние между центрами соседних проводников с учётом коэффициента заполнения паза (рис.1),

$$d' = 2 r_{из} \frac{1,075}{\sqrt{k_3}}, \quad (2)$$

где $r_{из}$ – радиус изолированного проводника обмотки.

Для нахождения ёмкости проводника относительно корпуса реальный проводник зеркально отображается относительно стенки паза (рис.1), исключается из рассмотрения стенка паза 1 и корпусная изоляция 2, а отображённый провод заменяется реальным. Расстояние между проводником обмотки и его отображением, необходимое для вычисления ёмкости этого проводника, находится по формуле:

$$d_1 = 2 \frac{1,075}{\sqrt{k_3}} (\delta_n + r_{из}), \quad (3)$$

где δ_n – толщина пазовой изоляции.

Расстояние между электрическими осями реального и отображённого проводников

$$a = \sqrt{d_1^2 - 4r^2}, \quad (4)$$

где r – радиус проводника без изоляции.

Тогда можно найти расстояния:

$$s_1 = d_1 - 2r; \quad s_2 = d_1 - 2r_{из}. \quad (5)$$

Ёмкость i -го проводника секции, прилегающего к стенке паза,

$$C_i \approx \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r\epsilon_{r1}}{\epsilon_r K_1 + (\epsilon_{r1} - \epsilon_r) K_2}, \quad (6)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая прони-

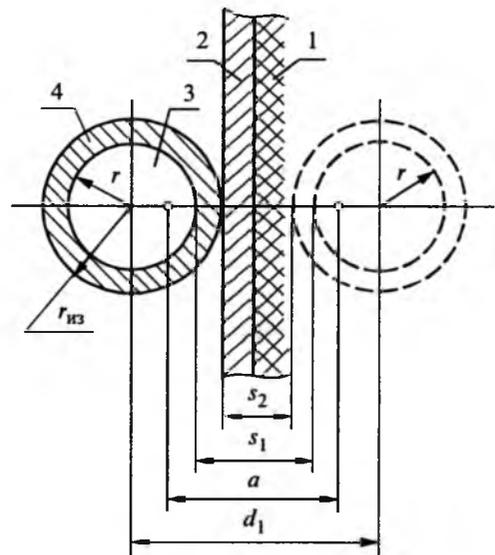


Рис.1. К определению ёмкости проводника относительно корпуса:

1 – стенка паза; 2 – корпусная изоляция; 3 – проводник; 4 – витковая изоляция

цаемость среды, окружающей изолированные провода; ϵ_{r1} – то же изоляции проводников;

$$K_1 = \ln\left(\frac{a + s_1}{a - s_1}\right); K_2 = \ln\left(\frac{a + s_2}{a - s_2}\right). \quad (7)$$

В качестве относительной диэлектрической проницаемости среды, окружающей изолированные провода, следует принимать среднее значение

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r2} + 1}{2}, \quad (8)$$

где ϵ_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость пропиточного лака; 1 – то же для воздуха.

Ёмкость секции определяется по формуле:

$$C_c = 2l_{\pi} n_i C_i, \quad (9)$$

где l_{π} – длина паза статора.

Ёмкость между смежными изолированными проводниками находится по (6) как $C_i/2$ с заменой d_1 на d' ; Продольная ёмкость секции, включая лобовые части,

$$K_c = \frac{K_i}{(w - 1)k_{\pi}} l_{\text{в}}, \quad (10)$$

где w – число эффективных проводников в пазу; $l_{\text{в}}$ – длина одного витка обмотки; $k_{\pi} \approx 0,08$ – статистический коэффициент перемешивания проводников при их насыпной укладке.

Ёмкость одной фазы обмотки статора относительно корпуса

$$C_{\phi} = K_2 \frac{Z}{6} C, \quad (11)$$

где Z – число пазов статора; $K_2 = 1,06$ для закрытых машин.

Входная ёмкость

$$C_{\text{вх}} = \frac{C_{\phi}}{2N} \sqrt{\frac{C + K}{C}}, \quad (12)$$

где N – число катушек в фазе.

Расчёт по данной методике даёт для исследуемого двигателя следующие значения:

$$C = 2652 \text{ пФ}, K = 51,12 \text{ пФ}, C_{\phi} = 22490 \text{ пФ}, C_{\text{вх}} = 1419 \text{ пФ}.$$

Таким образом, входная ёмкость составляет около 6,31% ёмкости фазы: $C_{\text{вх}} = 0,0631 C_{\phi}$, что считается вполне удовлетворительным.

Здесь междуфазная ёмкость не учитывается, так как значение волнового напряжения, индуктированного в соседней фазе, незначительно [2].

Расчёт перенапряжений в обмотках [7–11]

Для того, чтобы аналитически рассчитать перенапряжение в обмотке АД, необходимо решить дифференциальное уравнение ВП, которое записывается для схемы замещения (рис.2).

Распределение напряжений в рассматриваемой схеме описывается уравнением в частных производных гиперболического типа:

$$K \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} + g \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \Gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - G \frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad (13)$$

$$g = 1/R, \Gamma = 1/L.$$

Здесь координата x непрерывно изменяется в пределах $0 \leq x \leq l$, l – длина проводников параллельной ветви фазы обмотки. Условно принимаем за положительное направление изменения координаты x противоположное движению падающей волны, т.е. от конца обмотки ($x = 0$) к ее началу ($x = l$).

Все параметры, входящие в это уравнение, приведены к единице длины. Поэтому размерности параметров будут:

- для продольной ветви
индуктивность $L = \Omega/m$;
сопротивление $R = \Omega/m$;
продольная ёмкость $K = \Phi m$;
- для поперечной ветви
поперечная ёмкость $C = \Omega/m$;
проводимость $G = 1/(\Omega m)$.

Уравнение было решено методом Фурье. Для этого были предварительно заданы начальные и граничные условия, определяющиеся физической природой явлений в обмотке, а также схемой соединения. Они были сформулированы следующим образом: на обмотку падает волна напряжения, характеризуемая уравнением:

$$u_{\text{имп}}(t) = U(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \text{ при } t > 0, \quad (14)$$

где U – амплитуда импульса, равная 10 В; α и β – некоторые постоянные, $\alpha = 2,6 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

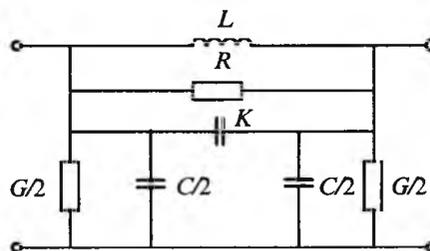


Рис.2. Схема замещения одного звена фазы обмотки АД

Начальные условия считались нулевыми. Такое состояние характеризуется следующим уравнением:

$$\frac{\partial^3 u(x,0)}{\partial^2 x \partial t} = \gamma^2 \frac{\partial u(x,0)}{\partial t}, \quad (15)$$

где $\gamma = \sqrt{C/K}$.

Конец обмотки изолирован, граничные условия следующие:

- для начала обмотки $U(l,t) = u_{\text{имп}}(t)$;
- для конца обмотки ($x = 0$)

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0. \quad (16)$$

Следует отметить, что при решении уравнений методом Фурье было принято учитывать зависимость параметров R , L и G от частоты методом итераций [3].

Результаты моделирования представлены на рис.3-5.

Как видно из рис.1, ВП в обмотке начинается с резкого увеличения напряжения из-за быстрого нарастания напряжения исходного импульса и заряда продольной и поперечной ёмкостей обмотки. Как только значение напряжения исходного импульса перестаёт изменяться, начинается колебательный процесс из-за влияния индуктивности обмотки на ВП, последняя стадия процесса, это затухание колебаний за счёт влияния сопротивления обмотки.

На рис.4 представлено распределение напряжения по длине параллельной ветви для разных моментов времени. Можно заметить, что оно становится более равномерным с увеличением времени ВП.

На рис.5 показана зависимость пиковых значений напряжений от номера секций, позволяющая определить участки обмотки, для которых перенапряжения представляют наибольшую опасность.

Выводы

1. При поступлении на обмотку АД импульсов напряжения прямоугольной формы, схожих по форме с импульсами при частотном управлении от ШИМ, в ней возникают ВП. При этом расчётные перенапряжения по данному методу превышают напряжение исходного импульса. Расчёт многих вариантов показал, что эти перенапряжения могут достигать значений, в 2 раза превышающих амплитуду входного напряжения, а процесс в любой точке обмотки имеет характер затухающего колебания (рис.3,4).

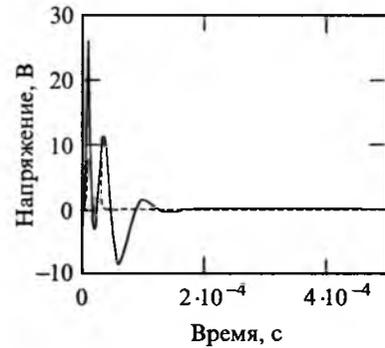


Рис.3. Волновой процесс в фазе обмотки двигателя: — — напряжение на конце фазы обмотки; - - - - поступающий на обмотку импульс



Рис.4. Распределение напряжения по длине параллельной ветви для разных моментов времени: — — $t = 5 \cdot 10^{-6}$ с; $t = 15 \cdot 10^{-6}$ с; - - - - $t = 35 \cdot 10^{-6}$ с; — · — $t = 3 \cdot 10^{-4}$ с

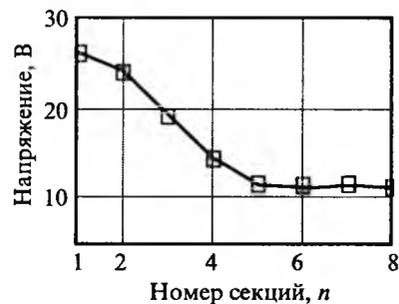


Рис.5. Зависимость значений максимальных напряжений от номера секций

2. Изменение напряжения имеет замедленный характер в конце обмотки (рис.5).

3. Так как перенапряжения в машинах, питаемых от ШИМ-преобразователей, являются опасными для изоляции машины, целесообразно предусмотреть меры защиты от них [9,11].

Список литературы

1. Каганов З.Г. Волновые явления в электрических машинах. Новосибирск: АН СССР, 1964.
2. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. М.: Энергия, 1970.
3. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Геллер Б., Веверка А. Импульсные процессы в электрических машинах. М.: Энергия, 1973.
5. Горбунов Ю.К. Ёмкостные параметры выспной обмотки статора асинхронных двигателей// Электротехника. 1978. № 9.
6. Guardado J.L., Cornik K.J. Calculation of Machine Winding Electrical Parameters At High Frequencies for Switching Transient Studies//IEEE Trans. on Energy Conversion. 1996. Vol.11, №1.
7. Горбунов Ю.К. Расчёт собственных и взаимных активно-индуктивных волновых параметров катушек обмотки статора электрических машин// Изд. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1978. Вып. 1, №3.
8. Binder A. Armature Insulation Stress Of Low Voltage A.C. Motors Due To Inverter Supply// SIEMENS. Bad Neustadt. Germany). С.5.
9. Toliyat H.A., Suresh G., Abur A. Estimation of Voltage Distribution On The Fed Random Wound Induction Motor Winding Supplied Through Feeder Cable // IEEE Power Engineering Review 1999. Vol. 19, № 1. P.56–59.

10. Беспалов В.Я., Зверев К.Н. Импульсные перенапряжения в обмотках асинхронных двигателей при питании от ШИМ преобразователя // Электротехника. 1999 № 9. С.56.
11. John D. Kueck, Howard D. Haynes, Robert H. Stfuntjn. Stator Insulation Degradation test uses ASD switching Frequency//IEEE Power Engineering, 2002. Vol. 22, № 1. P.7–11.

Белассел Моханд-Тахар – сотрудник департамента "Электротехника" Тизиузовского университета (Алжир), член Научно-исследовательской лаборатории электрификации промышленных предприятий Бумердасского (BOUMERDES) университета. В 1993 г. защитил "Magister" по электротехнике в Тизиузовском университете (Алжир).

Беспалов Виктор Яковлевич – профессор кафедры электромеханики МЭИ. Окончил в 1960 г. электромеханический факультет МЭИ. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Асинхронные машины для динамических режимов работы".

Шетат Бухемис – директор Научно-исследовательской лаборатории электрификации промышленных предприятий Бумердасского (BOUMERDES) университета (Алжир). Кандидатскую диссертацию защитил в МЭИ в 1989 г. В 1997 г. Государственная межвузовская комиссия присвоила звание доктора техн. наук.

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Электротепловая модель коаксиальной индукционно-резистивной системы нагрева¹

КУВАЛДИН А.Б., СТРУПИНСКИЙ М.Л., ХРЕНКОВ Н.Н., ШАТОВ В.А.

Описаны устройство, принцип действия и область применения индукционно-резистивной системы нагрева (ИРСН). Предложена математическая модель для расчёта электрических и тепловых параметров ИРСН, позволяющая проводить расчёт с учётом взаимного влияния электромагнитного и температурного полей системы. Приведены примеры расчёта параметров ИРСН по предложенной модели.

Начиная с середины XX в. в практике низкотемпературного нагрева применяются коаксиальные нагреватели – устройства, состоящие из стальной ферромагнитной трубы и расположенного внутри неё проводника с нагревостойкой изоляцией (рис.1). Проводник, выполненный обычно из меди, алюминия или стали, в конце системы электрически соединяется со стальной

In this paper the structure, main principles of operation and field of application of the induction – resistance system of heating (IRSH) are described. The mathematical model for the calculation of the electrical and thermal parameters of IRSH is offered, this model allows finding a solution taking into account both electromagnetic and thermal fields of this system. The examples of the calculation of basic electromagnetic and thermal parameters of the IRSH according to the offered model are given.

трубой, а в начале между трубой и проводником подается напряжение от источника питания. В силу эффекта близости ток протекает по внутреннему слою трубы, и падение напряжения на поверхности трубы при толщине стенки, равной, по крайней мере, трём глубинам проникновения электромагнитной волны, незначительно. При частоте 50 Гц и геометрических размерах: диаметр трубы 20–60 мм, толщина стенки трубы 3–4 мм, сечение проводника 10–70 мм² это падение напряжения составляет около 10 мВ на метр

¹ Печатается в порядке обсуждения.

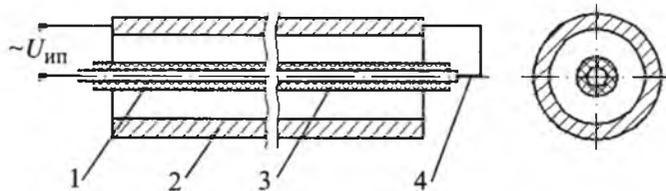


Рис. 1. Индукционно-резистивная система нагрева:
1 – проводник; 2 – стальная труба; 3 – электрическая изоляция; 4 – электрическое соединение

длины системы. Это делает нагреватель электробезопасным. В зависимости от тока, используемых материалов и конструктивного исполнения линейная мощность коаксиальных нагревателей обычно составляет от 15 до 400 Вт/м, при этом в трубе выделяется до 80% мощности системы. Остальная часть мощности выделяется в проводнике. С учётом принципа действия коаксиальных нагревателей системы с их использованием предлагается называть индукционно-резистивными системами нагрева (ИРСН).

Устройства, реализующие схему ИРСН, особенно эффективны при нагреве металлических объектов. В этом случае нагреватель может привариваться к металлической поверхности, что обеспечивает хороший тепловой контакт. При этом сама поверхность заземляется, что обеспечивает высокую электробезопасность. ИРСН могут применяться для обогрева трубопроводов, железнодорожных и трамвайных стрелочных переводов и других объектов. Существуют специальные конструкции ИРСН для разогрева мерзлого грунта. В этих случаях требуемая технологическая температура нагрева не превышает 100°C, хотя температура на проводнике внутри трубы может быть существенно выше [1, 2].

Для успешного проектирования ИРСН необходимо располагать эффективной методикой расчёта её электрических и тепловых параметров. Сложность расчёта ИРСН заключается в необходимости учёта нелинейной зависимости относительной магнитной проницаемости ферромагнитной стали (материала трубы) от напряжённости магнитного поля и зависимости удельных электрических сопротивлений материалов трубы и проводника от температуры.

Исходными данными для расчёта являются геометрические параметры системы, физические параметры материалов элементов системы, а также один из электрических параметров: ток, напряжение питания или активная мощность на погонный метр системы. Для теплового расчёта задаются условия отвода теплоты от нагре-

вательной системы. В результате расчёта должны быть получены активная мощность на погонный метр, ток, напряжение питания, коэффициент мощности, общая активная мощность системы, активная мощность в кабеле на погонный метр, активная мощность в трубе на погонный метр. Также должны быть определены температуры кабеля и трубы в установившемся режиме работы системы.

Для расчёта электрических параметров индукционно-резистивной нагревательной системы авторами статьи использован метод МЭИ [3]. Это аналитический метод, который разработан специально для расчёта систем "индуктор – нагрузка" и заключается в разбиении рассматриваемой системы на отдельные участки с последующим определением активных P_i и реактивных P_{qi} мощностей электромагнитного поля на каждом участке. Эти величины рассчитываются путём решения дифференциальных уравнений, описывающих распространение электромагнитной волны.

При расчёте ИРСН методом МЭИ приняты следующие допущения:

1. Проводник и труба расположены коаксиально.

2. Отношение толщины стенки к глубине проникновения электромагнитной волны для трубы не менее 3 (при этом труба может рассматриваться как полубесконечное тело [3]).

3. Относительная магнитная проницаемость μ постоянна по толщине стенки трубы и равна некоторому эквивалентному значению. Это эквивалентное значение μ определяется в зависимости от значения напряжённости магнитного поля H на внутренней поверхности трубы по усредненной кривой $\mu(H)$ для конструкционных сталей, приведенной в [1]. Допущение 3 оправдано тем, что ИРСН работает в области значений зависимости $\mu(H)$ вблизи от экстремума и при этом вносимая погрешность не превышает допустимых значений.

4. Поверхностный эффект в проводнике не учитывается, так как его диаметр обычно не превышает глубину проникновения в данный материал (медь, алюминий). При использовании в качестве центрального проводника ферромагнитной стали вводится поправка в значение сопротивления проводника, учитывающая неравномерность распределения плотности тока по его сечению.

С учётом принятых допущений для решения электрической задачи использовано дифференциальное уравнение электромагнитной волны в

полубесконечном проводящем теле при одномерной постановке задачи:

$$\frac{d^2 \dot{H}}{dz^2} = j \frac{2 \pi f \mu \mu_0}{\rho} \dot{H}. \quad (1)$$

В уравнении (1) H – напряжённость магнитного поля, А/м; z – координата по пространственной оси, направленной в глубину полубесконечного тела; f – частота тока, Гц; μ – относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Граничные условия для (1): на поверхности тела $H_{z=0} = H_0$, в глубине тела $H_{z=\infty} = 0$.

Расчёт температур проводника и трубы ИРСН проводится следующим образом. Так как длина ИРСН намного больше её диаметра, при тепловом расчёте теплообменом через торцы системы можно пренебречь и рассматривать только поперечное сечение. Геометрическая модель ИРСН, использованная в тепловом расчёте, приведена на рис.2. Сечение системы поделено на четыре области: 1 – проводник, 2 – изоляция проводника, 3 – воздушный зазор между проводником и трубой, 4 – труба. Стрелками показан тепловой поток. Считая, что проводник и труба расположены коаксиально, расчёт температурного поля в областях 1, 2, 3 и 4 можно свести к одномерной осесимметричной тепловой задаче, решаемой в полярной системе координат.

Уравнение теплопроводности для одномерной задачи в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{W}{c_T \gamma}, \quad (2)$$

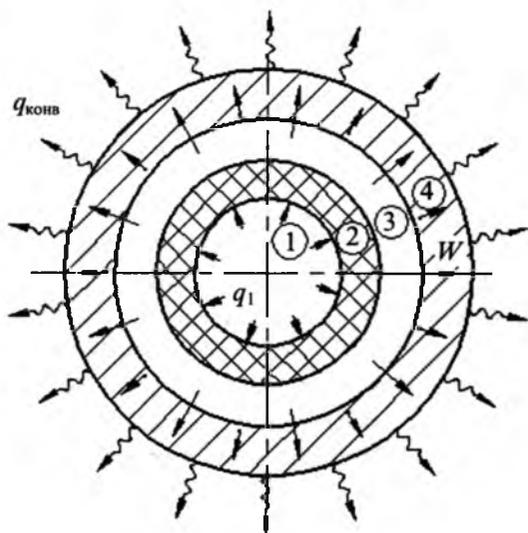


Рис.2. Геометрическая модель ИРСН для теплового расчёта

где $a = \frac{\lambda}{c_T \gamma}$ – температуропроводность; c_T –

удельная теплоемкость; λ – теплопроводность; γ – плотность; τ – время; W – удельная объёмная мощность, выделяющаяся при протекании электрического тока; r – координата по радиусу.

Значения W отличны от нуля только в тех областях, в которых протекает электрический ток. Так как в расчётной модели проводник не рассматривается, единственной такой областью остается стенка трубы. Значения удельной объёмной мощности в стенке трубы определяются при электрическом расчёте.

Уравнение (2) справедливо при следующих допущениях:

1. Нагревательная система считается осесимметричной и бесконечно длинной, т.е. теплообмен на торцах системы не учитывается. Таким образом, расчёт температур элементов системы представляет собой одномерную задачу.

2. Так как теплопроводность медного проводника намного больше теплопроводности его изоляции и теплопроводности воздушного зазора, температура по сечению проводника принимается равномерной и проводник (область 1) в расчётной модели не рассматривается. При этом мощность, выделяющаяся в проводнике, пересчитывается в тепловой поток q_1 , входящий в изоляцию проводника.

3. Воздушный зазор между проводником и трубой мал, поэтому предполагается, что теплопередача через этот зазор происходит только за счёт теплопроводности. При необходимости конвекцию воздуха в зазоре можно учесть заданием эквивалентного значения теплопроводности воздуха.

4. Теплофизические параметры элементов ИРСН приняты постоянными (не зависящими от температуры).

Таким образом, при тепловом расчёте ИРСН ищется решение уравнения (2) в областях 2, 3 и 4 со следующими граничными условиями.

1. Граничное условие на границе областей 1 и 2 – тепловой поток, входящий в изоляцию проводника,

$$q_1 = -\lambda_{из} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_1},$$

где $\lambda_{из}$ – теплопроводность изоляции проводника; R_1 – радиус проводника без изоляции.

2. Граничное условие на границе области 4 и окружающей среды – теплообмен на наружной поверхности трубы. На наружной поверхности

трубы может задаваться либо конвективный теплообмен (когда система находится в воздухе), либо температура (система прикреплена к поверхности нагреваемого до заданной температуры объекта $T_{об}$).

Граничное условие для конвективного теплообмена:

$$\alpha(T_{окр} - T_{тр}) = -\lambda_{тр} \frac{\partial T}{\partial r},$$

где $\lambda_{тр}$ – теплопроводность трубы; $T_{тр}$ – температура на наружной поверхности трубы; $T_{окр}$ – температура окружающей среды.

Граничное условие при задании температуры наружной поверхности трубы:

$$T_{тр} = T_{об},$$

где $T_{об}$ – заданная температура нагреваемого объекта.

При задании в качестве граничного условия температуры наружной поверхности трубы предполагается, что труба и нагреваемый объект имеют одинаковую температуру (например, труба приварена к поверхности нагреваемого объекта и таким образом обеспечен хороший тепловой контакт).

Для решения уравнения (2) применен метод конечных разностей. При расчёте методом конечных разностей система разбивается по радиусу на равные части с шагом h . В рассматриваемой пространственно-временной области вместо функции непрерывного аргумента вводится её разностный аналог, определённый в конечном числе точек сетки, покрывающей область. Дифференциальные операторы заменяются соответствующими алгебраическими конечно-разностными выражениями. В итоге исходное дифференциальное уравнение и граничные условия аппроксимируются системой разностных уравнений. Результатом решения этих уравнений являются значения искомой функции в узлах сетки.

При работе ИРСН по мере роста температуры проводника и трубы происходит увеличение их удельного электрического сопротивления, что заметно влияет на характеристики системы. Для обеспечения быстрого и удобного проведения расчёта электрических и тепловых параметров с учётом их взаимного влияния друг на друга была разработана электротепловая модель ИРСН. Задача определения электрических и тепловых параметров разбивается на две подзадачи: расчёт электрических параметров (электрическая задача) и расчёт тепловых параметров (тепловая задача).



Рис.3. Блок-схема алгоритма электротепловой модели ИРСН

Алгоритм электротепловой модели основан на последовательном решении в цикле электрической и тепловой задач и отыскании окончательного решения посредством итераций. Сначала вычисляются значения удельных электрических сопротивлений проводника и трубы для температуры 20°C. Затем происходит последовательное решение электрической и тепловой задач. Если новое, вычисленное при решении тепловой задачи значение температуры проводника отличается от предыдущего более чем на 0,5°C, происходит коррекция удельных электрических сопротивлений проводника и трубы, и расчёт повторяется. Блок-схема алгоритма электротепловой модели ИРСН представлена на рис.3. Как показали многочисленные расчёты по

данной модели, в подавляющем большинстве случаев итерационный процесс сходится за 1–3 итерации. Но при определенных условиях теплообмена системы с окружающей средой процесс перестает сходиться до 0,5°C, а сходится до 1–3°C. С целью предотвращения возможного "зацикливания" программы в алгоритм введено ограничение на число итераций. Если количество итераций превышает 10, то расчёт завершается и выдается сообщение о плохой сходимости.

Разработанная электротепловая модель реализована в виде программы "IRSN" для персонального компьютера.

При экспериментальной проверке адекватности электротепловой модели IRSN были проведены испытания на макетах системы с трубами диаметром от 38 до 48 мм. Экспериментально определенные электрические параметры системы сравнивались с результатами расчёта по программе "IRSN". Все измеренные и рассчитанные величины переводились в удельные (на метр длины системы).

В качестве примера показаны рассчитанные по электротепловой модели зависимости активной мощности и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от тока для образца IRSN со стальной трубой диаметром 42,4 мм и толщиной стенки 3,5 мм (рис.4). Проводник медный, сечением 40 мм². На графики с расчётными характеристиками нанесены точки, полученные экспериментально. Видна хорошая сходимость расчётных и экспериментальных данных для линейной активной мощности образца 1. Расчётные и экспериментальные значения $\cos \varphi$ сходятся хуже, но достаточно близки. Напряжение на метр длины на поверхности трубы, которое определялось только экспериментально, лежало в пределах от 2 до

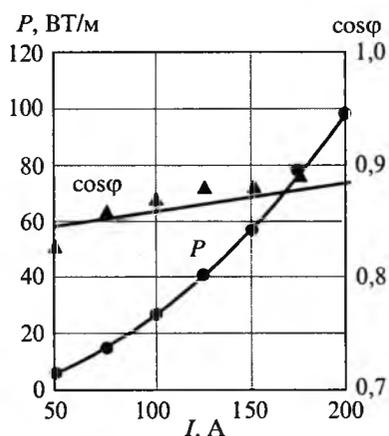


Рис.4. Расчётная и экспериментальная зависимости линейной мощности и $\cos \varphi$ образца 1 IRSN от тока

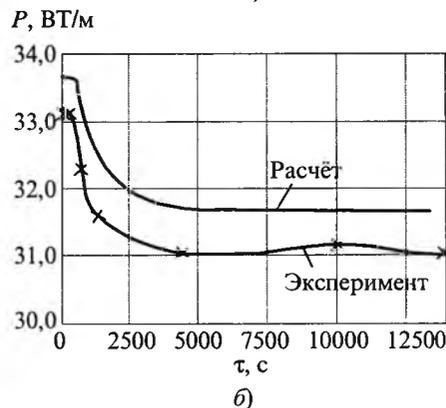
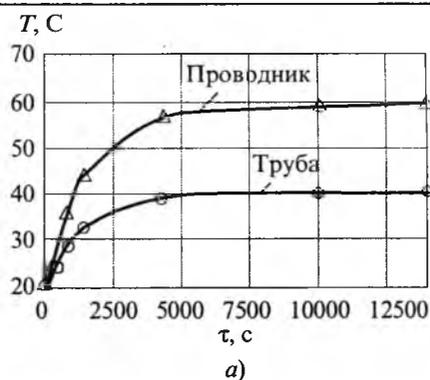


Рис.5. Изменение температуры и мощности образца 2 IRSN в процессе разогрева:

а – экспериментально полученные значения температур проводника и трубы в процессе разогрева; б – экспериментальная и расчетная зависимости изменения линейной мощности в процессе разогрева

8 мВ/м, что существенно меньше напряжения питания и неопасно для персонала.

Моделирование процесса разогрева демонстрируется на образце 2 IRSN. Моделируемый процесс был проведен на макете системы со следующими параметрами: наружный диаметр трубы 42 мм; толщина стенки трубы 3,2 мм; материал трубы – низкоуглеродистая сталь; сечение проводника 15 мм²; материал проводника – медь. Макет IRSN был установлен в закрытом помещении, температура в котором составляла +20°C. Напряжение питания макета на метр длины $U = 0,38$ В/м. На рис.5,а представлены измеренные значения температур проводника и трубы в процессе разогрева макета.

С помощью электротепловой модели произведен расчёт мощности системы в процессе разогрева. Коэффициент теплоотдачи с поверхности трубы принят равным 12 Вт/(м²·К). Результаты расчёта мощности представлены на рис.5,б. Здесь же изображена экспериментальная зависимость мощности макета IRSN на метр длины от времени. При разогреве IRSN мощность уменьшается, что связано с увеличением сопро-

тивления проводника и трубы. Так как в рассмотренном примере изменение температур проводника и трубы относительно невелико, уменьшение мощности также незначительно.

За точность расчёта параметров ИРСН принято максимальное различие между рассчитанными и экспериментально определенными значениями активной мощности, зафиксированное в ходе экспериментов. Установлено, что максимальная погрешность расчёта электрических параметров ИРСН не превышает 13%, причём основная причина расхождений рассчитанных и экспериментально полученных параметров ИРСН заключается в неточности вводимой в расчёт зависимости относительной магнитной проницаемости стали от напряжённости магнитного поля, так как магнитные свойства труб даже из одной марки стали, но из разных партий, поставляемых заводами-изготовителями, заметно различаются. В целом, по результатам экспериментальной проверки можно сделать вывод, что электротепловая модель ИРСН является адекватной, и получаемые результаты позволяют проектировать нагревательные системы с достаточной для практики точностью.

Главным результатом проведенной работы является программа "IRSN", реализующая разработанную электротепловую модель. С помощью этой программы можно производить электрический и тепловой расчёт индукционно-резистивных нагревательных систем. Предоставляемые программой "IRSN" возможности по выводу и сохранению рассчитанных данных дела-

ют процесс оформления результатов расчёта удобным для пользователя. Интуитивно понятный интерфейс позволяет освоить программу в короткий срок.

При разработке программы "IRSN" большое внимание было уделено созданию легкого в освоении и удобного в использовании интерфейса, введению в программу ряда функций, полезных как для исследователя, так и для проектировщика.

Список литературы

1. Кувалдин А. Б. Индукционный нагрев магнитной стали на промышленной частоте // Итоги науки и техники. Электротехнология. М.: Изд-во ВИНТИ, 1976.
2. Низкотемпературный электронагрев // Под ред. А. Д. Свенчанского. М.: Энергия, 1978.
3. Кувалдин А. Б. Теория индукционного и диэлектрического нагрева. М.: Изд-во МЭИ, 1999.
4. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.

Кувалдин Александр Борисович – профессор МЭИ, доктор техн. наук. Окончил МЭИ в 1959 г. Защитил докторскую диссертацию "Устройства для индукционного нагрева ферромагнитной стали".

Струпинский Михаил Леонидович – директор ООО ССТ, канд. техн. наук. Окончил МВТУ.

Хренков Николай Николаевич – технический директор ООО ССТ, доктор электротехники. Окончил электромеханический факультет ЛПИ в 1962 г. Защитил диссертацию по теме "Конструкция и технология сверхпроводящих радиочастотных кабелей" в 1974 г.

Шатов Виталий Александрович – аспирант МЭИ. Окончил ИЭТ МЭИ в 2003 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчёт объёмно-компенсирующей способности гофрированных баков герметичных трансформаторов

АРХИПОВ А.С.

Предлагается аналитическая методика для проведения поверочного расчёта объёмно-компенсирующей способности гофрированных баков герметичных трансформаторов. Даются рекомендации по практическому применению методики.

Analytic method of calculation of capacity-compensating ability of sealed transformer's corrugated tanks is suggested. Recommendation for use in practice are given.

В последнее десятилетие отечественной промышленностью (а за рубежом и ранее) освоен выпуск герметичных трансформаторов в гофрированных баках. Основным конструктивным

отличием таких трансформаторов от трансформаторов классической конструкции (с расширителем и радиаторами) является гофрированный бак и полная герметичность. Внешний вид

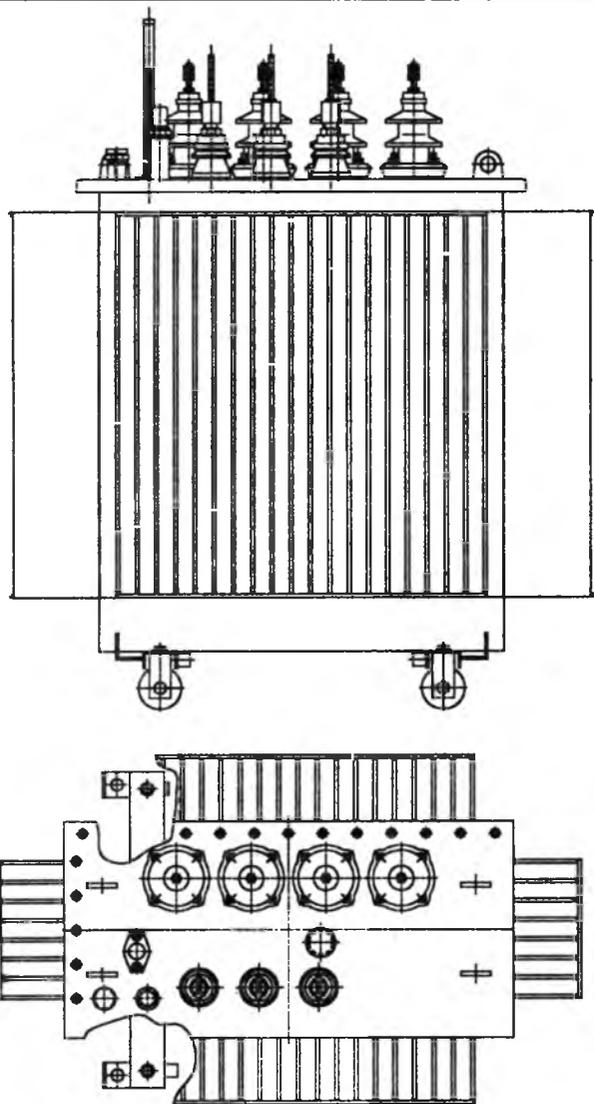
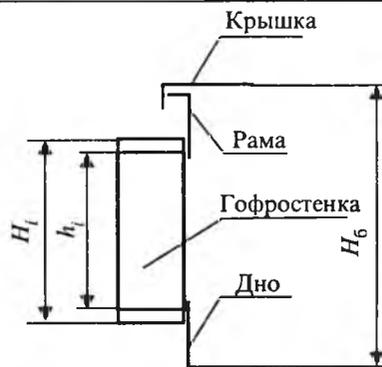


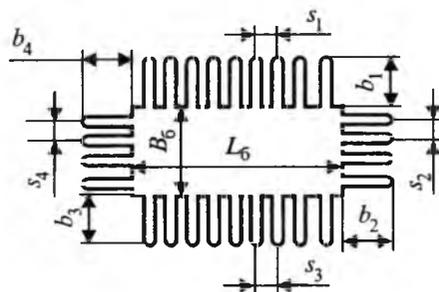
Рис.1. Внешний вид герметичного трансформатора в гофрированном баке

трансформатора в гофрированном баке показан на рис.1. Стенки гофрированного бака выполнены в виде ряда волн (гофров) из тонколистовой упругой конструкционной стали. Гофры выполняют двойную функцию: теплообменников, отводящих тепло от трансформатора, и компенсаторов колебаний объёма трансформаторного масла, происходящих при изменении температуры масла. При такой конструкции трансформатор обладает меньшими габаритными размерами, чем трансформатор классической конструкции, а за счёт герметичности – отсутствия контакта трансформаторного масла с воздухом – предотвращается его окисление и увлажнение, при этом трансформатор не нуждается в обслуживании в течение всего срока службы.

Несмотря на распространённость герметичных трансформаторов, ощущается нехватка ин-



а)



б)

Рис.2. Основные геометрические размеры гофробака:
а – строение бака по высоте; б – размеры бака в плане

формации, касающейся особенностей их проектирования: теплового и механического расчётов.

В настоящей статье предлагается аналитический метод расчёта объёмно-компенсирующей способности гофробака при его деформациях, обусловленных температурными колебаниями объёма трансформаторного масла.

Рассмотрим расчётную модель гофробака (рис.2), а также модель одного гофра (рис.3). Стенки бака, имеющего прямоугольную форму в плане, выполнены из гофростенок имеющих определённое количество гофров. В общем случае количество гофров и их размеры могут быть неодинаковыми по сторонам бака, однако на практике баки выполняют из гофростенок равной высоты и с равным внутренним просветом. Введём следующие обозначения размеров бака и гофров:

L_6 – длина бака; B_6 – ширина бака; H_6 – высота бака; $i = 1, 2, 3, 4$ – индекс номера стороны бака; H_i – конструктивная высота гофростенки; h_i – эффективная высота гофростенки (меньше конструктивной высоты за счёт сварочных "защипов"); n_i – количество гофров на стороне i бака; b_i – ширина гофры на стороне i бака; d –

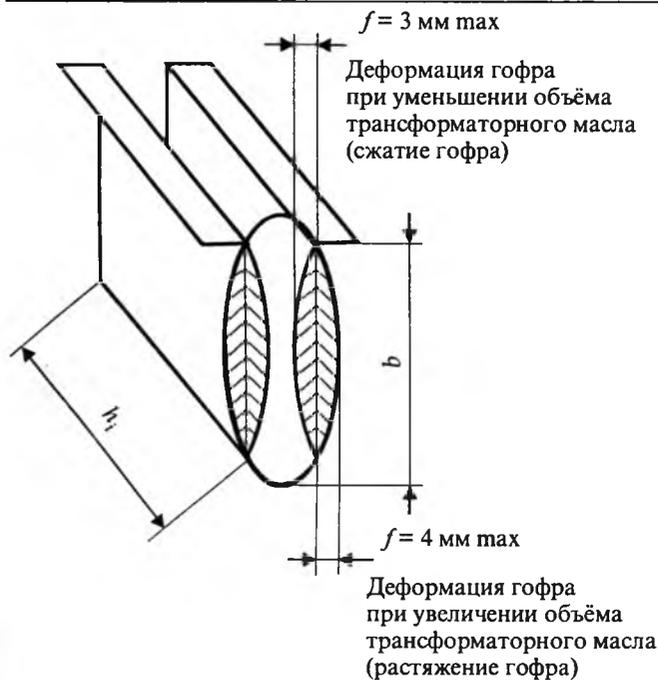


Рис.3. Модель деформации гофростенки

внутренняя ширина (просвет) недеформированного гофра; f_i – расчётная деформация гофра.

В технических задачах деформацию тонкой пластинки (какой является стенка гофра) часто представляют в виде половины периода гармонической функции¹ (рис.4):

$$f(x) = f_0 \sin\left(\frac{\pi}{b} x\right), \quad (1)$$

где $f(x)$ – прогиб пластинки в точке с координатой x ; f_0 – максимальный прогиб.

Необходимо отметить, что представление деформированной стенки гофра выражением (1) будет справедливо только при бесконечной высоте гофра и равномерной деформации по высоте гофра. В практических же расчётах при соразмерности высоты и ширины гофров необходимо учитывать неравномерность деформации по высоте. В этом случае выражение (1) необходимо модифицировать так, чтобы представить деформацию тонкой пластинки как функцию двух координат:

$$f(x, y) = f_0 \sin\left(\frac{\pi}{b} x\right) \sin\left(\frac{\pi}{h} y\right). \quad (2)$$

Интегрируя функцию, описывающую деформацию, определим дополнительный объём, возникающий при деформации:

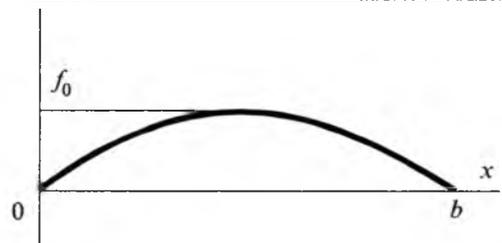


Рис.4. Представление деформированной гофростенки половиной периода гармонической функции

$$V_{\text{доп}} = \int_0^b \int_0^h f(x, y) dx dy = \int_0^b \int_0^h f_0 \sin\left(\frac{\pi}{b} x\right) \sin\left(\frac{\pi}{h} y\right) dx dy = \frac{4}{\pi^2} b h f_0. \quad (3)$$

Таким образом, задача теоретически решена. Для практического же применения необходимо сделать ряд замечаний.

Во-первых, дополнительный объём при деформировании одного гофра образуется двумя поверхностями и будет вдвое больше, чем определяется выражением (3).

Во-вторых, суммарный дополнительный объём бака будет определяться суммированием дополнительных объёмов от каждой гофростенки по всем четырём сторонам бака.

И, в-третьих, необходимо учесть, что, как отмечалось, на каждой из сторон бака может быть расположено различное количество гофров, имеющих различную ширину и высоту. Очевидно, что гофры различной ширины и высоты будут деформироваться пропорционально своим ширине и высоте. Введём единичную деформацию D_0 , через которую будут определяться реальные прогибы гофростенок на стороне i бака:

$$f_i = D_0 b_i h_i. \quad (4)$$

Таким образом задача определения деформации гофростенок бака сводится к определению единичной деформации D_0 .

С учётом сделанных замечаний и выражения (3) можно записать выражение для суммарного дополнительного объёма:

$$V_{\text{доп.бак}} = \sum_{i=1}^4 2 \frac{4}{\pi^2} b_i h_i f_i = \sum_{i=1}^4 2 \frac{4}{\pi^2} D_0 b_i^2 h_i^2, \quad (5)$$

откуда единичная деформация

$$D_0 = \frac{V_{\text{доп.бак}}}{\frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^4 b_i^2 h_i^2}. \quad (6)$$

Для её вычисления необходимо приравнять суммарный дополнительный объём бака, возник-

¹ Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Машгиз, 1956.

кающий при деформации гофростенок $V_{\text{доп.бак}}$ температурному колебанию объёма трансформаторного масла при нагреве $V_{\text{нагр}}$ или при охлаждении $V_{\text{охл}}$.

Объём масла в трансформаторе определяется как разность между объёмом бака и объёмом активной части, расположенной внутри бака.

Первоначальный объём гофробака

$$V_6 = L_6 B_6 H_6 + \sum_{i=1}^4 \left[n_i \left(\left(b_i - \frac{d}{2} \right) d + \frac{\pi d^2}{8} \right) h_i \right]. \quad (7)$$

В (7) первое слагаемое соответствует объёму собственно бака, а второе – объёму внутренних полостей гофров, определяемому суммированием по всем сторонам бака.

Объём активной части $V_{\text{ча}}$ определяется по результатам конструктивной проработки трансформатора. Тогда объём масла в трансформаторе

$$V_m = V_6 - V_{\text{ча}}. \quad (8)$$

Колебания объёма трансформаторного масла при нагреве и охлаждении будут определяться как:

$$V_{\text{нагр}} = V_m \beta_{\text{нагр}} \Delta t_{\text{нагр}}; \quad (9)$$

$$V_{\text{охл}} = V_m \beta_{\text{охл}} \Delta t_{\text{охл}}, \quad (10)$$

где $\beta_{\text{нагр}} = 7,11 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\beta_{\text{охл}} = 6,73 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ – средние коэффициенты объёмного расширения трансформаторного масла соответственно при нагреве и охлаждении; $\Delta t_{\text{нагр}}$, $\Delta t_{\text{охл}}$ – колебания температуры трансформаторного масла соответственно при нагреве и охлаждении относительно температуры заливки масла.

Определив по формулам (9) и (10) колебания объёма трансформаторного масла, рассчитываем единичные деформации по формуле (6), откуда по формуле (4) находим искомые максимальные прогибы гофростенок. Задача решена.

В завершение необходимо указать, что, как показывает практика, получаемые значения прогибов не должны превышать 4 мм при нагреве и 3 мм при охлаждении для гофростенок шириной 100 мм. При получении деформаций, превышающих указанные, необходимо откорректировать число (если позволяет периметр бака) и размеры гофростенок.

Архипов Андрей Сергеевич – инженер ОАО "ГК ХК Электрозавод", аспирант кафедры электромеханики МЭИ. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 2002 г.

Энергетический кризис и проблема чистой воды

КОПЫЛОВ И.П.

МЭИ (ТУ)

В большинстве стран с развивающейся экономикой растёт потребление энергии и пресной воды на душу населения. Эта тенденция пока сохраняется, несмотря на рост цен на энергоносители и дефицит экологически чистой воды.

Энергетическая проблема, наряду с проблемой пресной воды, для большинства стран сегодня являются важнейшими, а завтра станут вопросами жизни и смерти.

По запасам пресной воды Россия занимает первое место в мире. Но проблема чистой воды является актуальной и для России, так как большинство регионов и мегаполисов при увеличивающемся потреблении снабжаются водой из открытых водоёмов, с каждым годом подвергающихся все большему загрязнению.

Наша планета единственная в Солнечной системе, возможно в Галактике, 71% поверхности которой занимают моря и океаны. Поверхность планеты сформировалась примерно 3 млрд. лет

назад и с тех пор объём воды практически не изменялся.

Вода в эволюции Земли имела решающее значение [1–3].

Когда появилась на Земле вода науке точно неизвестно, но можно предположить, что её появление связано с появлением в атмосфере кислорода. Появление первых мелководных морей можно отнести к началу средней зоны археозойской эры, около 3,5 млрд. лет назад.

Различные методы исследования показали, что на протяжении всей истории Земли соотношение газов, входящих в состав атмосферы, значительно изменялось. В прошлые геологические эпохи атмосфера содержала в сотни раз больше углекислого газа, чем сегодня, но кислорода было совсем мало.

Первичная атмосфера в азойскую эру, когда Земля начинала остывать, состояла в основном из метана и аммиака. Но уже в это время шли

процессы замещения этих газов азотом и диоксидом углерода (CO_2).

Четыре млрд. лет назад кислород совсем отсутствовал в воздухе, а основное место занимал углекислый газ. Затем кислород стал накапливаться в воздухе, а углекислого газа становилось все меньше и меньше, пока атмосфера не приобрела свой нынешний состав. Этому в значительной степени способствовала зелёная растительность. Благодаря фотосинтезу растения усваивают взятый из воздуха углерод и выделяют кислород. Вся растительность земного шара (включая водоросли) ежегодно выделяет 430 млрд. т кислорода.

При питании растения поглощают 590 млрд. т CO_2 . Разница между поглощённым и выделенным газом идёт на строительство организма растения. После гибели растения в процессе гниения углерод соединяется с кислородом воздуха, образуя снова CO_2 .

Однако кислород все же накапливается в атмосфере, так как погибшие растения в условиях, когда кислород не имеет доступа, образуют залежи каменного угля, торфа и других горючих полезных ископаемых.

Примерно 700–800 млн. лет назад количество кислорода и CO_2 в атмосфере было равным. Последующий период времени от неморийского до четвертичного периода характеризуется накоплением в земной коре горючих полезных ископаемых (наустобиолитов).

На границе раздела тёплых морских вод и суши возникли белковые соединения – коацерваты. От них произошли первые представители живой природы – протобионты, которые уже питались, двигались и размножались. От них в археозойской зоне произошли первые сине-зелёные водоросли и бактерии. Это было 2,5–3 млрд. лет назад.

К концу протерозоя расселилось множество бесскелетных организмов. В этот период царствовала морская фауна и вода занимала большую часть поверхности планеты. Азойская, архейская и протерозойская зоны вошли в геологическую историю Земли, как этап скрытой жизни, который занимает 9/10 всей продолжительности существования нашей планеты.

В фанерозое – этапе явной жизни произошли все основные эволюционные события в живой природе. В конце кайнозойской эры появился Человек разумный. Это было всего 2–3 млн. лет тому назад.

По мнению автора, основная масса пресной воды была создана природными топливными элементами (ТЭ) циклонов, а её естественная убыль также компенсировалась циклонами [4].

"Круговорот воды в природе", с которым

каждый знакомится ещё в школе, без притока воды в этот замкнутый круг извне не объясняет водный баланс планеты, так как и в доисторические времена была и в настоящее время из этого баланса есть естественная убыль воды.

Какими бы эпитетами мы не снабжали воду, её значение в нашей жизни нельзя переоценить. Благодаря воде на Земле в самой ранней стадии её развития появилась живая природа, а эволюция дошла до Человека разумного. И сам Человек – высшее достижение эволюции – на 70 % состоит из воды.

В современной жизни вода играет важнейшее значение, и для большинства стран проблема экологически чистой пресной воды является первостепенной.

Для многих стран Африки и Ближнего Востока с водой складывается критическая ситуация. Положение усугубляется глобальным потеплением. Значительное снижение объёма ледников вызывает массовый сход селевых потоков и уменьшение стока горных рек, что особенно тревожно для Африки и стран Средней Азии. Последствия наступления пустынь для многих регионов катастрофичны. С каждым годом вода всё больше будет становиться стратегическим сырьём. Истощение мировых запасов нефти и газа, рост цен на топливо и электроэнергию остро поставили проблему новых источников энергии. Хотя энергии ветра и движущихся масс воды относятся к альтернативным источникам энергии, они используются человеком с давних времён. Парус, водяные и ветряные колеса человек успешно применял с незапамятных времен. В настоящее время на гидростанциях вырабатывается около 17% электроэнергии, а остальная часть получается от тепловых и атомных станций. Необходимо реализовать предложения по использованию бесплотинных безредукторных гидроагрегатов на реках, приливных ГЭС и использованию энергии морских течений [5, 6].

Перспективным топливом является водород, но свободного водорода в атмосфере всего 0,001%. И вот снова противоречие, ожидающее человечество, – основная масса водорода находится в воде, острый дефицит пресной воды, маячащая на горизонте водородная энергетика и получение энергии из H_2O .

Если естественный процесс образования воды за счёт водородно-кислородных топливных элементов (ТЭ) в циклонах шёл достаточно надёжно и без особых затрат энергии, то обратному процессу получения водорода из воды природа противодействует всеми силами [4].

Идею получать электричество в процессе окисления водорода высказал английский физик

Уильям Гроув ещё в 1839 г. Водородной энергетикой учёные начали серьёзно заниматься с середины прошлого века [4].

В промышленных объёмах водород можно получать тремя способами: электролизом, конверсией метана при температуре 900°C или пропуском паров воды над раскалённым углём при температуре 1000°C.

Все три способа энергоёмкие и требуют создания громоздких промышленных установок. Для большой энергетики в настоящее время водород в качестве топлива не годится.

Другое дело с автономными транспортными энергетическими установками, которые потребляют 5/6 энергии (автомобили, самолеты, тепловозы и др.). Наиболее перспективно внедрение водородно-кислородных ТЭ на автомобилях, где решаются две важные задачи: экономия бензина и создание экологически чистого двигателя.

Сегодня создание двигателей на топливных элементах считается перспективным направлением. США на разработки в этой области ежегодно тратят около 500 млн. дол. По президентской кампании "Топливо свободы" инвестиции в эту область увеличились еще на 1,7 млрд. дол.

Гибридные автомобили с бензиновым двигателем и ТЭ уже выпускаются мелкими сериями несколькими ведущими автомобильными фирмами. Предполагается, что в 2010 г. будут продаваться только гибридные автомобили.

Но все не так просто. Сейчас стоимость самой дешёвой водородной силовой установки 50 тыс. дол., но надо иметь заправочные станции, а самое главное промышленное производство водорода неэкономично. Заправка водородом занимает 15–20 мин, пробег до 400 км без дозаправки, но и в этом отношении автомобиль с ТЭ уступает бензиновому двигателю.

Наиболее перспективными гибридами являются автомобили с двигателями внутреннего сгорания и электродвигателями, питаемыми от мощного аккумулятора. Такая установка позволяет рекуперировать энергию при торможении, а при разгоне электродвигатель помогает бензиновому двигателю. В опытных установках при эксплуатации их в городских условиях расход топлива составляет всего 5 л на 100 км пробега. Но если применять только электромобили, придется удвоить мощность существующих электростанций.

Уже в ближайшем будущем на планете может сложиться ситуация, когда водород будет дороже золота. Хотя эти сравнения пока неправомерны, но уже сегодня заправка гибридного автомобиля бензином и водородом происходит по одной цене.

В трудные периоды цивилизации учёные находили выход, и кто может предсказать, как будут выглядеть автономные энергетические установки в ближайшем будущем. Здесь уместно вспомнить, что владельцы первых автомобилей покупали бензин в аптеках, и мало кто мог предположить, что эта жидкость станет основой основ современного благополучия.

Трудно предвидеть как будет развиваться цивилизация в XXI и XXII вв., но ясно, что человек так просто не расстанется с достигнутым уровнем жизни. Потребуется увеличение потребления энергии на душу населения, что в любом варианте приведёт к увеличению расхода пресной воды.

Решение глобальных проблем должно стоять на первом месте среди повседневных рутинных проблем.

Глобальное потепление истощает традиционные источники пресной воды, хотя океан и поднимается на несколько метров.

Мы упускаем время на строительство крупных опреснительных установок с использованием солнечной энергии. Особенно эффективны такие установки в районе Каспийского моря, где будут решаться три проблемы: получение пресной воды, минерального сырья и возможность несколько замедлить подъём уровня моря.

Вода не только источник жизни для живых организмов, но и источник получения энергии. Вода имела решающее значение в прошлой истории эволюции живой природы и в будущем ей будет принадлежать решающая роль в развитии цивилизации.

Заключение

Современная среда обитания живых организмов сформировалась в результате эволюции биосферы за несколько миллиардов лет. Наличие большого количества воды и благоприятные температурные условия на Земле определили появление живых организмов, разумных существ и современного цивилизованного общества.

Циклоны – природные кислородно-водородные топливные элементы – основной источник пресной воды на Земле.

Моря, в которых появились первые живые организмы, образовались на планете, как только она начала остывать в результате активной деятельности циклонов еще примерно 3,5 млрд. лет назад.

Хотя воды на нашей планете много, многие страны испытывают дефицит пресной воды, и проблема пресной воды является первостепенной для большинства стран. Положение усугубляется тем, что водородная энергетика, все боль-

ше укрепляющая свои позиции в транспортных энергетических установках, основывается на получении водорода в промышленных установках из воды.

Будущее цивилизации в руках поколений, живущих в начале XXI в. Создание энергетических установок, использующих бесконечную энергию Океана и Космоса, становится с каждым годом всё более актуальным.

Список литературы

1. Копылов И.П. Электромагнитная Вселенная. М.: Изд-

во МЭИ, 1999.

2. Копылов И.П. Геоэлектромеханика. М.: Изд-во МЭИ, 2000.

3. Копылов И.П. Гелиоэлектромеханика. М.: Изд-во МЭИ, 2002

4. Копылов И.П. Топливные элементы циклонов – основной источник пресной воды // Электротехника. 2004. № 10.

5. Копылов И.П. Тихоходные безредукторные гидрогенераторы для бесплотинных ГЭС // Электротехника. 1990. № 6.

6. Копылов И.П. Низкопотенциальные источники энергии – будущее электроэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. 1992.

ХРОНИКА

Итоги V Международной конференции по электротехническим материалам и компонентам "МКЭМК-2004"

V-я Международная конференция по электротехническим материалам и компонентам "МКЭМК-2004" прошла с 20 по 25 сентября 2004 г. Организаторы конференции: Министерство общего и профессионального образования РФ, Московский энергетический институт (МЭИ (ТУ)), Академия электротехнических наук Российской Федерации (АЭН РФ), Акционерное общество "ВНИИКП", Институт общей физики Российской академии наук (ИОФАН), Международная академия электротехнических наук (МАЭН), Московский институт стали и сплавов (МИСиС), Московский физико-технический институт, Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, Таврический экологический институт, Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Научно-исследовательский центр проблем интеллектуальной собственности (ФГНУ "ИНЕС").

В конференции приняли участие представители 34 высших учебных заведений, 6 общественных академий наук, 5 отраслевых научно-исследовательских институтов, 10 производственных объединений из России и 6 стран дальнего и ближнего зарубежья (Украины, Армении, Великобритании, США, Германии, Бельгии).

На 7 секциях заслушано и обсуждено 75 докладов.

Доклады пленарного заседания были посвящены новым научным разработкам в областях сверхвысоковакуумных нанотехнологий и сканирующей туннельной микроскопии (К.Н. Ель-

цов, ИОФАН, Россия), получению нанокристаллических магнитотвердых материалов системы неодим-железо-бор (А.С. Лилеев, МИСиС, Россия), вопросам внедрения новых материалов в производство изоляции электрических машин (А.П. Биржин, ЗАО "Элекроизолит", г. Хотьково, Россия) и вызвали большой интерес участников конференции.

На секции "Диэлектрические материалы и компоненты" активно обсуждались проблемы создания и использования перспективных теплостойких и теплопроводных электроизоляционных кремнийорганических материалов "эластик", моделирования диэлектрических и физико-механических свойств полимерсодержащих материалов, новые методы измерения радиационных изменений диэлектрических потерь и проницаемости политетрафторэтилена и полиэтилена, накопления и релаксации заряда в структурах слюдосодержащих композиционных материалов с полимерной плёнкой. Большое внимание было уделено практическому использованию диэлектрических материалов в разработках коллекторных машин постоянного и переменного тока, а также в кабельной изоляции. Заинтересованную дискуссию вызвал анализ результатов испытаний кабельных изделий, которые функционировали на внешней поверхности космических объектов.

На секции "Кабельные материалы и изделия" интерес вызвали работы по созданию и исследованию новых типов оптических кабелей.

Широкий спектр вопросов обсуждался на секции "Полупроводниковые и сверхпроводниковые материалы и компоненты": теоретические исследования микроструктуры керамики для диэлектрических СВЧ-резонаторов; изучение спиновых эффектов при аксиальном каналировании в кристалле; исследования методами растровой и атомно-силовой микроскопии поверхности кремнесодержащих плёнок с одной стороны и актуальные практические вопросы, например, разработка макета ЯМР установки для обнаружения твердых наркотических веществ.

Самой представительной по числу докладов была секция "Магнитные материалы и изделия". Повышенный интерес был проявлен к докладам о взаимодействии аморфного ферромагнитного микропровода с электромагнитным излучением, об исследовании свойств легированных гексаферритов, отражении и преломлении магнито-статических волн на границе раздела ферритовых плёнок и о материалах для постоянных магнитов, а также к фундаментальным исследованиям ученых Симферопольского Таврического национального университета им. В.И. Вернадского в области физики ферромагнетизма. Живой обмен мнениями вызвали результаты поисковых исследований и конструкторских разработок кафедры "Электрическая изоляция, кабели и конденсаторы" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доложенные проф. М.Э. Борисовой.

Участники конференции проявили интерес к докладам секции, на которой обсуждались вопросы воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты.

В центре внимания секции "Современная математика и ее применение в электроматериаловедении" оказались вопросы граничных значений решений эллиптических уравнений, вырождающихся на границе области с ляпуновской границей и условия глобальной разрешимости эволюционных уравнений. Участники конференции отметили, что предложенные математические модели имеют практическое применение к важным для промышленности результатам экспериментальных исследований по созданию новых перспективных электротехнических материалов и компонентов.

Особый интерес участники конференции проявили к секции, посвящённой роли малых инновационных предприятий в развитии науки и производства, участием их в реализации научных исследований. На заседании секций представлено и обсуждено более 12 докладов, отражающих роль малых предприятий в развитии электроматериаловедения,

менеджмент на предприятиях электроизоляционной и кабельной промышленности, современную систему организации бизнеса, организацию производства оптических кабелей, нового поколения композиционных материалов, кабелей для локальных сетей, опыт использования межрегиональной информационной системы для коммерциализации научно-технических разработок, поддержку малого предпринимательства и новых экономических структур в науке вузов, проблемы создания инновационно-технологических центров.

Конференция проходила в атмосфере деловой заинтересованности, дискуссии. Диалоги содержали критические замечания, предложения и дополнения.

В ходе работы "МКЭМК-2004" были определены крупные проблемы из числа названных, нуждающиеся в дальнейшей разработке и перспективные для инвестиций.

На заключительном заседании участники конференции приняли следующее решение:

1. Одобрить деятельность Оргкомитета МКЭМК-2004.

2. Отметить возросший интерес у научной общественности к проведению Международной конференции по данной тематике.

3. Отдельные доклады участников конференции по рекомендации секций опубликовать в центральных научно-технических журналах.

4. Итоги конференции опубликовать в журнале "Электротехника" и разместить на сайте МЭИ (ТУ).

5. Более активно привлекать представителей промышленности, академических институтов, зарубежных учёных, фирм, фондов и малых предприятий к участию и проведению конференции.

6. Больше внимания уделять совершенствованию подготовки инженерных кадров по электротехническому материаловедению.

7. Привлекать к более активному участию в конференции учащуюся молодежь.

8. Обратит внимание ведущих предприятий, учёных и специалистов на развитие следующих актуальных направлений:

– создание новых высоких технологий, в том числе нанотехнологий, для производства электротехнических материалов и изделий на их основе;

– совершенствование нанокристаллических полупроводниковых материалов, плёнок и приборов на их основе;

– создание композиционных радиопоглощающих материалов с целью электромагнитной совместимости приборов и устройств в электротехнике

и повышения экологической безопасности;

– создание постоянных магнитов с высокой магнитной энергией для медицинских установок;

– развитие многофункциональных силовых электронных аппаратов, высокоэффективных электромагнитных исполнительных устройств на основе последних достижений в области электротехнических материалов;

– совершенствование вновь созданных исследовательских комплексов, в том числе компьютеризированных, в сфере разработки и исследования электротехнических материалов;

– разработка электротермических установок высокочастотного нагрева;

– разработка электротехнологического обо-

рудования для ионно-плазменной обработки изделий.

9. Считать целесообразным проводить Международные конференции по данной тематике 1 раз в 2 года.

В "Трудах МКЭМК-2004" более 130 публикаций, содержащих результаты поиска и внедрения научных исследований в электроматериаловедении.

Следующую VI Международную конференцию по электроматериаловедению, электромеханике и электротехнологии запланировали на сентябрь 2006 г.

Оргкомитет "МКЭМК-2004"
E-mail: filikov@srv-vmss.mpei.ac.ru

Международной академии электротехнических наук – 10 лет

АЛЬТОВ В.А., президент Международной академии электротехнических наук, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат Государственной премии СССР, доктор техн. наук, проф.

В связи с распадом Советского Союза и Совета экономической взаимопомощи (СЭВ) возникла необходимость сохранения и дальнейшего углубления сложившихся научно-технических связей между организациями, расположенными на территории бывшего Союза и Восточной Европы, в одном из приоритетных направлений научно-технического прогресса – электротехнике, а также содействия быстрой интеграции их в мировое электротехническое сообщество.

Эту роль взяла на себя Международная академия электротехнических наук (МАЭН), созданная по инициативе учёных и специалистов Белоруссии, Польши, России, Украины и др. на учредительном собрании в г. Севастополе в 1993 г. и зарегистрированная в Министерстве юстиции РФ в 1994 г.

У истоков создания Академии стояли крупнейшие учёные мира – академики РАН лауреат Нобелевской премии А. Абрикосов, И. Глебов, К. Демирчян, Г. Месяц (Россия), академики НАНУ Б. Патон, А. Шидловский (Украина), профессора Е. Козей, З. Чок (Польша), Г. Грау, А. Шваб (Германия), Э. Колингс, Д. Монтгомери (США), М. Вуд, Вей Яо Лянг (Великобритания), Ян Лугоунг (Китай), К. Лал (Индия),



Г. Депорт, Р. Денобл (Франция), Ф. Ирие, С. Яамура (Япония) и многие другие.

Международная академия электротехнических наук (МАЭН) является международным неправительственным союзом национальных академий и отделений, общественных объединений и ассоциаций, исследовательских институтов и промышленных предприятий электротехнического профиля, а также

других организаций, разделяющих цели и задачи Академии. МАЭН в настоящее время объединяет наиболее авторитетных учёных и специалистов из более чем 40 стран мира.

МАЭН имеет национальные отделения в Бахрейне, Белоруссии, Болгарии, Великобритании, Германии, Египте, Индии, Китае, Польше, США, Саудовской Аравии, Словакии, Турции, Франции, Узбекистане, Украине, Японии и др. Самым большим национальным отделением МАЭН является один из инициаторов ее создания – Академия электротехнических наук Российской Федерации (РАЭН). Национальные, межрегиональные и региональные отделения, филиалы и представительства в различных странах эффективно организуют и координируют деятельность членов Академии.

В своей деятельности МАЭН тесно сотрудничает с крупнейшими университетами и научными центрами, деловыми и общественными кругами различных стран, а также международными организациями, такими как ЮНЕСКО, ЮНИДО, Международная Электротехническая Комиссия (МЭК), Интерэлектро и другие, а их руководители входят в состав Президиума Академии.

Основной целью деятельности Академии является консолидация усилий членов Академии, направленных на проведение электротехнических исследований и разработок, определяющих научно-технический прогресс и направленных на защиту интересов людей и окружающей среды. Академия:

- создает систему прямых контактов между общественными объединениями, предприятиями, фирмами, научными и учебными учреждениями, центрами и учёными;

- формирует общественное мнение по актуальным проблемам электротехники;

- инициирует, разрабатывает и реализует международные проекты и программы в области электротехники;

- оказывает членам Академии помощь в поиске потенциальных партнеров, подготовке соглашений и контрактов о научно-техническом и экономическом сотрудничестве в области электротехники;

- организует, проводит и принимает участие в ежегодных международных съездах, конференциях, симпозиумах, совещаниях, выставках по вопросам разработки и внедрения принципиально новых видов электротехнических устройств и материалов;

- проводит независимые общественные экспертизы международных и государственных программ и проектов;

- участвует в разработке национального и международного законодательства, нормативно-правовых актов в сфере научной и технической деятельности;

- принимает декларации, конвенции, хартии, обращения к парламентам и правительствам стран мира, международным организациям и научным сообществам по вопросам развития международного научно-технического сотрудничества;

- разрабатывает и содействует реализации международных программ, направленных на повышение квалификации, подготовку и переподготовку научных кадров электротехнического профиля;

- содействует раскрытию творческого потенциала молодежи;

- создает в установленном порядке международные специализированные Советы и конкур-

сные комиссии по присуждению почётных званий и степеней;

- всемерно содействует быстрой интеграции учёных-электротехников России, стран СНГ, Восточной Европы и других стран в мировое научно-техническое сообщество.

В настоящее время Академия сформировалась в авторитетную и влиятельную неправительственную организацию, которая строит свою работу на основе самоуправления, добровольности и равноправия своих членов, гласности и законности.

Научные программы Академии осуществляются национальными и региональными отделениями совместно с ведущими научными центрами и университетами, фирмами, корпорациями и другими электротехническими организациями различных стран.

Для обеспечения демократических принципов управления Академией, тесного взаимодействия и эффективного участия ее членов в деятельности МАЭН руководители национальных академий и других общественных объединений общенационального масштаба избираются в состав Президиума на правах вице-президентов по соответствующему региону.

Совместное использование интеллектуального и материального потенциала членов Академии позволяет формировать целевые проекты (на двухсторонней или многосторонней основе) по созданию электротехнических материалов и оборудования нового поколения.

Академия уделяет большое внимание пропагандированию достижений в области электротехники, электроэнергетики, электроники, приборостроения и других смежных областях, оказывает помощь членам Академии в получении различного рода научно-технической информации, в создании банков и баз данных или обеспечения доступа к существующим источникам информации, организует и проводит симпозиумы, совещания, выставки по вопросам разработки и внедрения принципиально новых видов электротехнических устройств и материалов.

Академия тесно сотрудничает с Российской Академией наук и другими отраслевыми и общественными академиями, государственными и общественными структурами Российской Федерации (Госдумой, Советом Федерации, Правительством Москвы, Минпромэнергетики, Минобрнауки, Российским союзом промышленников и предпринимателей и т.п.).

Совместно с РАЭН МАЭН учредила Фонд поддержки учёных-электротехников и является одним из инициаторов создания Российского союза общественных академий наук (РОСАН).

МАЭН поддерживает постоянные связи с

российскими учеными и специалистами, работающими в ведущих западных научных центрах, также с иностранными выпускниками советских и российских вузов с целью активного привлечения их к деятельности Академии.

Члены Академии ежегодно публикуют монографии и учебники, издаваемые на различных языках мира. Под эгидой Академии и ее отделений выпускаются десятки периодических изданий, сборников, проспектов. Труды МАЭН издаются с момента образования Академии на русском и английском языках.

По инициативе МАЭН был создан Международный выставочный комитет по организации и проведению национальных и международных специализированных выставок.

Академия учредила ряд премий, званий, медалей для награждения учёных и специалистов, а также организаций, внесших выдающийся вклад в развитие электротехники и международное сотрудничество. В частности, Академия является одним из инициаторов создания Международного комитета по присуждению премии им. М. Доливо-Добровольского учёным и специалистам различных стран.

Международной Академией электротехнических наук присвоены почётные академические звания более 400 крупнейшим учёным и специалистам, общественным и государственным деятелям мира.

По случаю десятилетия со дня создания Международной Академии электротехнических наук в различных странах были проведены симпозиумы, конференции, выставки и другие юбилейные мероприятия, на которых крупнейшим учёным и специалистам были вручены золотые и серебряные медали МАЭН¹.

Среди них российские учёные, общественные, государственные деятели:

¹ Должности награждённых указаны на момент вручения наград.

- председатель Наблюдательного Совета РАЭН академик РАН К.С. Демирчян;
- Почётный президент РАЭН В.Г. Герасимов;
- Почётный член РАЭН И.П. Копылов;
- министр промышленности, науки и технологий РФ И.И. Клебанов;
- президент торгово-промышленной палаты РФ академик РАН Е.М. Примаков;
- председатель Совета МО "Интерэлектро", зам. министра промышленности, науки и технологий С.Г. Митин;
- президент РАЭН Б.И. Петленко;
- президент Международной академии наук информации, информационных процессов и технологий (МАН ИПТ) В.А. Трайнев;
- президент Международной академии высшей школы В.Е. Шукшунов;
- вице-президент РАЭН, генеральный директор ВЭИ В.Б. Козлов;
- вице-президент РАЭН В.В. Сычев;
- заведующий секретариатом МО "Интерэлектро" А.А. Прохаев;
- академик-секретарь РАЭН Г.Е. Иванченко;
- проректор МЭИ (ТУ) А.И. Попов;
- главный учёный секретарь МАЭН, директор Института электротехники МЭИ (ТУ) В.А. Филиков;
- руководитель Департамента машиностроения Минпромнауки РФ Н.Т. Сорокин;
- председатель Совета директоров ОАО "ВНИИЭТО" А.Н. Попов.

В связи с юбилеем в адрес Президиума академии поступили поздравления от ЮНИДО, ЮНЕСКО, МЭК, Интерэлектро, Международного Конгресса промышленников и предпринимателей, международных и национальных академий, университетов и научных центров различных стран. Получены поздравления от правительства, Совета Федерации и Государственной Думы РФ, правительства Москвы, Союза промышленников и предпринимателей, РАО "ЕЭС России" и других организаций. МАЭН выражает всем глубокую благодарность.

ИНФОРМАЦИЯ

Сертификационный центр ОАО "ВЭЛНИИ"

ЮРЕНКО И.К.

Рассмотрены вопросы аккредитации испытательного центра в качестве сертификационного с учётом требований законов "О санитарно-эпидемиологическом благополучии" и "О техническом регулировании".

Сертификация, как процедура подтверждения ответственности продукции определённым требованиям третьей независимой и компетентной стороной, на-

The article considers accreditation problems of the test centre as a certifications centre taking account of the requirements of laws: "About sanitary and epidemiological well-being" and "About technical regulation".

прямую связана с развитием рыночных отношений и является мощным рычагом повышения безопасности (обязательная сертификация), качества и кон-

курентоспособности (добровольная сертификация) выпускаемой продукции. Производителю, чтобы заявить о себе на рынке и привлечь внимание к какой-либо особенности своего товара, необходимо иметь сертификат соответствия.

Основным этапом получения сертификата являются сертификационные испытания, проводить которые имеют право только прошедшие специальную процедуру аккредитации испытательные центры (ИЦ).

Процесс аккредитации – это завершающий этап сложной, длительной, многоплановой работы по созданию и обновлению экспериментальной базы, по обучению и аттестации кадров, созданию и приобретению испытательного оборудования и средств измерений, разработке процедуры их периодической поверки и аттестации.

Но самое главное – это создание научно-методической и нормативно-технической базы проведения сертификационных испытаний по всем заявленным в области аккредитации объектам испытаний, обеспечивающей выполнение измерений сертификационных показателей, гарантирующих достоверность заключения о соответствии технических характеристик нормативным требованиям по результатам сертификационных испытаний.

Коллектив научно-технических работников ОАО "ВЭЛНИИ", имеющий сорокапятилетний опыт проведения испытаний и исследований, в составе которого трудятся кандидаты и доктора наук, успешно справился с подготовкой и аккредитацией испытательного центра в качестве сертификационного.

Разработаны основные документы испытательного центра: "Положение об ИЦ", "Руководство по качеству", "Область аккредитации" и "Паспорт ИЦ".

Испытательный центр оснащён современным испытательным оборудованием и средствами измерений (свыше 200 единиц), позволяющими проводить все виды испытаний как отдельных единиц транспортных средств (магистральные электровозы и электропоезда, рудничные, шахтные и промышленные электровозы), так и отдельного оборудования тягового и общепромышленного применения. В частности, в состав испытательного оборудования входят два вагона-лаборатории для тягово-энергетических и динамико-прочностных испытаний, термобарокамера и климатическая камера для испытаний на влагостойкость и климатические воздействия, стенды для испытаний электродвигателей различной мощности и стенд для определения аэродинамических характеристик охлаждаемого оборудования, стенды для испытаний на коммутационную способность и на механическую износостойкость электрических аппаратов, стенды для испытаний на вибропрочность и виброустойчивость, ударный стенд и т.д. По всем видам испытаний, на которые в нормативной документации определены методы испытаний, разработаны рабочие методики.

Проблемы более высокого уровня решаются в ИЦ в связи с принятием законов "О санитарно-эпидемиологическом благополучии" и "О техническом регулировании".

По требованию первого из названных законов условия работы с машинами, механизмами, установками, устройствами, аппаратами, которые являются источниками физических факторов воздействия на человека (шума, вибрации, ультразвуковых и инфракрасных воздействий теплового, ионизирующего, неионизирующего и иного излучения), не должны отрицательно воздействовать на человека.

Дело в том, что в данной области, особенно применительно к электроподвижному составу, недостаточно нормативная база как в части методов испытаний, так и в части критериев оценки. А "Закон о техническом регулировании" устанавливает, что нормативные документы на методы испытаний при проведении процедур обязательной оценки соответствия должны содержать обоснованные, чётко сформулированные объективные методы измерения сертификационных показателей, обеспечивающие необходимую точность, достоверность и воспроизводимость результатов испытаний при соблюдении всех метрологических требований.

Поэтому в ИЦ были выполнены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых создана научно-методическая, нормативно-критериальная и экспериментальная база проведения сертификационных испытаний ЭПС в области виброакустической и электромагнитной безопасности.

Сейчас проводятся исследования с целью создания нормативной и экспериментальной базы для сертификации электронных устройств и программного обеспечения.

По своей значимости полученные результаты выходят за рамки одного ИЦ и могут быть использованы при разработке технических регламентов, предусмотренных законом "О техническом регулировании".

В настоящее время ИЦ ОАО "ВЭЛНИИ" аккредитован в двух системах сертификации: в системе сертификации на федеральном железнодорожном транспорте (ССФЖТ) и в российской системе сертификации ГОСТ Р на право проведения сертификационных испытаний широкой номенклатуры электротехнического оборудования как тягового, так и общепромышленного применения.

ИЦ ОАО "ВЭЛНИИ" успешно функционирует. По результатам сертификационных испытаний, проведённых в центре, электровозостроительным заводом получено несколько десятков сертификатов соответствия. Потенциальные возможности ИЦ таковы, что он может оказывать услуги по испытаниям электрооборудования не только отраслевого, но и общепромышленного применения.



Юренко Иван Кондратьевич – начальник отдела ОАО "ВЭЛНИИ", канд. техн. наук. Окончил Новочеркасский политехнический институт по специальности инженер-электрик в 1966 г. Защитил кандидатскую диссертацию по теме "Повышение эффективности электронной аппаратуры управления электровазов переменного тока" в 1984 г.

Правила оформления статей, направляемых в журнал "Электротехника"

1. Объём статьи не должен превышать **12 страниц текста**, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере **через 2 интервала** с полями 2-3 см, и иметь **не более 5 рисунков**.
2. В статье должны быть: введение, сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы, рекомендации и эффективность.
К статье должна быть приложена аннотация (2-3 предложения) на русском и английском языках. Название статьи также следует дать на русском и английском языках.
3. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.
Желательно, чтобы число авторов **не превышало пяти**. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.
4. Формулы должны быть четко вписаны от руки или набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст). Прописные (заглавные) буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу, а строчные (малые) - двумя черточками сверху. 0 (нуль) и цифра 3 (три) поясняются на полях простым карандашом. Индексы показываются простым карандашом.
5. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.
6. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены четко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общепотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.
Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. **Если фотографии присылаются на дискетах, то разрешение должно быть не менее 300 пикселей на дюйм и размеры фотографии не очень велики.** Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.
7. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.
Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.
В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.
8. Статью в двух экземплярах следует высылать в редакцию простой или заказной бандеролью.
9. К статье желательно приложить дискету с набранным текстом.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Воеводин П. И.
Головкин Н. В.
Мильштейн, Н. М.
Серебряков С. В.
Циклинский Н. Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Воеводин П. И.

ВЕСТИНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

АДРЕС РЕДАКЦИИ
МОСКВА,
Гороховская, 23
ЛЕНИНГРАД,
ул. Гоголя, 14

№ 1—2

ЯНВАРЬ—ФЕВРАЛЬ

1930

СОДЕРЖАНИЕ

1. От редакции	1
2. Специализация заводов Электропромышленности. Речь г. Шверник на 1-ой Всесоюзной Электропромышленной Конференции	2
3. Социалистическое соревнование и развертывание электротехнической промышленности	7
4. Первая Всесоюзная производственная Конференция Электропромышленности	11
5. Автоматические телефонные станции в Ростове н/Дону. Инж. А. А. Величко	18
6. Успехи в постройке мощных трансформаторов. Инж. А. Грамбицкий	25
7. Работы Центральной Лаборатории Проводной связи ВЭО в области телефонирования токами высокой частоты по проводам. Инж. В. Н. Листов	30
8. Коротковолновой 4-х киловаттный передатчик, стабилизированный кварцем, типа, КПК 400. Инж. О. Р. Гильберт	41
9. К расчету слюдяных конденсаторов. Инж. М. А. Жилинский	52
10. Расчет защитных заземлений высоковольтных электроустановок. Инж. Д. В. Володарский	61
11. Приближенная формула для определения токов установившегося короткого замыкания турбинных генераторов Зав. "Электросила". Инж. Е. Л. Вайсман	70
12. Хроника	77

CONTENT

1. Editorial	Page	1
2. Differentiation of works in the Electrical Industry. Report of N. M. Schwernik at the Conference of Electrical Industry		2
3. On the socialistic competition. Report of N. M. Schwernik at the 1 Conference of Electrical Industry		7
4. Decisions of the 1 Conference of Electrical Industry		11
5. Automatical Telephone Stations in Rostow/Don A. A. Velitchko Eng.		18
6. Improvements in the construction of power transformers A. Grambitski Eng.		25
7. Works of the Central Laboratory of Line Communication on Carrier Current Telephone W. N. Listow Eng.		30
8. 4 kW. short wave cristal controlled transmitter type KPK — 400. O. R. Gilbert Eng.		41
9. On the calculation of mica condensers. M. A. Gilinski Eng.		52
10. Calculation of ground protection of high voltage installations. D. W. Wolodarski		61
11. Approximative formula for determination of short circuit currents in turbo alternators constructed by the Machinery Building Works "Electrossilla" E. L. Waisman		70
12. Chronicle		77

О Т Р Е Д А К Ц И И

Объединение организационных форм управления электропромышленностью завершило собою внутреннюю связь между отдельными отраслями электротехники. Эта связь совершенно ясно обозначилась в последние десятилетия, когда интересы разных областей приложения электричества настолько взаимно перевязались, что даже некоторые установившиеся понятия и термины утратили если не смысл, то правильность определения.

Естественным поэтому является желание дать читателю такой орган, отражающий жизнь промышленной электротехники, в котором он мог бы найти удовлетворение своего интереса ко всем отраслям ее, к взаим-

ной связи этих частей, относительного значения их и т. д.

Поэтому Правление Всесоюзного Электротехнического Объединения остановилось на решении издавать журнал "Вестник Электропромышленности", задачей которого является ознакомление читателей с состоянием советской промышленной электротехники, ее достижениями, главными работами, словом со всем тем, что является характерным и определяющим ее развитие.

Вместе с тем этот журнал заменит собой издававшиеся до сих пор "Известия ГЭТа" и "Электросвязь", содержание которых целиком будет отражено в этом новом, объединяющем "Вестнике Электропромышленности".