

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство
о регистрации СМИ
ПИ №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

С.С. Булгаков, д.т.н.,
Н.А. Володина, д.т.н., профессор,
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,
С.Г. Драгомиров, д.т.н., профессор,
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,
К.Л. Ковалев, д.т.н., профессор,
Л.В. Кожитов, д.т.н., профессор,
А.В. Левин, д.т.н., профессор,
А.С. Мазнев, д.т.н., профессор,
В.А. Нестерин, д.т.н., профессор,
И.Б. Пешков, д.т.н., профессор,
В.П. Феоктистов, д.т.н., профессор,
В.Е. Ют, д.т.н., профессор.

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук.

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11
Тел./факс: (495) 500-40-20,
(495) 557-23-95
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
21.06.2013 г.

Отпечатано:

ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 1011.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Вишневский С.Н., Коньшев Д.В.

*Современное состояние и перспективы развития
ОАО «Электропривод» 2*

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Овечкин О.И., Миронов В.А.

*Электромеханизмы и электродвигатели разработки
ОАО «Электропривод» 5*

Власов А.И., Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г.

*Применение полевых математических моделей для проектирования
обмоток вентильных электродвигателей 12*

Волокитина Е.В.

*Исследования по созданию системы генерирования
и запуска маршевого двигателя в концепции
полностью электрифицированного самолета. Часть II. 16*

Власов А.И., Волокитина Е.В., Малюгин А.А., Опалев Ю.Г.

*Исследование магнитной системы высокоскоростных бесконтактных
электродвигателей постоянного тока 23*

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Ерохин Д.В., Волокитина Е.В., Рубцова Л.А.

*Электропривод в системах уборки-выпуска и управления
взлетно-посадочных устройств 27*

Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.

*Электропривод реверсивного устройства для перспективных
двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей 30*

**Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л.,
Москвин Е.В., Тебеньков Ф.Г.**

*Разработка высокоскоростного электропривода компрессора
системы кондиционирования воздуха самолета 34*

Волокитина Е.В., Ерохин Д.В., Москвин Е.В., Вшивцев М.В.

*Испытательный комплекс для высокоскоростного электропривода
компрессора системы кондиционирования воздуха 40*

Власов А.И., Никитин В.В.

*Автоматизированное проектирование электромеханических
тормозов авиационного электропривода 44*

Современное состояние и перспективы развития ОАО «Электропривод»

// State-of-the-art and development prospects of JSC «Electroprivod» //

**Вишневский С.Н., Коньшев Д.В.,
ОАО «Электропривод», г. Киров**

*В статье рассматриваются основные направления деятельности ОАО «Электропривод» (г. Киров). Приведены современное состояние и перспективы развития предприятия.
Ключевые слова: ОАО «Электропривод», авиационная промышленность, авиационный электропривод, опытно-конструкторское бюро, перспективы развития.*

*In this paper principal direction JSC «Electroprivod» activities are discussed. State-of-the-art and development prospects of the company are given.
Keywords: JSC «Electroprivod», aircraft industry, aviation electric drive, research and development bureau, development prospects.*

В августе 2013 г. коллектив ОАО «Электропривод» (г. Киров) отметит 58-летие со дня основания предприятия. На всех этапах развития отечественной авиации его деятельность была направлена на постоянное совершенствование авиационных электроприводов и электроагрегатов – генераторов постоянного и переменного тока, стартер-генераторов, электродвигателей, электромеханизмов, коммутационной аппаратуры, аппаратуры регулирования, защиты и управления, блоков датчиков и концевых выключателей и обеспечение их высокого технического уровня, минимизации массогабаритных показателей.

Предприятие создавалось исключительно с целью разработки новых изделий, исследования и выпуска опытных партий. Под эти цели были созданы конструкторская и технологическая службы, комплекс испытательной базы.

В настоящее время среди предприятий авиационной промышленности ОАО «Электропривод» удерживает позиции одного из ведущих в Российской Федерации опытно-конструкторского бюро по созданию авиационного электротехнического оборудования.

Изделия предприятия установлены практически на всех военных и гражданских самолетах, вертолетах и авиационных двигателях.

Разработка автоматизированных регулируемых электроприводов является базовым тематическим направлением ОАО «Электропривод».

Итогом многолетних поисковых и исследовательских работ стало создание на базе вентильных электродвигателей автоматизированных электроприводов для систем механизации крыла самолета вместо гидравлических и пневматических приводов.

Эффективность замены проявилась, прежде всего, в уменьшении массы систем, а также в повышении их безотказности, точности позиционирования, упрощения обслуживания, снижения эксплуатационных расходов и энергопотребления. Создание таких

электроприводов явилось серьезным практическим шагом в реализации концепции «более электрифицированного самолета».

В последнее время предприятие, сохраняя приоритет за авиационной тематикой, на базе большого научно-технического задела, сформированного в результате разработок авиационной техники, настойчиво проводит диверсификацию своих тематических направлений путем их переориентации на создание новой высокотехнологичной и наукоемкой продукции для таких важнейших отраслей промышленности, как нефтегазовая, атомная энергетика, судостроение, станкостроение и др. Изделия предприятия успешно эксплуатируются в различных системах управления летательных аппаратов, газоперекачивающих и энергетических установок.

И сегодня ОАО «Электропривод» продолжает активную деятельность по созданию уникальных образцов новой техники, как для авиационной отрасли, так и для других отраслей промышленности. Наиболее значительными и перспективными из выполняемых в настоящее время научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ являются:

- исследование и разработка электроприводов системы управления уборкой и выпуском шасси; электропривода колеса шасси самолета для руления по земле; систем генерирования на базе магнитоэлектрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами для «более электрифицированного самолета»;

- исследование и разработка электроприводов с высокой удельной мощностью для топливных насосов и входных направляющих аппаратов для реализации идеи «Электрифицированного авиадвигателя»;

- разработка электроприводов для автоматизированного управления аэродинамическими поверхностями самолетов, таких как предкрылки, закрылки, стабилизатор, интерцепторы на различных режимах полета взамен гидравлических систем;

- разработка электропривода вращения авиационного антенного обтекателя для самолета дальнего радиолокационного обнаружения;

- разработка ряда импортозамещающих вентиляльных электродвигателей, предназначенных для работы в составе электроприводов универсальных технологических роботов, а также прецизионного металлообрабатывающего, деревообрабатывающего, технологического и другого оборудования. Образцы таких электродвигателей успешно прошли проверку в составе роботов, разработанных ПТОО ОАО «АвтоВАЗ» в рамках государственного проекта «Разработка и освоение производства гаммы отечественных универсальных технологических роботов для массовых автоматизированных производств гражданской машиностроительной продукции»;

- разработка электростартеров на основе частотно-управляемых асинхронных электродвигателей для запуска газотурбинных установок в составе газотурбинных электростанций, газоперекачивающих агрегатов и газотурбовоза. Их использование взамен пневмостартеров обеспечивает экологическую чистоту и энергосбережение в процессе запуска;

- разработка электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха в «концепции полностью электрифицированного самолета».

Высокий технический уровень разработок обеспечивается большим объемом собственных научно-исследовательских работ и тесным сотрудничеством со многими проектными и учебными институтами и конструкторскими бюро, в том числе с головными отраслевыми ин-

ститутами НИИАО, ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ.

Пройдя большой путь развития, преодолев трудности конверсии, экономических кризисов и реформ, ОАО «Электропривод» сегодня динамично развивается, имея большой научно-технический потенциал и портфель заказов по перспективным направлениям разработок.

Определены главные приоритеты его деятельности и стратегия развития. Оснастившись в последнее время современным производственным, испытательным и вычислительным оборудованием и передовыми технологиями, сохранив высококвалифицированный персонал и, укомплектовав службы молодыми специалистами, предприятие ежегодно наращивает объемы выполняемых работ, как по поставкам серийных изделий, так и по новым разработкам, расширяет сферы научно-технической и производственной деятельности.

Специализация предприятия состоит в разработке методик, конструктивных исполнений изделий, алгоритмов, технологий, во всестороннем исследовании, испытании опытных образцов, производстве изделий малых серий.

Современная стратегическая политика ОАО «Электропривод» направлена на:

- упрочнение позиций предприятия как ведущего разработчика электроагрегатов и автоматизированных систем управления в наиболее ответственных областях применения в России и странах СНГ, с возможным распространением своих разработок в другие страны мира;

- позиционирование себя на рынке как разрабатывающего предприятия с передачей отлаженных технологий на другие серийные заводы;

- проведение разработок на уровне лучших мировых образцов;

- постоянное поддержание высокой надежности и качества выпускаемых изделий;

- применение наработанного опыта, методик проектирования на ответственных объектах других отраслей промышленности;

- постоянное совершенствование производственной, испытательной,

технологической и конструкторской базы.

Важным преимуществом нашего предприятия является наличие высококвалифицированного научно-технического коллектива. Накопленные знания и опыт позволяют проектировать и выходить на рынок с новыми, более совершенными изделиями, расширять номенклатуру, решать поставленные временем задачи. Внедрение научно-исследовательских и экспериментальных работ, обучение в аспирантуре, увеличение количества сотрудников с ученой степенью, действие адаптивной программы обучения, внедрение новых информационных технологий способствует реализации поставленной цели.

Переоснащение и обновление оборудования, в том числе и испытательного, должно привести к повышению точности, технологичности, массогабаритных и динамических показателей электроприводов. Невозможно выпускать конкурентоспособную продукцию на устаревшем оборудовании с использованием устаревшей технологии. Переоснащение производственно-технологической и испытательной базы является не только приоритетной, но и жизненно необходимой целью.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации нашей продукции, а также ее модернизация и модификация применяется и в других отраслях промышленности. Это позволяет предприятию не только увеличивать, но и формировать стабильный портфель заказов. При этом аккумулируются требования и специфические знания, предъявляемые к электрооборудованию в других сферах применения.

Для того, чтобы совершить скачок в технологических и конструкторских решениях, получить новые рынки сбыта, облегчить и ускорить сертификацию изделий (объектов), использовать поддержку в оформлении различного рода документов, целесообразно использовать опыт передовых фирм как отечественных, так и зарубежных. Задача адаптации к мировому рынку является крайне важной, так как интеграция России в мировую экономику происходит все более быстрыми тем-

пами и конкурировать с зарубежными фирмами становится все труднее.

Исходя из этого, основными требованиями для отраслевой авиационной промышленности и выпускаемой продукции предприятия является разработка наукоемкой продукции, соответствующей повышенным требованиям к внешним воздействующим факторам, содержащей техническую и технологическую новизну, отвечающей современному и опережающему техническому уровню.

ОАО «Электропривод», как разрабатывающее КБ, использует всесторонние способы для разработки конкурентоспособных изделий, такие как:

- проведение собственных научно-исследовательских работ для формирования научно-технического задела;
- внедрение современных систем проектирования для решения поставленных задач;
- внедрение в процесс разработки математических методов моделирования;
- выполнение разработок на высоком техническом и конкурентоспособном уровне;
- использование унификации в разработках;

• открытие новых тематических направлений.

Надежная экономическая база позволяет ОАО «Электропривод» и дальше развивать масштабные проекты по модернизации производства, внедрению в разработки новейших достижений науки и техники и социальной поддержки работников, а трудовому коллективу – быть уверенным в дальнейшей успешной деятельности и достойном будущем предприятия.

Вишневский Сергей Никодимович – родился в 1953 году. В 1980 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты», в 1998 году – Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Экономика и управление на промышленном предприятии». Имеет 41-летний опыт работы в области разработки авиационных электромеханических систем. В настоящее время работает заместителем генерального директора – техническим директором ОАО «Электропривод». Имеет 4 печатных труда, 3 патента. Награжден Почетной грамотой Российского авиационно-космического агентства.

Коньшев Дмитрий Владимирович – родился в 1977 году. В 1999 году окончил Вятскую государственную сельскохозяйственную

академию по специальности «Механизация сельского хозяйства», в 2003 году – Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Экономика и управление на промышленном предприятии». В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором ОАО «Электропривод». Имеет 5 патентов.

Vishnevskiy Sergey – was born in 1953. In 1980 he graduated from the Kirov Polytechnic Institute, specializing in «Electrical machinery and equipment», in 1998 – Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Economy and management at the industrial undertaking». 41 years of work experience in the field of aircraft electro-mechanical systems. He currently occupies the position of a deputy general manager and technical director of JSC «Electroprivod». He has 4 publications, 3 patents. He was awarded the diploma of the Russian Aviation and Space Agency.

Konyshov Dmitriy – was born in 1977. In 1999 he graduated from the Vyatskaya State Agricultural Academy specializing in «Mechanization of agriculture», in 2003 – Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Economy and management at the industrial undertaking». At present he works as a General Manager – chief designer of JSC «Electroprivod». He has 5 patents.

Электромеханизмы и электродвигатели разработки ОАО «Электропривод»

// Electric actuators and motors developed by JSC «Electroprivod» //

**Овечкин О.И., Миронов В.А.,
ОАО «Электропривод», г. Киров**

В статье представлен спектр продукции, выпускаемой ОАО «Электропривод» для авиационной, нефтегазовой и атомной промышленности.

Ключевые слова: электромеханизм, вентильный электродвигатель, автоматизированный электропривод.

ОАО «Электропривод» разрабатывает и изготавливает электродвигатели, электромеханизмы вращательного и поступательного движения, которые отличаются наименьшими массогабаритными показателями и высокой степенью надежности, предназначенные для авиационной техники,

Production range of goods developed by JSC «Electroprivod» for aircraft, nuclear and gas-and-oil industries is presented in this article.

Keywords: electric mechanism, BLDC, automatic electric drive.

атомных электростанций, нефтегазового комплекса и других отраслей промышленности. Изделия разработки ОАО «Электропривод» применяются на всех типах самолётов, вертолётов и других объектах.

Основу любого электромеханизма составляет электродвигатель. Предприятием выпускаются электродвигатели переменного тока частотой питающей сети 50 Гц и 400 Гц, постоянного тока напряжением питания 12, 27, 48 В, вентильные электродвигатели постоян-

ного тока, а также шаговые электродвигатели.

Вентильные электродвигатели имеют большой срок службы, обладают высоким быстродействием, наивысшими энергетическими и массогабаритными показателями (рис. 1, таблица 1). Накопленный опыт в проектировании электрических машин обобщен и формализован в разработанных методиках, отработаны различные конструктивные исполнения электродвигателей. В данный момент ведутся работы по расширению ряда вентильных электродвигателей мощностью 20 кВт и более.

Для работы в составе электропривода с высокими динамическими характеристиками и точностью позиционирования, удовлетворяющими требованиям исполнительных механизмов универсальных технологических роботов и другого прецизионного металлообрабатывающего оборудования, разработаны вентильные электродвигатели постоянного тока серии ДБМ (рис. 2, таблица 2).

Примечания:

1 – электродвигатели допускают работу в указанных режимах в соответствии с нагрузочной диаграммой (рис. 3);



Рис. 1. Вентильные электродвигатели разработки ОАО «Электропривод».



Рис. 2. Вентильные электродвигатели серии ДБМ.

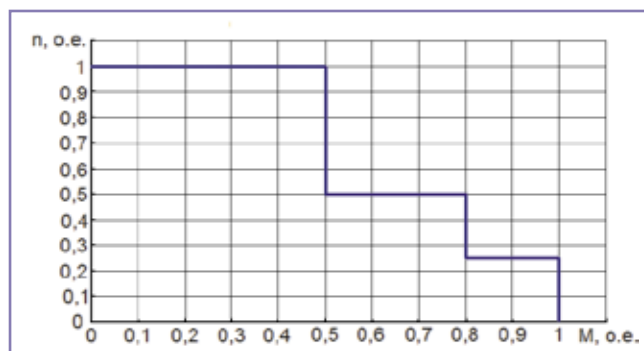


Рис. 3. Нагрузочная диаграмма электродвигателей серии ДБМ.

2 – испытаниями подтверждена работа электродвигателей при пониженной температуре окружающей среды минус 55 °С.

Электродвигатели серии ДБМ удовлетворяют требованиям по высо-

кой плавности и точности хода, высокому удельному моменту, низкому энергопотреблению и уровню шума и т.д.

Любой управляемый объект – летательный аппарат, газоперекачивающий агрегат или сложнейшая атомная

станция требует для выполнения своих функций различные исполнительные механизмы. Выпускаемые ОАО «Электропривод» электромеханизмы по типу движения выходного звена делятся на две большие группы:

Таблица 1. Характеристики вентильных электродвигателей постоянного тока.

Шифр изделия	Напряжение питания, В	Ток, А	Мощность, Вт	Частота вращения, мин-1	Режим работы	Габариты, Lxd, мм	Встроенный тормоз		Масса, кг, не более	Температура среды, °С
							Напряжение, В	Момент торможения, Н·м		
ДБ32-25-12	27	3,7 1,4	50 25	7000 12000	ПКР Д	63x32,9	-	-	0,18	-60...+85
ДБ100-3700-8М	115/200 400 Гц	17	5000	10000	ПКР	191x100	27	6,86	5,6	-60...+85
ДБ120-2200-15	270	9,0	2200	15000	ПКР	170x120	-	-	6	-60...+85
ДБ120-5500-18	270	22	5500	18000	ПКР	228x120	-	-	8	-60...+85
ДБ120-7500-15	270	35	7500	15000	ПКР	237x120	-	-	6,8	-60...+85
ДБ80-1100-12	115/200 400 Гц	7	1270	12000	ПКР	140x80	27	2,45	2,6	-60...+85
ДБ25-10-15-С40	27	0,8	10	16000	Д	56x25	27	0,0137	0,14	-60...+85
ДБ50-50-7-Д12	27	3,8	50	7800	ПКР	85x53	27	0,2	0,8	-60...+85
ДБ50-90-8	27	7	90	8000	ПКР	72x50	27	0,294	0,56	-60...+85
ДБ50-160-15	27	12	160	14000	ПКР	72x50	27	0,29	0,6	-60...+85
ДБ50-10-4	27	0,5 0,9	5 10	4300 4000	ПКР	74x55,5	27	0,19	0,6	+5...+85
ДБ80-2200-12	115/200 400 Гц	12	2300	12000	ПКР	163x80	27	0,382	3,8	-60...+85
ДБ120-22000-12	115/200 400 Гц	90	21000	11000	ПКР	290x120	-	-	12	-60...+85
ДБ100-2200-8	27	155	2600	8800	Д	163x80	-	-		-60...+85
ДБ110-900-8	115/200 400 Гц	5,5 6,3	900 1200	8000 7200	Д ПКР	175x110	27	3,2	4,5	-60...+85
ДБ160-3000-8	115/200 400 Гц	16 35	3200 5400	8000 6900	Д ПКР	215x158	27	15,6	13	-60...+85
ДБ100-4000-12	115/200 400 Гц	9 20	1900 4700	11700 10260	ПКР	200x101	27	6,8	6	-60...+85
2ДБ32-25-15	27	2,5	25	17000	Д	55x32	27	0,169	0,19	-60...+85

Таблица 2. Характеристики моментных вентильных электродвигателей серии ДБМ.

Шифр изделия	Напряжение питания, В	Ток, А	Момент, Н·м	Частота вращения, об/мин	Режим работы	Габариты, мм	Встроенный тормоз		Масса, кг, не более	Температура среды, °С
							Напряжение, В	Момент торможения, Н·м		
ДБМ72-1,1-6	540	2,3	1,1	6000	S3-S8	72x72x175	24	1,2	3,0	+1...+55
ДБМ72-1,6-6	540	3,2	1,6	6000	S3-S8	72x72x175	24	1,8	3,0	+1...+55
ДБМ115-3,2-3	540	3,2	3,2	3000	S3-S8	115x115x187	24	3,5	7,0	+1...+55
ДБМ126-6-3	540	5,9	6,0	3000	S3-S8	126x126x200	24	6,6	10,1	+1...+55
ДБМ142-11-3	540	10,4	11	3000	S3-S8	142x142x226	24	12,1	14,5	+1...+55
ДБМ142-11-4,5	540	16,2	11	4500	S3-S8	142x142x226	24	12,1	14,5	+1...+55
ДБМ142-18-3	540	17	18	3000	S3-S8	142x142x264	24	19,8	18,0	+1...+55
ДБМ192-18-3	540	17	18	3000	S3-S8	192x192x235	24	19,8	24,0	+1...+55
ДБМ192-18-4,5	540	25,6	18	4500	S3-S8	192x192x235	24	19,8	24,0	+1...+55
ДБМ192-27-3	540	25,6	27	3000	S3-S8	192x192x265	24	29,7	29,0	+1...+55
ДБМ192-36-3	540	34,1	36	3000	S3-S8	192x192x295	24	39,6	34,0	+1...+55

с вращательным движением выходного вала и поступательным движением выходного штока.

Среди однодвигательных электро-механизмов общего применения интерес представляет электро-механизм МРС-1, предназначенный для регулировки по росту сидения катапультных кресел летчиков. В электро-механизме применен вентильный электродвига-

тель мощностью 50 Вт со встроенным малогабаритным модулем управления.

Основные технические характеристики электро-механизма приведены в таблице 3.

Для привода воздушных заслонок систем кондиционирования воздуха, устанавливаемых на последних поколениях самолетов и вертолетов, разработаны ряды малогабаритных

электро-механизмов МПК-21...24А,Б (8 модификаций), МПК-31...34А,Б (8 модификаций) и МПК-41...43А,Б (6 модификаций), характеристики которых приведены в таблице 4.

Для привода топливных кранов на самолетах Ту-204 и ИЛ-96-300 разработаны высокоэффективные электро-механизмы МВД4Е6К, МПК-35, МПК-36, МПК-37, которые в настоя-

Таблица 3. Основные технические характеристики электро-механизма МРС-1.



	Напряжение питания постоянного тока, В	27
	Нагрузочный противодействующий момент, Н·м (кгс·м)	5,9±0,3 (0,60±0,03)
	Частота вращения выходного вала при номинальных значениях напряжения, момента, в нормальных условиях, не менее, с ⁻¹ (об/мин)	1,0 (60)
	Масса, не более, кг	2,0
	Число оборотов выходного вала, ограниченное концевыми микровыключателями, обороты	от 15 до 45 регулируется поставщиком
	Режим работы	повторно-кратковременный
	Исполнение	всеклиматическое

Таблица 4. Основные характеристики электро-механизмов для СКВ.

	МПК-21	МПК-22	МПК-23	МПК-24	МПК-31	МПК-32	МПК-33	МПК-34	МПК-41	МПК-42	МПК-43
Напряжение питания постоянного тока, В	27										
Номинальный нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)	2,0 (0,2)				3,92 (0,4)				5,88 (0,6)		
Частота вращения при номинальном моменте, об/мин	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	2,0	3,5
Угол поворота выходного вала, град	Вариант А – 90° Вариант Б – 180°										
Масса, кг не более	0,36				0,64						
Габариты, мм	108 x 70,5 x 60,5				118,5 x 80 x 75						
Исполнение	всеклиматическое										

щее время применяются практически на всех современных отечественных самолетах и вертолетах. Основные технические характеристики электро-механизмов приведены в таблице 5.

Для привода насоса системы жидкостного охлаждения бортовой аппаратуры самолетов разработан электро-механизм МВ1Е5Т-1 с вращательным движением выходного вала без ограничения угла поворота. Технические характеристики электро-механизма приведены в таблице 6.

В системах управления различными рулевыми поверхностями самолета применяются двухканальные (с двумя электродвигателями) электро-

механизмы повышенной надёжности. Электро-механизмы могут работать как от двух электродвигателей, так и от одного (любого) электродвигателя с половинной частотой вращения выходного вала.

Технически уникальным является электро-механизм МВ3,5Д25Д, представленный в таблице 7, разработанный для управления предкрылками и стабилизатором на самолете-амфибии Бе-200. Электро-механизм имеет встроенную фрикционную муфту для защиты трансмиссии и электродвигателей от перегрузок, безопасный ручной привод, имеет малые габариты и массу, удовлетворяет современным

требованиям по внешним воздействующим факторам, техническому уровню и ресурсу.

Для автоматизированных электро-приводов разработаны и изготавливаются исполнительные электро-механизмы с вентильными электродвигателями:

- МВ25Д2СМ – для автоматизированного электропривода ЭПЗ-77М, предназначенного для выпуска и уборки закрылков на самолете Ан-70;

- МВ5Д5С – для электропривода управления предкрылками и закрылками самолета Ту-334;

- МПП(МПЗ)-204 – для электропривода предкрылков и закрылков самолета Ту-204 (таблицы 8-10).

Таблица 5. Основные технические характеристики электромеханизмов МВД4Е6К, МПК-35, МПК-36, МПК-37.


	МВД4Е6К	МПК-35	МПК-36	МПК-37
Особенности конструкции	-	-	двухканальный	С муфтой ограничения момента
Напряжение питания постоянного тока, В	27			
Номинальный нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)	3,9 (0,4)	9,81 (1,0)	9,81 (1,0)	24,5 (2,5)
Угол поворота выходного вала, град	92	90	90	30 – 180
Частота вращения выходного вала, об/мин	5	5,0	7,5 от двух электродвигателей	3,0
Момент срабатывания муфты, Н·м (кгс·м)	-	-	-	34,3-49 (3,5-5)
Масса, кг	0,59	0,71	1,25	1,1
Габариты, мм	108x81x65	148x73,5x64	137x119x72	141x103,5x63
Исполнение	всеклиматическое			

Таблица 6. Технические характеристики электромеханизма МВ1Е5Т-1.


	Род тока	115/200В, 400Гц 3-х фазный
	Номинальный нагрузочный момент, Н·м (кгс·м) Максимальный нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)	0,83 (0,085) 1,18 (0,12)
	Частота вращения выходного вала при номинальных значениях напряжения, частоты, нагрузочного момента в нормальных условиях, об/мин, не менее	5000
	Ток, потребляемый электромеханизмом при номинальных значениях нагрузочного момента, напряжения и частоты в нормальных условиях, А, не более	3,35
	Режим работы	продолжительный
	Масса, кг, не более	2,7
	Габаритные размеры, мм	178x132x92
	Исполнение	всеклиматическое

Таблица 7. Технические характеристики электромеханизма МВ3,5Д25Д.


	Род тока	Для питания электродвигателя	115/200 В, 400 Гц 3-х фазный
		Для питания электромагнитных тормозов электродвигателей и цепей управления	27 В постоянный
	Нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)	Номинальный противодействующий	34,3 (3,5)
		Максимальный противодействующий	44,1 (4,5)
Максимальный помогающий		24,5 (2,5)	
Момент на выходном валу, ограниченный фрикционной муфтой, Н·м (кгс·м)			54-83,3 (5,5-8,5)
Частота вращения выходного вала, при работе двух электродвигателей, при номинальных значениях напряжения и частоты в нормальных условиях, с-1 (об/мин)	При номинальном нагрузочном моменте, не менее	4,17 (250)	
	При максимальном нагрузочном моменте, не менее	3,67 (220)	
	При максимальном помогающем моменте, не более	5,33 (320)	
Масса, кг, не более			10,4
Габариты, мм			284 x 230 x 112
Исполнение			всеклиматическое

Таблица 8. Технические характеристики электромеханизма МВ25Д2СМ.


	Напряжение питания, В	Переменного ток	115/200 В, 400 Гц 3-х фазный
		Постоянного ток	27
	Нагрузочный момент, Н•м	Противодействующий	245
		Помогающий	176
	Частота вращения, об/мин	При противодействующем моменте	300
		При помогающем моменте	500
	Масса, кг, не более	26,3	
	Габариты, мм	245x300x460	
Исполнение	Всеклиматическое		

Таблица 9. Технические характеристики электромеханизма МВ5Д5С.



	Напряжение питания, В	Переменного ток	115/200 В, 400 Гц 3-х фазный
		Постоянного ток	27
	Нагрузочный момент, Н•м	Противодействующий	58,8
		Помогающий	20
	Частота вращения, об/мин	При противодействующем моменте	380
		При помогающем моменте	580
	Масса, кг, не более	15,5	
	Габариты, мм	310x251x193	
Исполнение	всеклиматическое		

Таблица 10. Технические характеристики электромеханизма МПП(МПЗ)-204.

	Напряжение питания, В	Переменного тока	115/200 В, 400 Гц 3-х фазный	
		Постоянного тока	27	
	Нагрузочный момент, Н•м	Противодействующий	137	
		Помогающий	49	
	Электропривод обеспечивает:			
	- отработку перемещения предкрылков и закрылков в положение, соответствующее текущему значению управляющего сигнала, с автоматическим регулированием параметров электропривода или сигналам от блока задающих датчиков рукоятки управления; а также при разомкнутом контуре управления от переключателей, установленных в кабине экипажа; при питании электропривода от аварийного источника постоянного тока ограниченной мощности; от одного канала электропривода в случае неисправности второго канала;			
	- встроенный автоматизированный контроль состояния электропривода в полете и на земле;			
	- фиксацию выходных валов электромеханизмов с помощью стояночных тормозов электродвигателей.			

Из электромеханизмов для вращения антенных обтекателей интерес представляет разработанный и выпускаемый в настоящее время электромеханизм МВТЗД4, который применяется на самолете А-50 и вертолете К-31. Электромеханизм обеспечивает вращение антенного обтекателя в двухскоростном режиме.

На базе МВТЗД4 разработан электромеханизм МВТЗД4-2 для самолета А-50М, обеспечивающий вращение

антенного обтекателя в трехскоростном режиме.

Новой разработкой в этой области автоматизированных электроприводов на основе вентильных электродвигателей является электропривод ЭПАО-100, в состав которого входит электромеханизм МПАО-100. Основные технические характеристики МВТЗД4-2 приведены в таблице 11.

Отличительной чертой этих электромеханизмов является продолжи-

тельный режим работы, большой ресурс. Система управления обеспечивает плавное раскручивание антенного обтекателя, имеющего большой момент инерции, до заданной частоты вращения и плавный останов при выключении электромеханизма.

Повышенный спрос потребителей существует на разработанные и выпускаемые ОАО «Электропривод» электромеханизмы с поступательным движением выходного штока.



Рис. 4. Электромеханизмы поступательного движения.

Созданы базовые конструкции электромеханизмов:

- МП4С... с нагрузкой на штоке до 400 Н;
- МП10С... с нагрузкой на штоке до 1000 Н;
- МП25С... с нагрузкой на штоке до 2500 Н;
- МП40С... с нагрузкой на штоке до 4000 Н.

На основе каждой базовой конструкции созданы ряды электромеханизмов, отличающихся выходными характеристиками, расположением конструктивных элементов и др. Электромеханизмы разработаны на высоком техническом уровне, соответ-

ствуют современным требованиям по внешним воздействующим факторам, ресурсу и нашли широкое применение практически на всех типах современных самолетов и вертолетов (рис. 4, таблица 12).

Разработаны и производятся электромеханизмы для привода стеклоочистителей, применяющиеся практически на всех отечественных вертолетах МИ-8, а также нашедшие применение на всех типах вертолетов и легких самолетов. Наиболее массовым по выпуску является электромеханизм ЭПК-2Т.

Таблица 11. Технические характеристики электромеханизма МПА0-100.


	Род тока	Для питания электродвигателей	115/200 В, 400 Гц, 3х фазный
		Для питания электромагнитных тормозов электродвигателей и цепей управления	27 В, постоянный
	Номинальный нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)		540 (55)
	Момент на выходном валу, ограниченный муфтой предельного момента, Н·м (кгс·м)		590 (60)
	Частота вращения выходного вала, об/мин:		
	- на первом скоростном режиме		42
	- на втором скоростном режиме		21
	- на третьем скоростном режиме		10,5
	- на четвертом скоростном режиме		2
	Масса, кг		75
	Габаритные размеры, мм		565x510x175
	Исполнение		всепогодное

Таблица 12. Характеристики электромеханизмов поступательного движения.

Наименование	Напряжение питания постоянного тока, В	Номинальная нагрузка вдоль оси штока, Н (кгс)	Скорость штока номинальная, мм/с	Рабочий ход штока, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, кг, не более
МП1С10А...	27	98 (10)	10	5-50	35x60x160	0,4
МП1С6А...			6,3			
МП2С4А...			4			
МП4С2,5А...			2,5			
МП4С4А...		392 (40)	4	10-80	41x96x182	0,9
МП4С6А...			6,3			
МП4С10А...			10			
МП10С2,5А...		980 (100)	2,5			
МП10С4А...			4			
МП10С6А...			6,3			
МП25С4А...		2450 (250)	4	20-180	82x107x363	2,7
МП25С6А...			6,3			
МП25С10А...			10			
МП40С3А...		3920 (400)	3,2			
МП40С6А...			6,3			
МП40С10А...			10			

Таблица 13. Электромеханизмы для привода стеклоочистителей.



	Род тока	Электродвигателя	ЭПК-6 115/200 В 3-х фазный переменный	ЭПК-5 115/200 В 3-х фазный переменный
		Электромагнитной муфты	27 В постоянный	27 В постоянный
Нагрузочный момент, Н·м (кгс·м)	Номинальный	9,8 (1)	19,6 (2)	
	Максимальный	19,6 (2)	31,4 (3,2)	
Частота вращения выходного вала при номинальном нагрузочном моменте, об/мин				
- на малой скорости		60	70	
- на большой скорости		120	145	
Угол качания выходного вала, град				
- I исполнение		55	68	
- II исполнение		82	85	
Масса, кг, не более		2,8	5,5	
Габаритные размеры, мм		243 x 188,5 x 90	288x187x91	
Исполнение		всеклиматическое	всеклиматическое	

Таблица 14. Электромеханизм перемещения контейнеров.

	Напряжение питания, В	115/200 В, 3-х фазный переменный
		27 для цепей управления
Тяговое усилие, Н (кгс)		440(45)
Линейная скорость на образующей ролика при его вращении, м/с		0,15
Высота подъема ролика, мм		10
Масса, кг, не более		2,25
Исполнение		всеклиматическое
Габариты, мм		202x170x50

Для самолетов Ту-204, Ту-214, Ил-96-300 разработан унифицированный электромеханизм ЭПК-5, который позднее применили на самолетах Ан-70, Ту-334. Электромеханизм ЭПК-6 разработан для самолета Ил-114, в настоящее время применяется на самолетах Бе-200, Ан-140 (таблица 13).

Оригинальной разработкой ОАО «Электропривод» является электромеханизм МК-204МА, предназначенный для перемещения грузовых контейнеров в багажно-грузовых отсеках самолетов Ту-204, Ту-214. Подобная разработка выполнена в отрасли впервые (таблица 14).

Проведенный в статье обзор разработанных и выпускаемых ОАО «Электропривод» электродвигателей и электромеханизмов показывает широкий спектр их номенклатуры и применений. ОАО «Электропривод» постоянно проводит работы по со-

вершенствованию, внедрению новых конструкторских решений и технологий для создания научно-технического задела и разработки перспективных электродвигателей и электромеханизмов.

Овечкин Олег Иванович – родился в 1965 году. В 1989 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Конструирование электронно-вычислительной аппаратуры». В области авиационных систем управления – 23 года. В настоящее время работает начальником отдела маркетинга ОАО «Электропривод». Имеет 8 научных трудов.

Миронов Владимир Александрович – родился в 1939 году. В 1968 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электромеханизмов – 50 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем тематического

направления ОАО «Электропривод». Имеет 16 научных трудов, 10 патентов. Награжден медалью ордена «За заслуги перед отечеством» 2 степени.

Ovechkin Oleg – was born in 1965. In 1989 he graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Designing of computer equipment». He is working in the sphere of aviation control systems for 21 years. At present he is working as a head of the Marketing Department in JSC «Electroprivo». He is the author of 5 scientific works.

Mironov Vladimir – was born in 1939. In 1968 he graduated from Kirov Polytechnic Institute, speciality is «Electrician». Work experience in the sphere of aviation electronic devices is 50 years. At present he is working as a chief designer-director of the Subject Direction in JSC «Electroprivo». He is the author of 16 scientific works, 10 patents. He is awarded with the second level order medal «Service for the Mother country».

Применение полевых математических моделей для проектирования обмоток вентильных электродвигателей

// Usage of field mathematical model for bldc-motor winding designing //

**Волокитина Е.В., к.т.н., Власов А.И., к.т.н., Опалев Ю.Г., к.т.н.,
ОАО «Электропривод» г. Киров**

В статье представлен метод определения ЭДС и корректности схемы соединения обмотки вентильного электродвигателя посредством полевой математической модели. Результаты расчета подтверждены экспериментальными исследованиями вентильного электродвигателя с внешним ротором ДБ100-90-1-Р42. Ключевые слова: вентильный электродвигатель постоянного тока с внешним ротором, полевая математическая модель, потокосцепление, ЭДС, гармонический анализ.

При разработке специальных электрических машин (ЭМ) с нетрадиционными активными частями, либо при проектировании ЭМ, работающих в особых эксплуатационных режимах (например, при несимметрии питающего напряжения), возникает настоятельная необходимость в расчете и анализе их магнитных полей. Кроме того, возникает вопрос о корректности схемы соединений обмотки с целью обеспечения необходимой формы (синусоидальной или трапецеидальной) и симметричности фазных ЭДС.

Наиболее трудный случай имеет место при исследовании ЭМ с обмоткой, которая характеризуется дробным числом пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2mp} \neq \text{целое число}$$

где z – число пазов статора,
 m – число фаз обмотки,
 p – число пар полюсов.

This paper presents the method for EMF definition and correctness of the winding diagram of the brushless DC motor winding using a mathematical model. Calculation results are confirmed by experimental research of the brushless DC motor with external rotor.

Keywords: Brushless DC motor with external rotor, field mathematical model, flux linkage, EMF, harmonic analysis.

Данный тип обмотки нашел широкое применение в вентильных электродвигателях постоянного тока (ВДПТ) с постоянными магнитами (ПМ) [1], а также в магнитоэлектрических генераторах [2].

Полевая постановка задачи при выполнении исследований электромагнитных полей ЭМ с постоянными магнитами является наиболее актуальной и перспективной, т.к. решение выполняется с учетом реальной геометрии магнитной системы ЭМ, действительного токораспределения ее обмоток, а также нелинейных свойств ферромагнитных сердечников.

Расчет магнитного поля ВДПТ с высококоэрцитивными ПМ во многих случаях удобно выполнять через векторный магнитный потенциал A .

В магнитоэлектрическом поле векторный магнитный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона. Для каж-

дой из областей уравнения A имеет свою форму записи [3].

Для линейной и анизотропной среды в прямоугольной системе координат оно имеет следующий обобщенный вид

$$\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -j_z \quad (1)$$

Вектор индукции B всегда лежит в плоскости модели, а вектор плотности стороннего тока j и векторный потенциал A перпендикулярны к ней. Для ПМ уравнение в декартовой системе координат имеет вид

$$\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -j_z + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

где μ_x, μ_y – компоненты тензора относительной магнитной проницаемости μ , j_z – осевая проекция вектора плотности тока.

В области немагнитного зазора $\mu = \mu_0 = \text{const}$ уравнение для векторного потенциала A упрощается и записывается как

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

В немагнитных областях с токами обмотки статора, уравнение для A становится неоднородным и принимает следующий вид

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 j(x, y) \quad (4)$$

где $j(x, y)$ – расчетная плотность стороннего тока обмотки статора.

В областях ферромагнитных сердечников с нелинейной зависимостью магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля уравнение для векторного потенциала в прямоугольной системе координат при $\mu = \infty$ имеет вид

$$\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

где $\mu = f(H)$.

Граничные условия, необходимые для решения уравнений (2) – (5), задаются исходя из физических условий существования магнитного поля на внешних границах расчетной области. Векторный потенциал при расчете любого поля на внешней поверхности ферромагнитного сердечника статора равен нулю ($A=0$).

Особенности ЭМ с редкоземельными ПМ, такие как линейность кривой размагничивания по индукции, относительно небольшое насыщение участков магнитной цепи, позволяют разделить магнитные поля, создаваемые магнитом и обмоткой якоря, рассматривать их отдельно и затем использовать метод наложения.

Методы исследования электромагнитных полей, основанные на теории электромагнитного поля, являются наиболее перспективными при проектировании и оптимизации конструкции ВДПТ [4].

Развитие вычислительной техники и применение математического аппарата различных численных методов расчета способствовало разработке специализированного программного обеспечения для моделирования магнитных полей, такого как ELCUT, FEMM, MAXWELL и ANSYS. Применение перечисленных программ суще-

ственно сокращает сроки разработки электромагнитных устройств с одновременным увеличением точности расчетов, а также позволяет осуществлять оптимизацию магнитных систем на стадии проектирования.

Моделирование ЭДС обмотки с дробным q производилось с использованием программы ELCUT, разработанной НПКК «ТОР», г. Санкт-Петербург.

Моделирование ЭДС обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу q

Существуют аналитические методы расчета распределения и соединенный многофазных обмоток, которые приведены в [5-7]. При расчете обмотки аналитическими методами требуется выполнять достаточно большой объем вычислений для определения гармонического состава ЭДС и обмоточных коэффициентов.

Алгоритм моделирования ЭДС обмотки с дробным q проведем на примере обмотки ВДПТ с внешним ротором ДБ100-90-1-Р42, разработанного в ОАО «Электропривод» (г. Киров).

Электродвигатель ДБ100-90-1-Р42 имеет трехфазную зубцовую обмотку с числом полюсов $2p=16$, числом пазов $z=18$, числом фаз $m=3$ и числом пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2mp} = \frac{18}{16 \cdot 3} = 0,375 \quad (6)$$

Схема обмотки электродвигателя ДБ100-90-1-Р42 показана на рис. 1.

Для расчета ЭДС с помощью полевой математической модели необходимо опреде-

лить потокосцепления соответствующих элементов фаз.

Обобщенный алгоритм расчета потокосцеплений фаз с использованием программы ELCUT [8] заключается в следующем:

- создается полевая математическая модель поперечного сечения магнитной системы электродвигателя с заданием основных блоков, их свойств и граничных условий (рис. 2);

- задаются элементы фаз U_+ , U_* , V_+ , V_* , W_+ , W_* в соответствии со схемой обмотки и направлением токов в ней;

- задаются источники магнитного поля – постоянные магниты N и S полярности;

- проводится расчет модели;

- после окончания расчета на картине магнитного поля задается контур интегрирования выделением каждой фазы (U_+ , U_* , V_+ , V_* , W_+ , W_*) с определением потокосцепления каждой фазы (Ψ_{U_+} , Ψ_{U_*} , Ψ_{V_+} , Ψ_{V_*} , Ψ_{W_+} , Ψ_{W_*}) в интегральном калькуляторе;

- для получения зависимостей $\psi=f(\varphi)$ (где φ – угол поворота ротора) необходимо задать вращение ротора в программе LabelMover.

Мгновенные значения фазных ЭДС e рассчитываются по формулам (7)-(9) [9].

$$e_U = (\Psi_{U_+} - \Psi_{U_*}) \cdot \frac{l_{cp} \cdot n \cdot W \cdot p}{9,55} \quad (7)$$

$$e_V = (\Psi_{V_*} - \Psi_{V_+}) \cdot \frac{l_{cp} \cdot n \cdot W \cdot p}{9,55} \quad (8)$$

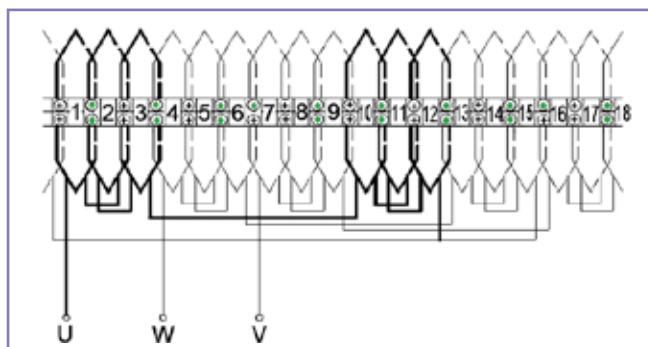


Рис. 1. Схема обмотки электродвигателя ДБ100-90-1-Р42.

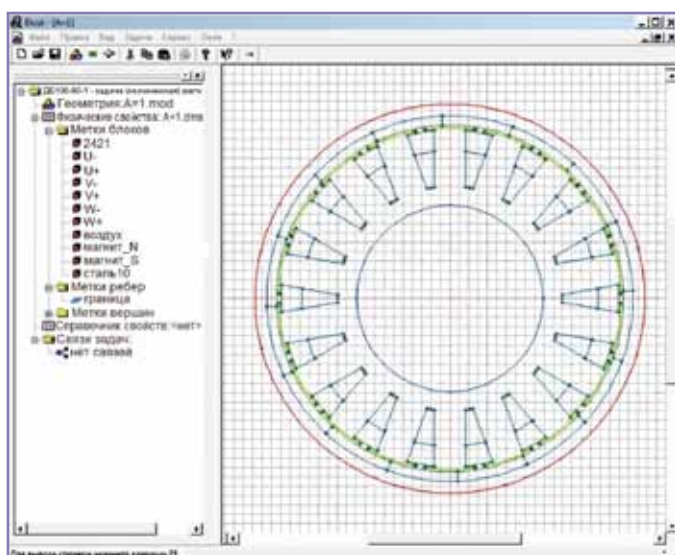


Рис. 2. – Задание полевой математической модели в ELCUT.

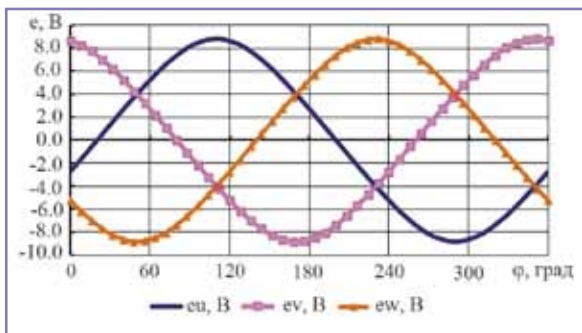


Рис. 3. Фазные ЭДС электродвигателя ДБ100-90-1-Р42 в зависимости от угла поворота ротора.

$$e_w = (\psi_{w-} - \psi_{w+}) \cdot \frac{l_{cp} \cdot n \cdot W \cdot p}{9,55} \quad (9)$$

где l_{cp} – средняя длина активных частей электродвигателя, м;

n – частота вращения, об/мин;

W – число витков фазы;

p – число пар полюсов.

Графики фазных ЭДС электродвигателя ДБ100-90-1-Р42 в зависимости от угла поворота ротора в электрических градусах показаны на рис. 3.

Синусоидальность кривых, а также угол сдвига фазных ЭДС, равный 120 эл.град., свидетельствуют о корректности соединений секций и симметричности обмотки.

Максимальная величина мгновенного значения фазной ЭДС является амплитудным значением фазной ЭДС E .

Действующее значение фазной ЭДС, В

$$E_0 = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

Действующее значение линейной ЭДС, В

$$E_n = \frac{\sqrt{3}E}{\sqrt{2}} = \sqrt{3}E_0 \quad (11)$$

Гармонический анализ кривых ЭДС проводился посредством разложения в ряд Фурье [10] по формуле

$$e(\varphi) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(e_c \cos\left(\frac{k\pi\varphi}{180\tau}\right) + e_s \sin\left(\frac{k\pi\varphi}{180\tau}\right) \right) \quad (12)$$

где k – порядковый номер гармоники;

τ – полюсное деление, м;

амплитуды косинусных и синусных гармоник e_c и e_s определяются

$$e_c = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} e(\varphi) \cos\left(\frac{k\pi\varphi}{180\tau}\right) d\varphi \quad (13)$$

$$e_s = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} e(\varphi) \sin\left(\frac{k\pi\varphi}{180\tau}\right) d\varphi$$

В результате гармонического анализа кривых ЭДС выявлено наличие основной гармоники первого порядка и незначительные амплитуды гармоник высшего порядка. Результа-

ты расчетов приведены в таблице 1.

Амплитуда третьей гармоники ЭДС составляет 3% от амплитуды первой гармоники. Амплитуды остальных гармоник высшего порядка составляют 0,2 % и менее. В результате проведенного гармонического анализа можно сделать заключение о нецелесообразности применения конструктивных мер борьбы с высшими гармониками в кривой ЭДС электродвигателя ДБ100-90-1-Р42.

Адекватность полевой математической модели была подтверждена при экспериментальных исследованиях вентильного электродвигателя с внешним ротором ДБ100-90-1-Р42.

Осциллограммы фазных ЭДС обмотки электродвигателя ДБ100-90-1-Р42 показаны на рис. 4.

Осциллограммы фазных ЭДС показывают соответствие экспериментальных параметров расчетным.

Выводы

Полевая математическая модель в процессе проектирования нового электродвигателя позволяет оценить правильность построения схемы многофазной обмотки и выполнять оценку формы и симметричности фазных ЭДС.

В результате гармонического анализа выявлено, что проведение конструктивных мероприятий по борьбе с высшими гармониками ЭДС в элек-

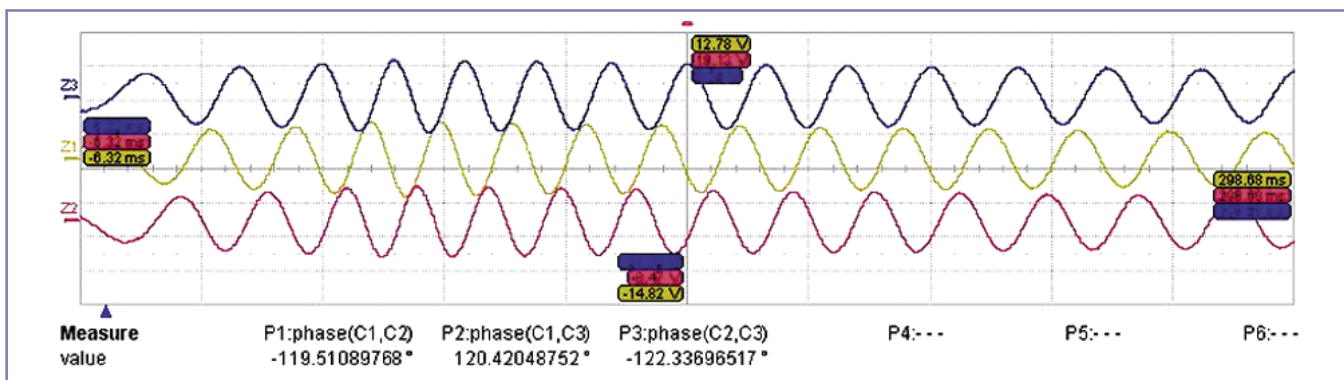


Рис. 4. Осциллограммы фазных ЭДС обмотки электродвигателя ДБ100-90-1-Р42.

Таблица 1. Гармонический анализ кривой ЭДС.

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда гармоники, %	100	0,0038	3,067	0,0012	0,206	0,0019	0,044	0,0034	0,0017	0,0064
Номер гармоники	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Амплитуда гармоники, %	0,034	0,0025	0,011	0,002	0,069	0,0023	0,108	0,0016	0,065	0,0011
Номер гармоники	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Амплитуда гармоники, %	0,017	0,0008	0,0014	0,0094	0,0004	0,019	0,0006	0,014	0,0007	0,0044

тродвигателе ДБ100-90-1-Р42 нецелесообразно.

Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями электродвигателя ДБ100-90-1-Р42.

Литература:

1. Захаренко А.Б. Исследование вентильной машины для привода электромобиля. //Электротехника – 2002 – №7. – с.2-10.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.-Л.: Энергия, 1964 – 480 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин- М.: Высш. шк., 2001. – 326 с.
4. Опалев Ю.Г., Волокитина Е.В., Власов А.И., Никитин В.В. Исследование и оптимизация динамических и массогабаритных показателей вентильных электродвигателей методами численного моделирования магнитного поля// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №3. – с.22-25.
5. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 400 с.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 1. Изд. 2. М.-Л.: Энергия, 1964. – 544 с.
7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2. Изд. 2. М.-Л.: Энергия, 1965. – 704 с.
8. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.3. Руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2006. – 284 с.
9. Bianchi, N. Electrical machine analysis using finite elements. CRC Press, USA – 2005. – 275 p.
10. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 1972. – 872 с.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». 9 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником конструкторского отдела ОАО «Электропривод». Имеет 20 научных трудов.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». 9 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоя-

щее время работает начальником конструкторского бюро ОАО «Электропривод», аспирант Чувашского государственного университета. Имеет 11 научных трудов.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». He is a candidate of Engineering. In 2010 he defended a thesis, the theme is: «Magnetolectric starter-generator in the New generation plain power system». At present he works as a Head of the Design Department in JSC «Electroprivod». He is the author of 20 scientific works.

Opalev Yuriy – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He is a Candidate of Science. In 2011 he defended a thesis about «AC electronic motors for precise fast-acting drives of mechatronic process models». He has been working in the area of aircraft electrical machines for nine years. At present he is a head of the design center JSC «Electroprivod». He has 11 scientific works.

Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Часть II

// Investigations of mid-flight engine generating and starting system in «all electric aircraft» concept. Part II //

Волокитина Е.В., к.т.н.
ОАО «Электропривод», г. Киров

В статье приведены основные результаты разработки технических материалов по системе генерирования и запуска маршевого двигателя «полностью электрифицированного самолета».

Ключевые слова: полностью электрифицированный самолет, система генерирования, система запуска, авиадвигатель, стартер-генератор.

Научная программа «полностью электрифицированного самолета» (ПЭС), возникшая в 70-е годы прошлого века, в настоящее время для самолетостроителей становится все более актуальной, особенно за рубежом, а также в России в связи с повышением требований эффективности, эксплуатационной надежности, безопасности устройств самолета.

Концепция ПЭС сказывается на принципах построения и особенностях функционирования основных систем и агрегатов самолета и предполагает применение электрической энергии во всех системах самолета и двигателя.

Реализация концепции ПЭС предполагает существенное изменение облика силовой установки самолета и создания «электрического двигателя» вследствие ликвидации отбора воздуха для системы кондиционирования (СКВ) и противообледенительной системы (ПОС), устранения привода гидросистемы, интеграции источника электрической энергии с авиационным двигателем, широкого применения

Main results of technical materials development for generating and starting of « all electric aircraft » mid-flight engine system are considered in this article.

Keywords: fully electrified aircraft, power generating system, engine starting system, aircraft engine, starter-generator.

электропривода в системах управления газотурбинным двигателем (ГТД) и т.д.

Обобщая содержание концепции «электрического авиадвигателя» для электрического самолета, можно выделить несколько положений:

- исключение отбора воздуха от компрессора авиадвигателя и переход на системы кондиционирования и жизнеобеспечения на базе специально-

го компрессора с электроприводом;

- исключение коробки приводов самолетных и двигательных устройств;

- создание электрической ПОС воздухозаборника двигателя;

- использование электроприводов на базе вентильных электродвигателей с постоянными магнитами в системе автоматического управления двигателя ГТД, включая подачу и дозирование топлива, перемещение органов механизации газозаборного тракта, привод агрегатов маслосистемы;

- использование электрического привода реверсивного устройства;

- переход на новую систему электроснабжения самолета повышенного напряжения постоянного тока с напряжением 270 (540) В или переменного тока с напряжением 115 (230) В переменной частоты, рассчитанную на передачу увеличенной в 2-3 раза мощности, мощность одного канала генерирования до уровня 300 кВт·А;

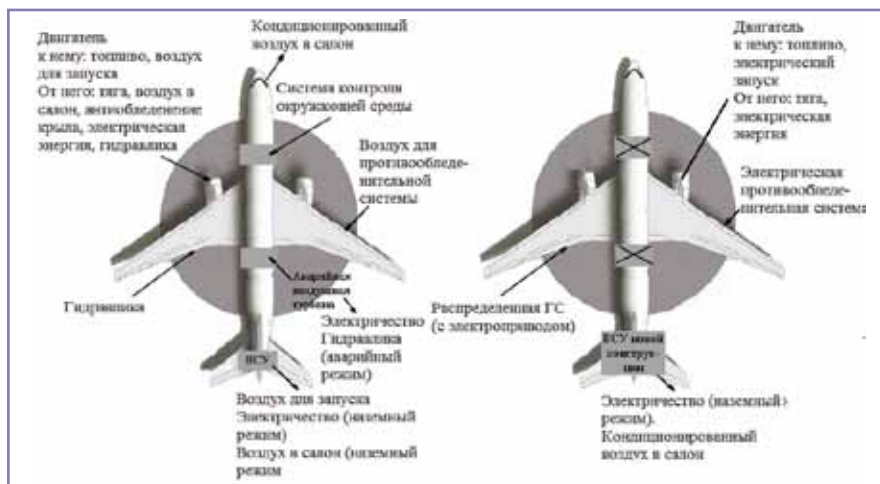


Рис. 1. Сравнение обычных и электрифицированных систем самолета.

• разработка электрических бесконтактных генераторов с удельной массой 0,2-0,4 кг/кВт, одновременно выполняющих функцию электрического стартера для запуска авиадвигателя, в перспективе интегрированных в авиадвигатель.

На рис. 1 показано обобщенное сравнение систем обычного самолета и максимально электрифицированного самолета/двигателя [1].

Запуск ГТД является одним из его важнейших эксплуатационных режимов.

Для запуска авиационных ГТД применяют стартеры различного принципа действия. Выбор стартера зависит от большого числа факторов, в частности, от назначения и размерности двигателя, требуемой продолжительности запуска, требования автономности пусковой системы. При этом немаловажное, а в ряде случаев определяющее значение имеет тип энергосистемы самолета (в особенности для автономных пусковых систем).

Наибольшее распространение для двигателей малой размерности в гражданской авиации нашли электрические стартеры. Для двигателей средней и большой размерности – воздушные стартеры. Для двигателей военного назначения – газотурбинные стартеры [2].

Для турбостартерного запуска газотурбинного двигателя используется турбокомпрессорный стартер, представляющий собой малогабаритный газотурбинный двигатель [3], который, в свою очередь, запускается электростартером. Использование турбостартеров усложняет производство и эксплуатацию газотурбинного двигателя, увеличивает общее время запуска.

Воздушная пусковая система – это система, обеспечивающая раскрутку ротора двигателя в процессе его запуска воздушным турбостартером. К недостаткам воздушной пусковой системы относится сложность подвода рабочего тела (воздуха) с минимальными потерями давления и температуры.

Электрическое пусковое устройство представляет собой электрический двигатель. Электрическим пусковым устройствам свойственны простота конструкции, невысокая стоимость, простота управления и легкость автоматизации процесса запуска, высокая надежность, удобство

Таблица 1. Бортовые генераторы зарубежных самолетов.

Самолет	Источники электроэнергии
A300	2x90 кВ·А (1x Двигатель) +90 кВ·А (ВСУ)
B767	2x120 кВ·А (1x Двигатель) +120 кВ·А (ВСУ)
A310	2x90 кВ·А (1x Двигатель) +90 кВ·А (ВСУ)
A320	2x90 кВ·А (1x Двигатель) +90 кВ·А (ВСУ)
B747	4x90 кВ·А (1x Двигатель) +2x90 кВ·А (ВСУ)
A340	4x75 кВ·А (1x Двигатель) +115 кВ·А (ВСУ)
A330	2x115 кВ·А (1x Двигатель) +115 кВ·А (ВСУ)
B777	2x120 кВ·А (1x Двигатель) +120 кВ·А (ВСУ)
A380	4x150 кВ·А (1x Двигатель) +2x120 кВ·А (ВСУ)
B787	4x250 кВ·А (2x Двигатель) +2x225 кВ·А (ВСУ)

обслуживания и постоянная готовность к запуску.

Недостатком электростартеров является увеличение их массы с ростом мощности. Электростартер, являющийся отдельной конструктивной единицей относительно большой массы и габаритов, выполняет функции запуска и в дальнейшем является неиспользуемым грузом, увеличивающим полетную массу самолета.

Наиболее рациональна конструкция, в которой электростартер используется после запуска в качестве бортового электрогенератора. По конструктивному выполнению стартер-генераторы представляют собой коллекторную электрическую машину постоянного тока, основным недостатком которой является низкая надежность, обусловленная наличием щеточно-коллекторного узла.

Мировой опыт разработки и эксплуатации самолетных генераторов переменного тока показал, что трехкаскадная конструкция бесконтактного явнополюсного синхронного генератора с вращающимися выпрямителями является предпочтительной ввиду весьма высокого технического уровня таких электрических машин как в России, так и за рубежом, что обусловило ее широкое распространение на большинстве современных самолетов, в том числе на А-380 и Boeing-787.

Отечественной промышленностью генераторы серии ГТ выпускаются с 1960-х годов и в настоящее время широко используются на самолетах

и вертолетах в качестве основных, резервных и аварийных источников электроэнергии трехфазного переменного тока.

Генераторы серии ГТ мощностью 60, 90 и 120 кВ·А применяются соответственно на самолетах Су-30, Су-33, Су-32, Су-34, Су-35, Ту-204, Ту-214, Ту-334, Ан-124, Ан-225 и Ту-22МЗ (ГТ60), Ил-96 и Ан-70 (ГТ90), Ту-160 (ГТ120) и других.

Широкое применение бесконтактных генераторов с вращающимся выпрямителем на зарубежных самолетах показывает таблица 1 [4].

При таком масштабном использовании бесконтактных генераторов переменного тока с вращающимся выпрямителем идеальным решением является их использование в качестве стартеров в системах запуска и генерирования маршевого двигателя, используя принцип обратимости электрических машин. Но, как известно, синхронный генератор с вращающимся выпрямителем в его классическом исполнении является необратимой машиной с невозможностью реализации стартерного режима.

В [5] рассматривается вариант реализации стартерного режима на базе генератора с вращающимся выпрямителем, в качестве возбудителя которого применена асинхронная машина с фазным ротором.

Не исключаются и другие способы организации стартерного режима, но все они требуют детальной проработки технического решения, расчетов, макетирования и подтвержде-

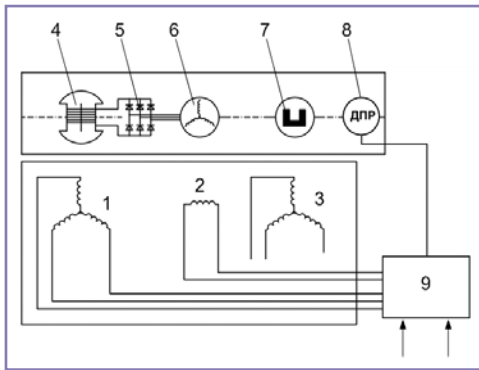


Рис. 2. Схема соединений обмоток генератора в двигательном режиме:

1, 4 – обмотка якоря, обмотка возбуждения основного генератора;
2, 6 – обмотка возбуждения, обмотка якоря возбудителя;
3, 7 – обмотка якоря, магнитная система подвозбудителя;
5 – вращающиеся выпрямители;
8 – датчик положения ротора;
9 – блок управления.

ния результатов экспериментальными исследованиями. Одно из решений найдено ОАО «Электропривод» [6].

Для использования бесконтактного поля основного генератора и вращающегося выпрямителя в двигательном режиме его конструкция дополняется датчиком обратной связи по положению (8) и блоком управления (9) (рис. 2). Также для получения информации о положении ротора можно использовать один из алгоритмов бездатчикового управления.

Блок управления состоит из силовой и управляющей частей. Силовая часть блока управления представляет собой классический трехфазный инвертор, который коммутирует фазы якорной обмотки синхронного генератора. Питание силовой части осуществляется либо от источника постоянного тока, либо через выпрямитель от источника переменного тока.

Управляющая часть блока управления построена на основе векторного управления, вариант структурной схемы управляющей части показан на рис. 3.

При работе в двигательном режиме в начальный момент пуска блок управления подключает обмотку якоря (1) основного генератора и обмотку возбуждения возбудителя (2) к источнику питания. Блок управления по сигналам датчика положе-

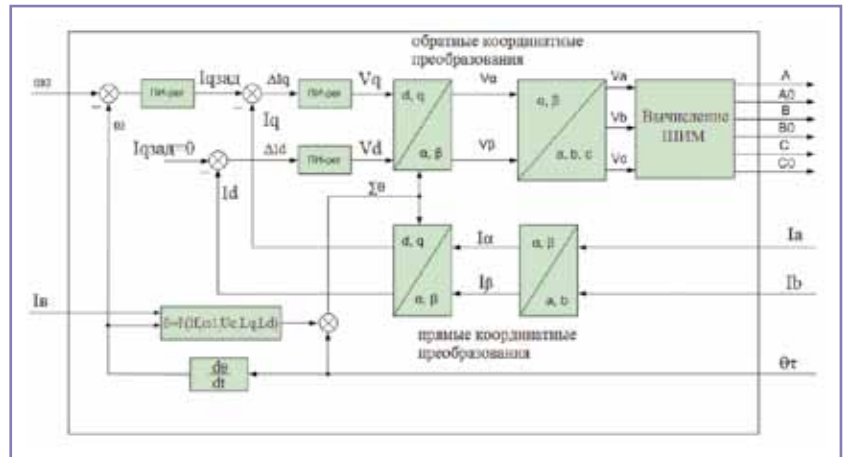


Рис. 3. Структурная схема управляющей части блока управления.

ния ротора формирует вектор тока обмотки якоря основного генератора и, следовательно, вектор магнитного потока основного генератора таким образом, чтобы ось магнитного потока опережала ось полюса ротора на угол θ . При взаимодействии магнитного поля основного генератора и явно выраженных полюсов ротора основного генератора возникает реактивный вращающийся момент [7], под действием которого ротор бесконтактного синхронного генератора с вращающимся выпрямителем приводится во вращение

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\theta) \quad (1)$$

где m_1 – число фаз обмотки якоря основного генератора,

U_1 – фазное напряжение, подведенное к обмотке якоря основного генератора,

ω_1 – угловая синхронная скорость,
 X_d – индуктивное сопротивление обмотки якоря основного генератора по продольной оси,

X_q – индуктивное сопротивление обмотки якоря основного генератора по поперечной оси.

Под действием реактивного момента по мере увеличения частоты вращения в обмотке якоря возбудителя (6) индуцируется электродвижущая сила, которая выпрямляется блоком вращающегося выпрямителя (5) и обеспечивает протекание тока по обмотке возбуждения основного генератора, создавая дополнительный активный вращающийся момент [7]

$$M_{осн} = \frac{m_1 E_0 U_1}{X_d \omega_1} \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

где E_0 – электродвижущая сила обмотки якоря генератора, наведенная током обмотки возбуждения основного генератора.

Под действием суммарного момента ($M_p + M_{осн}$) частота вращения ротора увеличивается.

При достижении частоты вращения роторного модуля, определяемой параметрами газотурбинного двигателя, бесконтактный синхронный генератор с вращающимся выпрямителем переходит в генераторный режим, блок управления отключается от обмотки якоря генератора.

Предлагаемое техническое решение реализует функции двигательного режима в генераторе без изменения конструкции, увеличения массы, при сохранении достоинств бесконтактного синхронного генератора с вращающимся выпрямителем, который в настоящее время является основным типом источника электрической энергии на борту большинства эксплуатируемых самолетов.

ОАО «Электропривод» (г. Киров) провело экспериментальную проверку предложенного решения [8]. Демонстрационный образец (рис. 4) системы запуска маршевого двигателя реализован на основе:

- генератора ГТ40ПЧ8 (далее электрическая машина – ЭМ);
- преобразователя частоты мощностью 100 кВт (ПЧ-100).

Для реализации стартерного режима ЭМ дополнительно содержит



Рис. 4. Демонстрационный образец стартер-генератора.

преобразователь угловых перемещений (энкодер).

Требования к демонстрационному образцу приведены в таблице 2. Основные параметры ЭМ в генераторном режиме приведены в таблице 3.

Испытания демонстрационного образца системы запуска маршевого двигателя

Для испытания системы запуска маршевого двигателя (далее по тексту – СЗМД) был разработан и изгото-

Таблица 2. Требования к демонстрационному образцу.

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная мощность генератора, используемого в качестве стартера, кВА, не менее	40
Максимальная частота вращения ротора генератора в генераторном режиме, об/мин, не менее	8000
Перегрузка стартер-генератора по току в стартерном режиме, не менее	1,5 Iном
Максимальная частота вращения ротора стартер-генератора в стартерном режиме, не менее	60 % от n_{max}

Таблица 3. Основные параметры генератора ГТ40ПЧ8.

Наименование параметра	Значение параметра
Основной генератор	
Число фаз	3
Соединение фаз	«звезда» с выведенной нейтралью
Номинальное линейное напряжение, В	208
Номинальная мощность, кВА	40
Номинальный ток, А	111
Частота вращения, об/мин	7600 – 8400
Частота, Гц	380 – 420
Возбудитель	
Ток возбуждения на холостом ходу при частоте вращения 8400 об/мин, напряжении генератора 208 В, А	0,5 – 0,7
Подвозбудитель	
Число фаз	3
Соединение фаз	«звезда» с выведенной нейтралью
Линейное напряжение холостого хода при частоте вращения 8000 об/мин, В	45,5 – 48,3
Частота, Гц	760 – 840

товлен испытательный стенд (рис. 6), который включает в себя следующие элементы:

- преобразователь частоты мощностью 100 кВт ПЧ-100;
- нагрузочное устройство на основе электродвигателя постоянного тока фирмы SIEMENS мощностью 40 кВт (БМ) для создания момента на валу ЭМ;
- плата сопряжения, предназначенная для коммутации сигналов, анализа работы схемы и согласования уровней входных и выходных сигналов;
- программное обеспечение для управления с компьютера;
- источник питания (ИП) мощностью 50 кВА, напряжением 115/200 В, 400 Гц, предназначенный для питания БУ;
- источник питания импульсный 27 В, 6А, предназначенный для питания плат управления и согласования;
- источники питания импульсные 27 В, 6 А.

Схема испытательного стенда СЗМД показана на рис. 5.

Испытания проводились в нормальных климатических условиях.

Определение момента электрической машины в стартерном режиме

В ходе испытаний исследовалось влияние тока возбуждения возбудителя, угла θ , тока якоря на величину вращающего момента ЭМ и время выхода на заданную частоту вращения. Испытания проводились в диапазоне частоты вращения 800-3000 об/мин. На рис. 7 приведены некоторые результаты испытаний, в частности, зависимости времени выхода на заданную частоту вращения $n = 800$ об/мин от угла θ и тока возбуждения возбудителя $I_{вв}$ в режиме запуска, а также осциллограммы тока на входе преобразователя $I_{вх}$.

Результаты испытаний демонстрационного образца СЗМД показали, что для обеспечения максимальных пусковых характеристик бесконтактного генератора с вращающимся выпрямителем необходима оптимальная ориентация вектора тока якоря относительно ротора (определяется с помощью моделирования ЭМ численными методами).

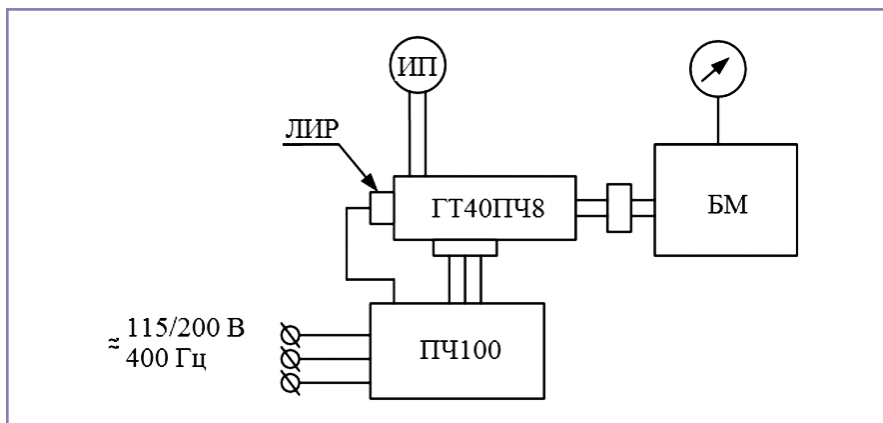


Рис. 5. Схема испытательного стенда СЗМД.



Рис. 6. Нагрузочный стенд SIEMENS с установленным генератором ГТ40ПЧ8.

По материалам испытаний [9] с преобразователем частоты мощностью 100 кВт можно сделать вывод, что трехфазный синхронный генератор с вращающимися выпрямителями способен в стартерном режиме развить вращающий момент, равный электромагнитному моменту в генераторном режиме.

Теоретическая часть разработки демонстрационного образца системы запуска маршевого двигателя

В процессе разработки демонстрационного образца СЗМД был выполнен большой объем аналитических расчетов, а также моделирования стартерного и генераторного режимов

ЭМ. Результаты аналитических расчетов приведены в [8].

Разработана полевая математическая модель генератора ГТ40ПЧ8,

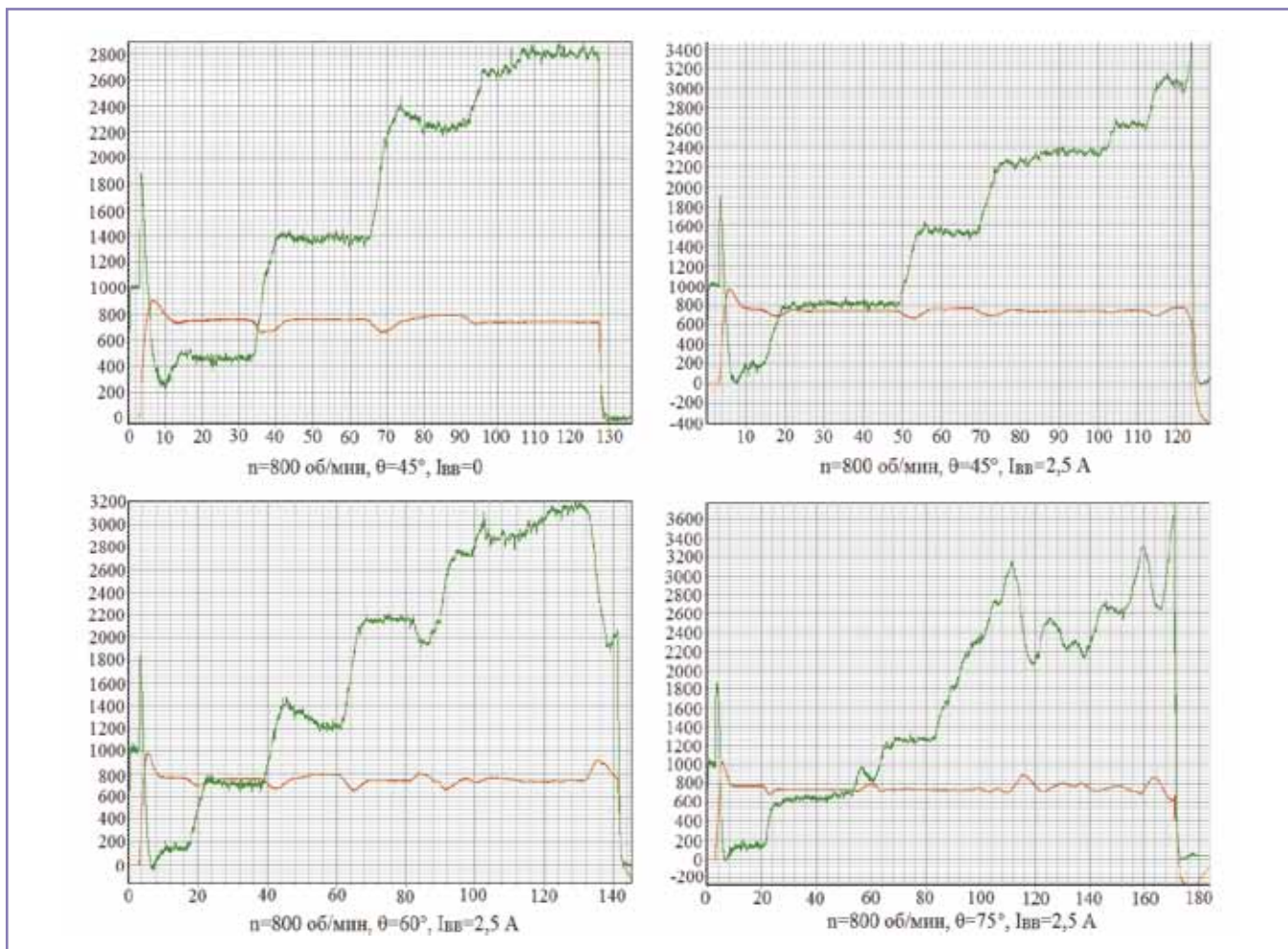


Рис. 7. Осциллограммы $n, I_{вк}$ в стартерном режиме.

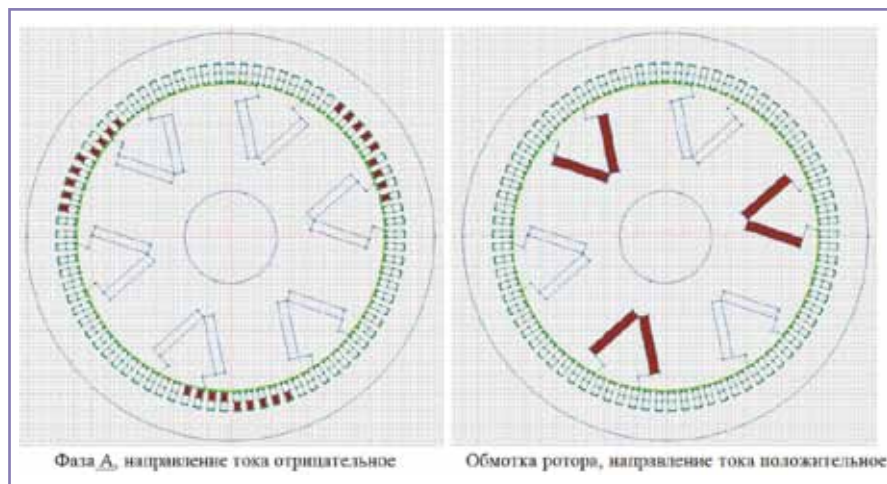
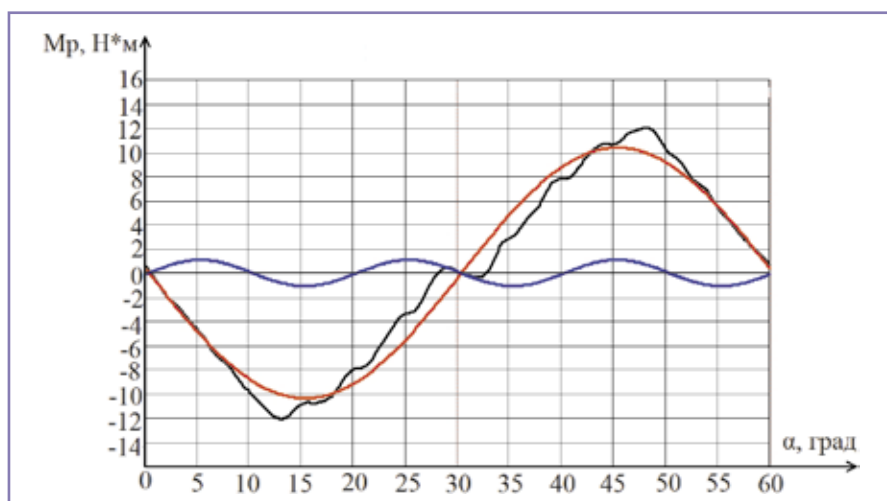


Рис. 8. Фрагмент модели ЭМ.

Рис. 9. Зависимость $M_p=f(\theta)$ при токе якоря $I=78$ А и ее гармонические составляющие ($M_{1m}=10,37$ Н·м).

а также разработаны правила и порядок применения данной математической модели для моделирования генераторного и стартерного режимов работы. Проведено моделирование и сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, которое показало приемлемую сходимость.

Некоторые результаты моделирования в программном продукте ELCUT представлены ниже.

Полевая модель генератора ГТ40ПЧ8 состоит из совокупности:

- геометрических блоков – эскиза поперечного сечения магнитной системы;
- набора физических свойств блоков;
- источников поля.

Источниками электромагнитного поля в модели генератора являются обмотка якоря и ротора. Фрагмент модели ЭМ (генератора ГТ40ПЧ8) показан на рис. 8.

Таблица 4. Результаты моделирования.

Ток якоря, А	Момент, полученный в полевой модели, Н·м	Экспериментальный момент, Н·м	Ошибка расчета, %
78	10,37	9,81	5,4
130	23,307	19,62	15,82
157	29,56	24,525	17

Определение реактивного пускового момента с помощью полевой модели

В результате моделирования были получены зависимости реактивного момента от угла поворота ротора $M_p=f(\theta)$. Зависимость для одной из моделей при отсутствии возбуждения ротора показана на рис. 9.

Результаты моделирования приведены в таблице 4.

На основании данных таблицы 4 следует, что метод расчета пускового реактивного момента с помощью полевой модели показал приемлемую сходимость с экспериментальными данными.

Определение момента с помощью полевой модели

В результате были получены зависимости крутящего момента ЭМ в функции тока якоря I , частоты вращения n и угла θ $M=f(I, n, \theta)$. Ток возбуждения $I_{вв}$ задавался пропорционально частоте вращения генератора n .

На рис. 10 приведены расчетные, полученные с помощью полевой модели при задании θ при различных значениях тока якоря и частоты вращения, а также экспериментальные значения крутящего момента ЭМ.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований демонстрационного образца показали возможность осуществления запуска маршевого двигателя с использованием синхронного генератора с вращающимся выпрямителем и получить характеристики запуска, заданные в таблице 2.

Литература:

1. A.A. AbdElhafez, A.J. Forsyth. A Review of More-Electric Aircraft // Internat. 13th Conf. on Aerospace Sciences & Aviation Technology – ASAT-13 – Cairo, Egypt, 2009.
2. А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок, серия «Газотурбинные двигатели». – М.: Машиностроение, 2008.
3. Авиационное оборудование / под редакцией Ю.П. Доброленского. – М.: Воениздат, 1989. – 248 с.
4. Ian Moir, Allan Seabridge. Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems

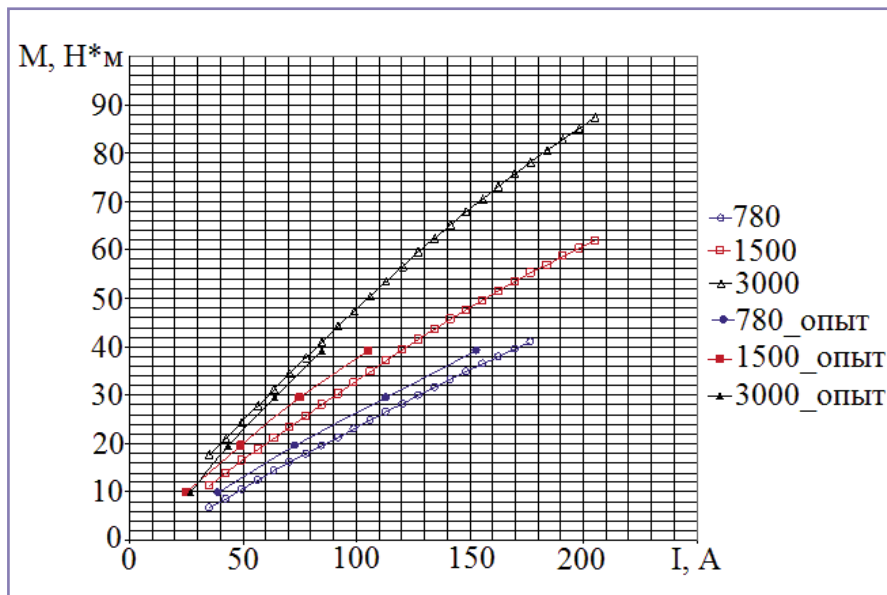


Рис. 10. Расчетные и экспериментальные зависимости крутящего момента ЭМ от тока якоря $M=f(I)$ при различных частотах вращения ротора.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers ». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

integration. Third Edition. – England: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

5. Волокитина Е.В. Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Ч. I // Электроника и электрооборудование транспорта – 2011. – №4. – с. 24–29.

6. Заявка на изобретение №2013113760 от 27.03.2013.

7. Кацман М.М., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических систем: учебник для техникумов / под редакцией Ф.М. Юферова. – 2-е изд.,

перераб. и доп. – М.: Высш. школа; 1979. – 261 с.

8. Исследование стартерного режима в трехфазном бесконтактном генераторе с вращающимися выпрямителями. Отчет о НИР № 03–47/2–2011// ОАО «Электропривод», Киров, 2011. – 79 с.

9. Дополнение к техническому акту № 07541905-98/2-2010 по результатам испытаний демонстрационного образца системы запуска маршевого двигателя, с использованием в качестве стартера трехфазного генератора с вращающимися выпрямителями. // ОАО «Электропривод», Киров, 2010.

Исследование магнитной системы высокоскоростных бесконтактных электродвигателей постоянного тока

// Research of magnetic system of high-speed brushless direct-current motors //

Власов А.И., к.т.н., Волокитина Е.В., к.т.н.,
Малюгин А.А., Опалев Ю.Г., к.т.н.,
ОАО «Электропривод», г. Киров

В статье рассмотрены способы улучшения энергетических и массогабаритных параметров высокоскоростных вентильных электродвигателей путем оптимизации геометрических размеров статора и ротора методом численного моделирования магнитного поля в программе ELCUT. Ключевые слова: бесконтактный электродвигатель постоянного тока, полевая модель, магнитная система, потери в стали

Ways of improvement of power and mass-dimensional parameters of the high-speed BLDC electric motors by optimization of stator and rotor geometrical sizes using magnetic field numerical modeling by ELCUT program are considered in this paper.

Keywords: brushless DC electric motor (BLDC), field model, magnetic system, iron loss.

Одним из признаков эффективно разработанной электрической машины является обеспечение высоких удельных массоэнергетических показателей.

Наиболее жесткие требования по энергетическим и массогабаритным показателям предъявляются к электродвигателям авиационного электропривода. С целью повышения удельной мощности все авиационные электродвигатели выполняются высокоскоростными. Кроме того, в последнее время наметилась тенденция к дальнейшему повышению частоты вращения авиационных электродвигателей, которая достигает десятков тысяч оборотов в минуту, при этом потери в стали преобладают над другими видами потерь [1]. С целью повышения удельных показателей высокоскоростных электродвигателей возникает необходимость снижения потерь в стали путем оптимизации кон-

фигурации магнитной системы статора.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- исследование влияния формы пазов статора на характеристики бесконтактных электродвигателей постоянного тока (БДПТ): величину магнитного потока, электромагнитного момента, потерь в стали;
- оптимизация высоты яра статора при постоянстве электромагнитного момента и допустимых потерях в стали.

Для решения перечисленных задач в программе ELCUT была разработана полевая математическая модель БДПТ на основе метода конечных элементов.

В качестве геометрической модели была выбрана магнитная система БДПТ, конструкция которой показана на рис. 1. В данной магнитной системе применяется сборная конструкция ротора с радиально намагниченными по-

стоянными магнитами, имеющими форму сегментов и размещенными на магнитомягкой втулке, установленной на валу.

При постановке магнитной задачи задавались источники поля (токи в обмотке) и свойства материалов. Данная задача может быть сформулирована как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot } A$, B – вектор магнитной индукции)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega g A = -j_{\text{стоп}} \quad (1)$$

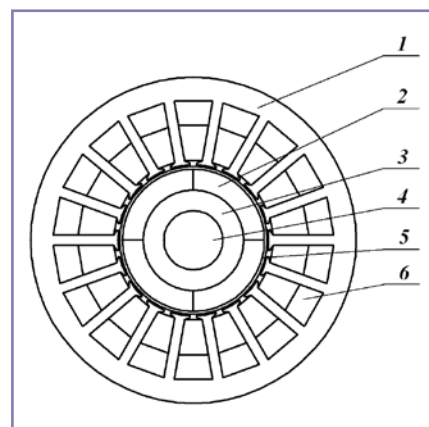


Рис. 1. Конфигурация исследуемой магнитной системы:

1 – область ферромагнитного сердечника статора; 2 – область постоянных магнитов; 3 – область ферромагнитного сердечника ротора; 4 – область немагнитного вала; 5 – область немагнитного зазора; 6 – немагнитная область обмотки статора.

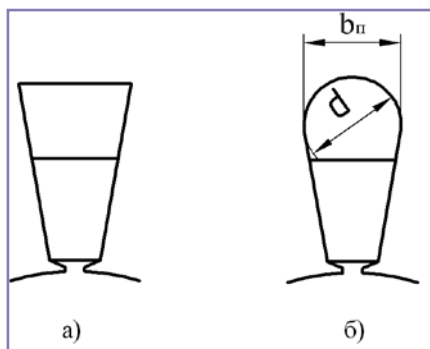


Рис. 2. Форма пазов.

Исследование пазовой зоны статора проведено на магнитной системе электродвигателя ДБ120-22000-12 (базовый вариант), разработанного в ОАО «Электропривод» (г. Киров). Форма паза статора электродвигателя изменялась от трапецеидальной (рис. 2а) до паза с круглым дном (рис. 2б) [2].

Критерием «закругленности» паза принято отношение ширины дна паза b_n к диаметру закругления d , которое удовлетворяет условию

$$0 \leq \frac{b_n}{d} \leq 1 \quad (2)$$

где $\frac{b_n}{d} = 0$ – трапецеидальный паз,

$\frac{b_n}{d} = 1$ – паз с круглым дном.

С целью учета влияния реакции якоря на магнитное состояние БДПТ моделирование магнитного поля проводилось под нагрузкой.

В ходе исследования разработаны серии магнитных систем, в которых изменялись ширина дна паза и диаметр закругления дна при постоянстве площади паза.

Для каждого варианта серии выполнено:

- построение геометрической модели магнитной системы;
- задание параметров областей магнитной системы и граничные условия существования электромагнитного поля;
- расчет электромагнитного поля методом конечных элементов;
- анализ полученных результатов.

Схема распределения обмотки в пазах показана на рис. 3.

При проведении исследований для каждого значения отношения b_n/d измерялись следующие величины:

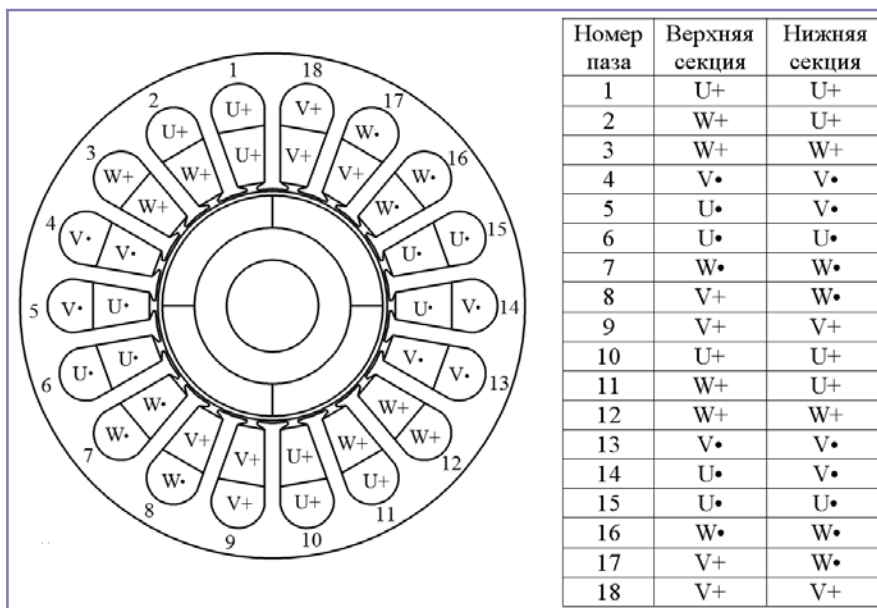


Рис. 3. Схема распределения обмотки в пазах.

- магнитный поток с полюса ротора;
- средняя индукция по объему для ярма;
- средняя индукция по объему для зубца.

Далее рассчитывались потери в стали по формуле

$$P_{cm} = p_0 \cdot \left(\frac{f}{f_n}\right)^\beta \cdot (B_z^2 \cdot m_z \cdot k_{Tz} + B_a^2 \cdot m_a \cdot k_{Ta}) \quad (3)$$

где B_a – индукция в ярме, Тл,
 B_z – индукция в зубцах, Тл,
 m_a – масса ярма статора, кг,
 m_z – масса зубцов статора, кг,
 k_{Ta}, k_{Tz} – технологические коэффициенты,

$\beta = 1,3-1,5$ – коэффициент.

По результатам моделирования построены зависимости магнитного

потока полюса и потерь в стали статора оптимизируемого электродвигателя от отношения b_n/d , показанные на рис. 4.

Из приведенных зависимостей видно, что при переходе от трапецеидального паза к пазу с круглым дном потери в стали снизились на 3,2 % при незначительном снижении магнитного потока (на 0,23 %). Наиболее существенное снижение потерь в стали наблюдается при $0,55 \leq \frac{b_n}{d} \leq 1$.

Причиной снижения потерь в стали является уменьшение площади насыщенных участков магнитопровода статора при увеличении отношения b_n/d , что приводит к снижению среднего значения индукции по всему сечению магнитопровода.

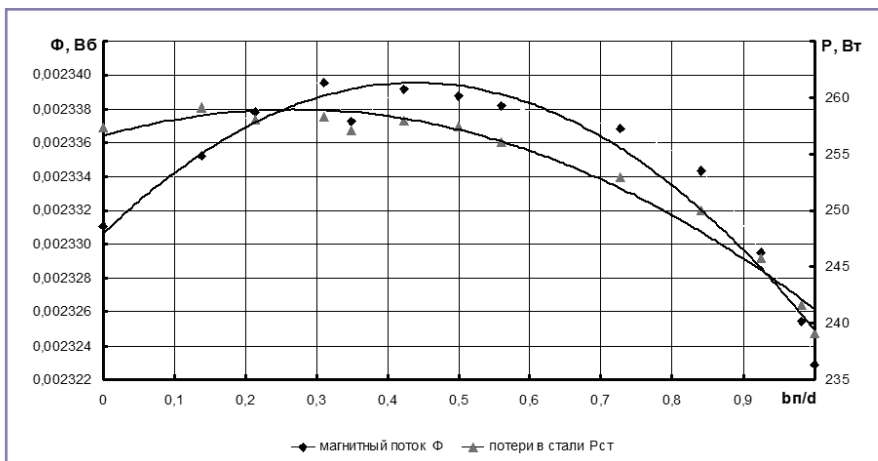


Рис. 4. Зависимости магнитного потока и потерь в стали электродвигателя от отношения b_n/d .

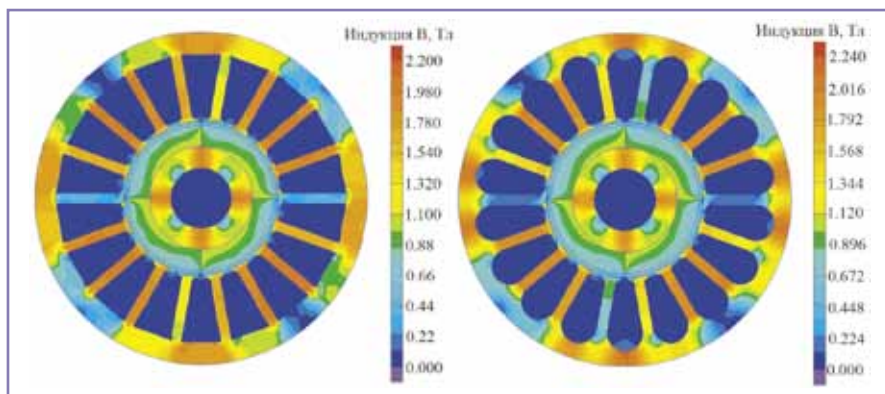


Рис. 5. Картины распределения магнитного поля статора с трапецидальными пазами (ДБ120-22000-12) и статора с пазами с круглым дном.

Картины распределения магнитного поля под нагрузкой для магнитных систем статора с трапецидальными пазами и с пазами с круглым дном показаны на рис. 5.

Таким образом, в БДПТ, работающих при повышенной частоте вращения, для снижения потерь в стали и, следовательно, повышения энергетических характеристик электродвигателя требуется исследование магнитных систем с помощью полевых математических моделей.

Целью оптимизации высоты ярма статора является снижение потерь в стали и улучшение массогабаритных показателей. В ходе исследования проводилось моделирование магнитного поля электродвигателя под нагрузкой при уменьшении наружного диаметра статора (ярма статора) с пазами с круглым дном и постоянстве

геометрии пазовой зоны. Ограничением служило допустимое насыщение магнитной системы.

По результатам моделирования построены графики зависимостей магнитного потока полюса Φ и потерь в стали $P_{ст}$ от высоты ярма, показанные на рис. 6.

Проведенная оптимизация магнитной системы статора БДПТ с помощью численного моделирования магнитного поля позволила уменьшить наружный диаметр статора на 2 мм, при этом масса стали статора снизилась на 9,3 %, потери в стали снизились на 4,5 %, а магнитный поток в воздушном зазоре уменьшился на 2 %.

В связи с тем, что магнитный поток полюса Φ уменьшился, то, согласно формуле [3]

$$M = C_m \cdot \Phi \cdot I \quad (4)$$

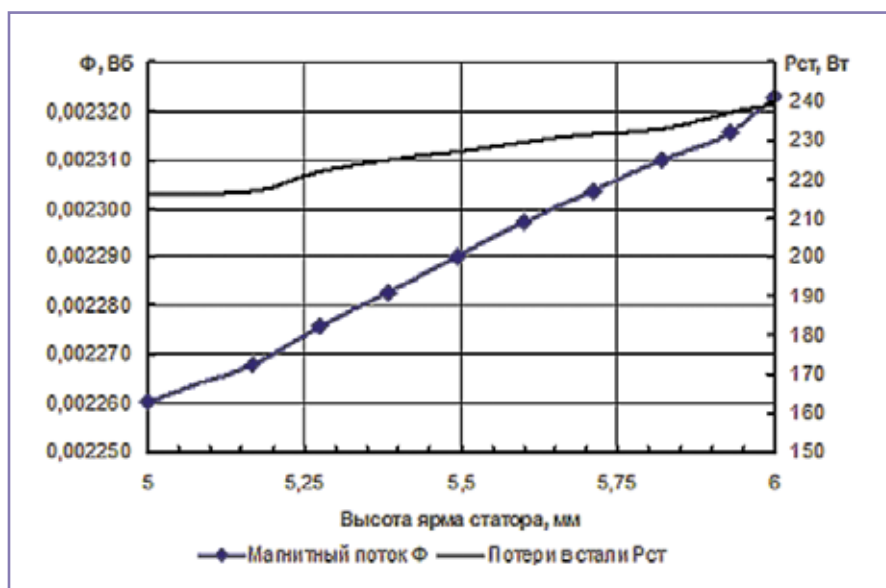


Рис. 6. Зависимости магнитного потока полюса и потерь в стали от высоты ярма статора электродвигателя с пазами с круглым дном.

происходит уменьшение электромагнитного момента при постоянстве потребляемого тока I .

Так, по результатам моделирования, при $I = const$ среднее значение электромагнитного момента составило 16,3 Н·м, что на 4,3 % меньше базового варианта, среднее значение момента которого равно 17 Н·м.

Уменьшение электромагнитного момента в авиационных БДПТ весьма критично. Для сохранения значения электромагнитного момента на уровне базового варианта потребуется либо увеличение потребляемого тока, что нежелательно, либо поиск других конструктивных решений. Одним из таких решений является применение в БДПТ сборной мозаичной системы ротора.

В работе [4] было проведено исследование магнитной системы ротора БДПТ, в результате которого получена сборная мозаичная система ротора, обеспечивающая требуемый магнитный поток в воздушном зазоре при уменьшении наружного диаметра ротора.

Применение оптимизированной магнитной системы статора с круглым дном пазы в электродвигателе ДБ120-22000-12 совместно со сборной мозаичной системой ротора, рассмотренной в [4], позволяет снизить массу магнитопровода статора на 8,15 %, потери в стали – на 3,07 % при сохранении значения электромагнитного момента на уровне базового варианта.

В ходе исследований получены следующие результаты:

- исследованы способы улучшения энергетических и массогабаритных параметров БДПТ путем оптимизации геометрических размеров статора и ротора методом численного моделирования магнитного поля;
- получены рекомендации по степени закругления дна пазы статора БДПТ с целью снижения потерь в стали статора электродвигателей и улучшения массогабаритных показателей.

Выводы

На основании полученных рекомендаций проведена оптимизация магнитной системы статора электродвигателя ДБ120-22000-12, что в сочетании с применением сборной мо-

заичной системы ротора позволило уменьшить массу, габариты и потери в стали электродвигателя при неизменном электромагнитном моменте.

Полученные результаты исследования используются при проектировании БДПТ для электроприводов специального назначения производства ОАО «Электропривод» г. Киров.

Литература:

1. Отчет о НИР «Определение возможности создания бесконтактного синхронного электродвигателя мощностью 55 кВт» // ОАО «Электропривод», Киров, 2003.
2. Кобелев А.С., Макаров Л.Н., Рукаковский А.М. Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий. // Электротехника. – 2008. – №11. – С.11-24.
3. Дубенский А.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока. М., издательство «Энергия», 1967.
4. Волокитина Е.В., Власов А.И., Опалев Ю.Г. Исследование и оптимизация динамических и массогабаритных показателей вентильных электродвигателей методами численного моделирования магнитного поля. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №3. – С.22-25.

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». 9 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником конструкторского отдела ОАО «Электропривод». Имеет 20 научных трудов.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Малюгин Антон Александрович – родился в 1985 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 5 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором 3 категории ОАО «Электропривод». Имеет 1 научный труд.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». 9 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником конструкторского бюро ОАО «Электропривод». Имеет 11 научных трудов.

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (Vy-

GU), specialization is «Electromechanics». He is a candidate of Engineering. In 2010 he defended a thesis, the theme is: «Magnetolectric starter-generator in the New generation plain power system». At present he works as a Head of the Design Department in JSC «Electroprivod». He is the author of 20 scientific works.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Malyugin Anton – was born in 1985. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (Vy-atSU) specializing in «Electromechanics». He has 5 years of experience in the area of aircraft electrical machines. Currently he works as a design engineer of the 3 grade in JSC «Electroprivod». He has one scientific work.

Opalev Yuriy – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (Vy-atSU) specializing in «Electromechanics». He is a Candidate of Science. In 2011 he defended a thesis about «AC electronic motors for precise fast-acting drives of mechatronic process models». He has been working in the area of aircraft electrical machines for nine years. At present he is a head of the design center JSC «Electroprivod». He has 11 scientific works.

Электропривод в системах уборки-выпуска и управления взлетно-посадочных устройств

// Electric drive in systems of retraction and extension
of takeoff and landing devices //

Ерохин Д.В., Волокитина Е.В. к.т.н., Рубцова Л.А.,
ОАО «Электропривод», г. Киров

В статье приведены материалы по разработке электропривода для систем уборки-выпуска и управления взлетно-посадочного устройства.

Ключевые слова: система уборки-выпуска, взлетно-посадочное устройство, электропривод поступательного движения, блок управления и контроля, электромеханизм, роликовая передача, вентильный электродвигатель.

This paper presents information about development of the electric drive for systems of retraction and extension and control of takeoff and landing devices.

Keywords: systems of retraction and extension, takeoff and landing device, linear actuator, control and monitoring unit, electric actuator, roller screw drive, brushless DC electric motor.

В российском авиапромышленном комплексе ведутся работы по расширению области применения автоматизированных электроприводов и созданию полностью электрифицированного самолета (ПЭС).

Бортовое электрооборудование, разработанное ОАО «Электропривод», используется в системах запуска и контроля авиадвигателей, управления аэродинамическими поверхностями, бортовых системах электроснабжения, кондиционирования воздуха, в топливной аппаратуре, а также для регулирования по высоте сидения кресла летчика, вращения антенн, перемещения контейнеров, в стеклоочистителях и др. системах летательных аппаратов. В рамках концепции ПЭС одним из перспективных направлений является замена гидро-пневмоприводов на электроприводы.

ОАО «Электропривод», являющееся одним из ведущих разработчиков авиационного электротехнического оборудования в России, имеющее

многолетний опыт, принимает участие в создании электроприводов для взлетно-посадочных устройств (ВПУ). Замена гидро-пневмоприводов для ВПУ, выпускающихся не одно десятилетие, на электроприводы является относительно новой идеей, поэтому особое внимание в создании конкурентоспособной продукции уделяется массогабаритным показателям и надежности систем.

В 2012 году ОАО «Электропривод» по техническому заданию ОАО «Авиаагрегат» выполнило эскизно-технический проект по разработке электроприводов для систем уборки-выпуска и управления ВПУ, в 2013 году завершило этап разработки рабочей конструкторской документации. В настоящее время идет изготовление и испытание опытных образцов. По внешним воздействующим факторам электроприводы системы уборки-выпуска ВПУ соответствуют требованиям КТ-160D.

Целью выполнения ОКР является создание автоматизированных следящих электроприводов системы уборки-выпуска для ВПУ, работающих в соответствии с требуемым алгоритмом.

По своей структуре электроприводы ВПУ представляют собой одноканальную электромеханическую систему, состоящую из управляющего, электродвигательного и механического устройств, обеспечивающих поступательное движение исполнительного звена.

В состав системы уборки-выпуска ВПУ входят следующие электроприводы:

- уборки-выпуска передней опоры (рис. 1);
 - резервного и аварийного выпусков передней опоры;
 - подлома распора передней опоры (рис. 2);
 - уборки-выпуска основной опоры;
 - резервного выпуска основной опоры;
 - подлома подкоса основной опоры.
- Электропривод передней опоры показан на рис. 1.

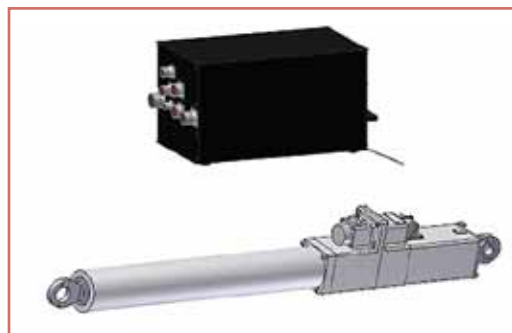


Рис. 1. Электропривод уборки-выпуска передней опоры.

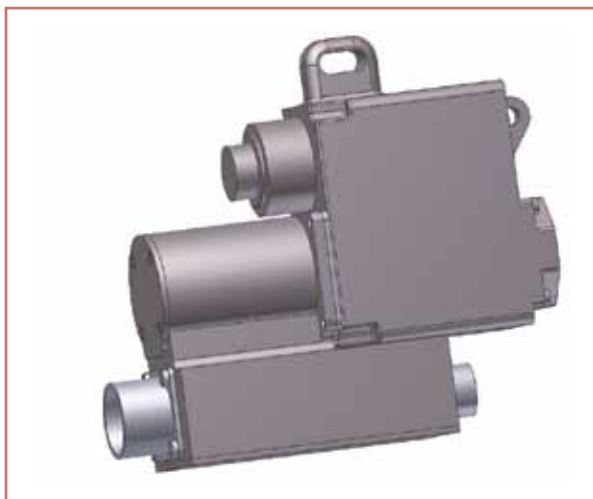


Рис. 2. Электропривод подлома распора передней опоры.

Электропривод подлома распора передней опоры показан на рис. 2.

Краткие характеристики электроприводов приведены в таблице 1.

Электроприводы ВПУ обеспечивают выполнение следующих функций:

- реверсивное перемещение штока электромеханизма, кинематически связанного с исполнительным органом по управляющим сигналам САУ;
- аварийное прекращение перемещения штока по сигналам концевых выключателей;
- стабилизацию скорости перемещения штока во всем диапазоне изме-

нений противодействующей или помогающей нагрузок на штоке электромеханизма;

- снижение скорости перемещения штока при подходе к заданному положению для обеспечения плавности постановки опоры шасси на замок;
- ограничение ускорения перемещения штока электромеханизма при разгоне и торможении;
- затормаживание штока электромеханизма в обесточенном состоянии;

прием сигналов от взаимодействующих устройств и систем, формирование и передачу сигналов во взаимодействующие устройства и системы;

встроенный автоматизированный контроль состояния с выдачей кода отклика во взаимодействующие системы.

В состав электропривода ВПУ входят:

- блок управления;
- электромеханизм.

Блоки управления (БУ) предназначены для реализации всех алгоритмов управления и контроля электропри-

водов, входящих в систему уборки-выпуска ВПУ. Для взаимодействия с внешними системами в составе каждого БУ предусмотрены интерфейсы связи: дискретный – уровнем 27 В и цифровой – ARINC-429.

Для обеспечения высоких энергетических и эксплуатационных показателей в качестве базового способа управления электродвигателем выбрано векторное управление, что позволило получить следующие преимущества: высокий КПД, высокую точность поддержания частоты вращения вала электродвигателя, высокую точность позиционирования, отсутствие скачкообразных колебаний момента и тока в процессах разгона и торможения.

Управляющая часть БУ построена на базе двух высокопроизводительных 32-х разрядных микроконтроллеров серии I986BE91, позволяющих выполнить все поставленные задачи:

- реализацию алгоритмов векторного управления электродвигателями;
- создание контуров регулирования тока, скорости и положения с высокой точностью;
- обеспечение контрольных, коммуникативных и регистрирующих функций.

Структура построения управляющей платформы позволяет вносить,

Таблица 1. Краткие характеристики электроприводов.

Наименование параметра	Электроприводы ВПУ					
	Уборки-выпуска передней опоры	Резервного и аварийного выпусков передней опоры	Подлома распора передней опоры	Уборки-выпуска основной опоры	Резервного выпуска основной опоры	Подлома подкоса основной опоры
Номинальное напряжение питания переменного трехфазного тока частотой 400 Гц, В	115/200		-	115/200		
Номинальное напряжение питания постоянного тока, В	27					-
Максимальная потребляемая мощность, ВА, не более	15	15	1,1	40	15	4
Конструктивный ход выходного штока, мм	546	210	20	419	362	43
Противодействующее усилие при выпуске штока, Н (кгс)	6692 (682)	40415,2 (4124)	6468 (660)	23338 (2379)	50685,6 (5172)	25852,4 (2638)
Номинальная скорость перемещения штока V, мм/с	69	-	10 – 20	53	-	10 – 20
Масса, кг, не более						
- электропривода	50	38	2,6	169,6	49	7,3
- электромеханизма	36	24	-	149,6	35	-
- блока управления	14	14	-	20	14	-
Габаритный размер при убранном положении штока, мм	1300	435	121,5	1062	654	350
Режим работы	кратковременный					

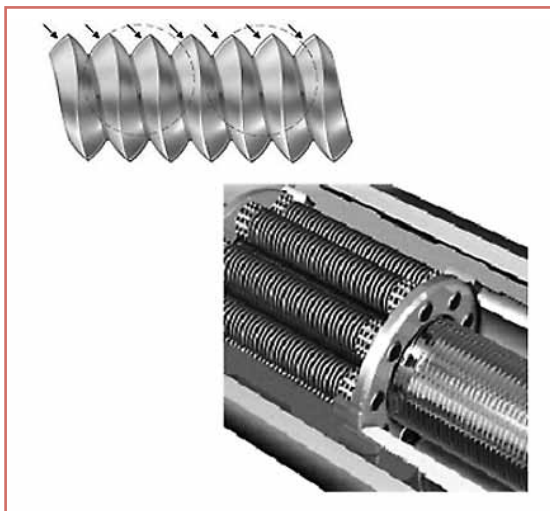


Рис. 3. Роликовинтовая передача.

при необходимости, изменения в алгоритмы корректировкой только программного обеспечения БУ без изменения аппаратной части.

БУ можно разделить на следующие функциональные устройства:

- устройство управления электродвигателем – осуществляет выполнение алгоритмов управления электродвигателем, контроль силовой части. В состав устройства управления электродвигателем входят: трехфазный инвертор, драйвер управления силовыми ключами, микроконтроллер с соответствующими вспомогательными компонентами;

- устройство управления электроприводом – обеспечивает взаимодействие с внешними системами и персональным компьютером, содержит энергонезависимую память для регистрации режимов работы электропривода;

- выпрямитель трехфазный – преобразует напряжение переменного трехфазного тока 115/200 В, 400 Гц в напряжение в 270 В постоянного тока, выполняет функции контроля значений входных напряжений.

При проектировании отдавалось предпочтение отечественной элементной базе. Примененные иностранные комплектующие элементы имеют функциональные аналоги и могут быть заменены на отечественные, как серийно изготавливаемые, так и разрабатываемые по программам замещения импорта.

Электроприводы подлома подкоса и подлома распора имеют встроен-

ные модульные устройства управления, реализующие скалярное управление электродвигателем, без контроля положения штока.

В состав электромеханизма входит:

- бесконтактный электродвигатель со встроенным датчиком положения ротора и электромагнитным тормозом;

- понижающий редуктор;
- преобразователь вида движения и датчик положения штока.

В конструкциях электромеханизмов применяются роликовинтовые передачи (РВП), предназначенные для преобразования вращательного движения винта в поступательное движение выходного штока (рис. 3).

РВП является разновидностью винтовой передачи винт-гайка качества, особенностью которой является установка резьбовых роликов между винтом и гайкой, совершающих планетарное движение относительно оси ходового винта.

Разработка электроприводов для систем уборки-выпуска и управления взлетно-посадочных устройств является шагом к созданию научно-технического задела в разработке нового поколения отечественных самолетов с повышенным уровнем электрификации, что будет способствовать также обеспечению конкурентоспособности отечественного самолетостроения на международном рынке авиационной техники.

Ерохин Денис Викторович – родился в 1973 году. В 1995 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 17-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта ОАО «Электропривод». Награжден нагрудным знаком «Отличник качества авиационной промышленности».

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссер-

тацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов.

Рубцова Людмила Александровна – родилась в 1952 году. В 1975 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». Имеет 38-летний опыт работы в области разработки систем и блоков управления запуском авиадвигателей. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта ОАО «Электропривод». Имеет 4 печатных труда. Награждена Почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации.

Yerokhin Denis – was born in 1973. In 1995 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He has 17 years of work experience in the field of aircraft electro-mechanical machines. At present he is a design project engineer of JSC «Electroprivod». He was awarded the award pin «Quality exemplary of aircraft industry».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works.

Rubtsova Lyudmila – was born in 1952. In 1975 he graduated from the Kirov Polytechnic Institute, specializing in «Automation and Remote Control». 38 years working in the field of systems development and launching of aircraft control unit. At the present time – she is a leading designer, project manager of JSC «Electroprivod». She has 4 hard labor. Awarded Diploma of Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation.

Электропривод реверсивного устройства для перспективных двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей

// Thrust reverser electric drive for perspective double-circuit turbo-jet aircraft engine //

Волокитина Е.В., к.т.н., Тебеньков Ф.Г.,
ОАО «Электропривод», г. Киров

*В статье дан краткий обзор применяемых реверсивных устройств авиадвигателей. Приведены результаты разработки электропривода реверсивного устройства самолета. **Ключевые слова:** реверсивное устройство, авиадвигатель, полностью электрифицированный самолет, электропривод, векторное управление.*

This provides a brief overview of the used thrust reversers of aircraft engines. Results of development of the reverse thrust electric drive are provided.

Keywords: thrust reverser, aircraft engine, all-electric aircraft, electric drive, vector control.

Современные самолеты, имеющие большие посадочные массы и высокие посадочные скорости, оборудуются различными устройствами для торможения: тормозная система колес шасси, аэродинамическая система торможения (интерцепторы, аэродинамические тормоза), парашютно-тормозная система, реверс тяги.

Для выполнения эффективного торможения самолета тормозные системы должны работать в комплексе. Каждой из них предназна-

ется выполнение функции снижения скорости самолета на требуемом участке взлетно-посадочной полосы (ВПП).

Наиболее эффективным устройством для торможения является реверсивное устройство (РУ) реактивно-го сопла двигателя.

Реверсивные устройства – это выходные устройства, изменяющие направление вектора тяги с прямого на обратное («по полету») и служащие, в основном, «аэродинамическими тормозами».

В первую очередь реверсоры тяги используются для повышения тормозной способности самолета и способствуют:

- снижению длины пробега при нормальной посадке, при посадке в аварийных условиях, в условиях прерванного взлета;
- уменьшению износа колесных тормозов;
- обеспечению посадки на мокрую или обледеневшую ВПП;
- быстрому снижению в случае разгерметизации кабины;
- повышению маневренности военных самолетов [1].

РУ являются средством повышения безопасности полетов, а их конструкция влияет на техническое качество двигателя. Существует большое количество конструкций РУ, которые определяет разработчик двигателя, учитывая предъявляемые к нему аэродинамические и конструктивные требования. Чаще всего используют две обобщенные категории РУ: створчатые реверсоры тяги (рис. 1), реверсоры тяги решетчатого типа (рис. 2).

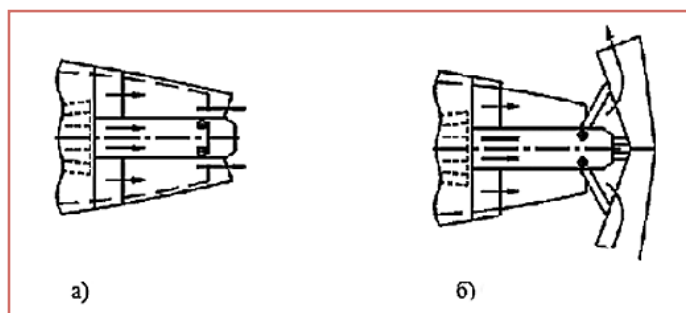


Рис. 1. Схема РУ створчатого типа:
а) прямого тяга; б) обратная тяга.

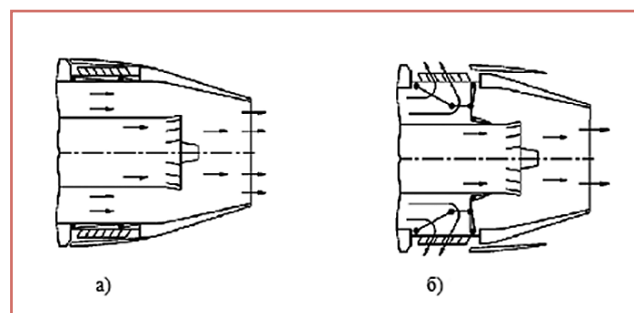


Рис. 2. Схема РУ решетчатого типа:
а) прямого тяга; б) обратная тяга.



Рис. 3. РУ створчатого типа:
1 – створка; 2 – гидроцилиндр;
3 – уплотнение створки; 4 – силовое
кольцо; 5 – стойки; 6 – лючки.

Пример РУ створчатого типа в наружном контуре в положении обратной тяги показан на рис. 3.

Створки (1) одновременно выполняют роль элементов, перекрывающих канал наружного контура и отклоняющих струю воздуха в нужном направлении, и выполнены в виде жесткой коробчатой конструкции. Верхняя поверхность створок в закрытом положении образует обтекаемую

поверхность мотогондолы, а внутренняя поверхность образует стенку канала наружного контура. Каждая из четырех створок приводится в действие с помощью гидроцилиндров (2) [1].

Примером самолетов с таким типом РУ являются самолеты Airbus семейства A320, также A340-200/300 (рис. 4) [2].

РУ решетчатого типа служит для создания обратной тяги направлением воздуха наружного контура вперед (рис. 5). Конструктивно оно выполнено из подвижной и неподвижной частей, замка гидросистемы управления и системы сигнализации положения элементов.



Рис. 4. Включенный реверс самолета А340-313
(двигатель CFM56-5С4/Р).

ки. Здесь поток дополнительно разворачивается и формируется для выхода



Рис. 6. Самолет ТУ-204 (двигатель ПС-90А с РУ решетчатого типа).
Пробег, реверс тяги включен [2].

Привод РУ обеспечивает перевод РУ из положения «Прямая тяга» в положение «Обратная тяга» и наоборот. Гидравлический привод состоит из силовых гидроцилиндров, штоки которых, соединенные с подвижными элементами РУ, при перемещении обеспечивают перевод подвижной части РУ из одного положения в другое. Количество силовых гидроцилиндров определяется усилием, необходимым для перевода РУ из положения «Прямая тяга» в положение «Обратная тяга». На двигателе ПС-90А количество силовых гидроцилиндров равно 3 [1].

Штоки, выдвигаясь, перемещают по направляющим подвижный корпус и связанный с ним наружный подвижный обтекатель. При этом открываются решетки, а створки, поворачиваясь с помощью тяг и качалок, перекрывают канал наружного контура двигателя и направляют поток воздуха из наружного контура в отклоняющие решетки

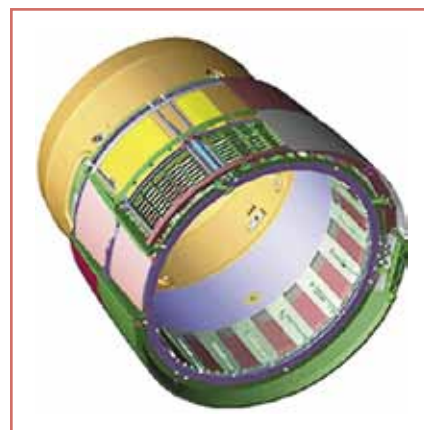


Рис. 5. Модель РУ решетчатого типа
двигателя ПС-90А.

его в направлении, обеспечивающем необходимую обратную тягу (рис. 6).

Гидравлический привод РУ содержит в себе ряд недостатков, присущих всем приводам, функционирующим под управлением гидравлической системы.

Для реверсоров тяги, использующих технологию гидравлического управления, характерны неудобства, которые связаны со сложностью и громоздкостью выполнения различных гидравлических систем. Прокладка гидравлических связей системы является сложной и тонкой операцией в условиях ограниченного пространства, имеющегося на передней раме реверсора тяги.

Другие недостатки этой технологии состоят в использовании гидравлической жидкости, опасной в отношении коррозионных свойств и воспламенения, а также в сложности технического обслуживания.

В нашей стране и, в особенности, за рубежом ведется интенсивная работа по созданию «полностью электрифицированного самолета»



Рис. 7. Посадка А380 с включенным реверсом. Реверсивные устройства устанавливаются только на двух двигателях.

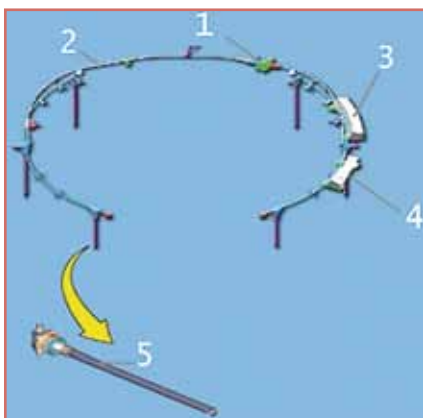


Рис. 8. Основные сборочные единицы РУ с электромеханическим управлением, установленные на самолете А380 [4]: 1 – электродвигатель; 2 – гибкий вал; 3 – блок управления электроприводом; 4 – блок питания; 5 – шариковинтовые механизмы.

(ПЭС) [3], одним из важных положений которой является замена гидравлических приводов на электрические.

В настоящее время полностью электрифицированная система реверсирования тяги разработана в партнерстве компаниями Hispano-Suiza и Honeywell. Система была разработана для двух двигателей, предложенных для А380, Trent 902 компании «Rolls-Royce» и GP7200 компании «Engine Alliance».

Компании «Hispano-Suiza» удалось успешно интегрировать компоненты силовой электроники в среду, которая характеризуется сильными тепловыми и вибрационными нагрузками, например, ускорение до 40 g, на

частотах от 0 до 3000 Гц и диапазон температуры от минус 63°С до плюс 110°С.

Первая и единственная полностью укомплектованная система электромеханического управления реверсом тяги установлена на самолете А380 (рис. 7).

Большой интерес к электромеханическим системам реверсивных устройств обусловлен их достоинствами: надёжность в эксплуатации, отсутствие гидрожидкости, отсутствие трубопроводных коммуникаций, простота обслуживания, меньшая масса (за счет отказа от трубопроводов, гидроцилиндров и гидрожидкости).

Основные сборочные единицы РУ с электромеханическим управлением, установленные на самолете А380, показаны на рис. 8.

Электроприводная система управления РУ самолета А380 обеспечивает управление решетчатым реверсором

тяги, состоящим из двух механически сопряженных подвижных обтекателей, которые перемещаются по верхней и нижней направляющим. Электромеханическая система РУ, установленная на шпангоуте А380, показана на рис. 9 [5]. Устройство представляет собой систему с цифровым управлением мощностью 30 кВт, которая управляет шестью винтовыми механизмами через трансмиссию гибкого вала от силового привода посредством замкнутого контура скорости, мощности, момента и положения.

В настоящее время ОАО «Электропривод» выполняет опытно-конструкторскую работу по созданию электропривода реверсивного устройства (ЭРУ) для перспективных двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей, разрабатываемых ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь.

ЭРУ обеспечивает выполнение следующих функций:

- перемещения подвижного обтекателя РУ и элементов подвижной части реверсивного устройства из положения «Прямая тяга» двигателя в положение «Обратная тяга» и обратно во время пробежки самолета по взлетно-посадочной полосе после посадки по команде летчика;
- удержания подвижного обтекателя РУ и элементов подвижной части РУ в положении «Прямая тяга» во время работы двигателя;
- передачи сигналов в систему автоматического регулирования (САУ) двигателя о состоянии и работе РУ;
- предотвращения несанкционированного включения РУ во время полета.



Рис. 9. Электромеханическая система РУ, установленная на шпангоуте А380.

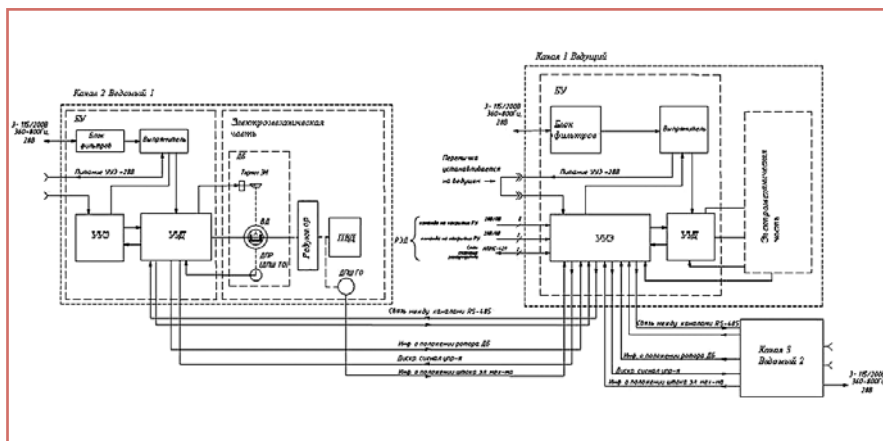


Рис. 10. Один из вариантов структурной схемы ЭРУ.

ЭРУ является многодвигательным, с тремя электродвигателями, обеспечивающими синхронное движение трех исполнительных органов – штоков электромеханизмов. На этапе технического проекта было проработано четыре варианта структуры ЭРУ. Один из вариантов структурной схемы электропривода показан на рис. 10.

ЭРУ состоит из трех одинаковых электромеханических каналов (рис. 11), в состав ЭРУ входят:

- три блока управления,
- три электромеханизма, обеспечивающие поступательное движение выходных штоков.

Электромеханизм включает в себя бесконтактный электродвигатель (ДБ), редуктор, преобразователь вида движения, датчики обратной связи по положению (рис. 12).

Блок управления реализует трехконтурную систему подчиненного регулирования и содержит контур регулирования положения, контуры скорости и тока. Система регулирования построена по принципу векторного управления с раздельным управлением частотой вращения и моментом электродвигателя.

Алгоритм управления ЭРУ обеспечивает синхронизированное пе-

ремещение штоков электромеханизмов и заданную точность текущего положения ходовых винтов, а также позиционирование в крайних положениях.

В настоящее время ОАО «Электропривод» выбран оптимальный вариант реализации ЭРУ, завершается разработка конструкторской и технологической документации, на основе которой изготавливаются опытные образцы.

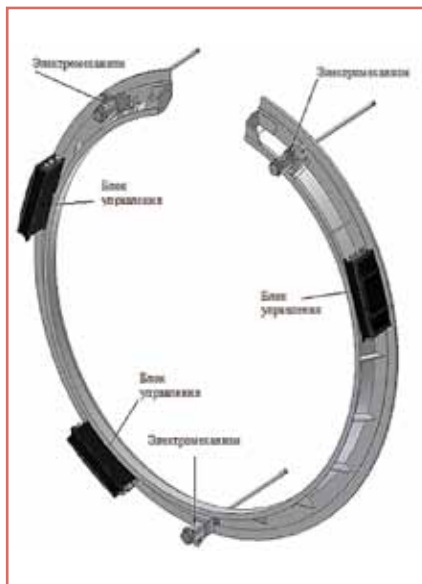


Рис. 11. Расположение элементов ЭРУ на штокоуготе.



Рис. 12. Трехмерная модель электромеханизма ЭРУ.

Литература:

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок, серия «Газотурбинные двигатели». – М.: Машиностроение, 2008.
2. <http://avia-simply.ru/esche-raz-o-reverse-tjagi>
3. Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет. Современное состояние и перспективы развития//Авианормам. – 2009. – Март-Апрель. – С. 14-17.
4. <http://www.slideshare.net/uspaul/new-technologies-of-airbus-380>.
5. http://www.cleansky.eu/sites/default/files/documents/events/20120119/sgo-02-041_identification_of_a_fluid_for_two_phase_capillary_pumped_cooling_systems.pdf.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов.

Тебеньков Фёдор Геннадьевич – родился в 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 5-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2 категории ОАО «Электропривод».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatkiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers – 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works.

Tebenkov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatkiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 5 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod».

Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета

// Development of high-speed electric drive compressor of aircraft air-conditioning system //

**Волокитина Е.В., к.т.н., Власов А.И., к.т.н.,
Копчак А.Л., Москвин Е.В., Тебеньков Ф.Г.,
ОАО «Электропривод», г. Киров**

В статье представлены результаты разработки электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета. Рассмотрены основные проблемы проектирования высокоскоростных электроприводов на основе вентильного электродвигателя. Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, компрессор, бездатчиковый электропривод, вентильный электродвигатель, высокоскоростная электрическая машина, постоянный магнит, векторное управление

Results of development of electric drive compressor for aircraft air-conditioning system are presented. Key problems of designing of high-speed electric drives based on the brushless DC electric motor are considered.

Keywords: air-conditioning system, compressor, sensorless electric drive, brushless DC electric motor, high speed electric motor, permanent magnet, vector control.

В 2012 году ОАО «Электропривод» выполнило составную часть ОКР «Разработка электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха пассажирских и транспортных летательных аппаратов в обеспечение их конкурентоспособности и импортозамещения в перспективных проектах» по шифру «Конкурентоспособность» в соответствии с Федеральной целевой программой «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 – 2010 годы и на период до 2015 года».

Перспективным направлением развития авиастроения является разработка так называемого «полностью электрифицированного самолёта» (ПЭС). Одним из положений концепции ПЭС является переход на электрифицированную систему кондиционирования воздуха (СКВ).

СКВ осуществляет обогрев или охлаждение кабины экипажа и пассажирского салона; вентиляцию кабины экипажа и пассажирского салона; обогрев подпольного пространства; наддув гермокабины и автоматическое поддержание в ней заданного давления; обдув изнутри стекол кабины экипажа.

В традиционной СКВ самолета для нагнетания воздуха используется непосредственный отбор сжатого воздуха от компрессора двигателя, т.е. пневматический вид энергопередачи, который приводит к существенному отбору мощности от двигателя, что, в свою очередь, вызывает увеличение удельного расхода топлива. При этом отбираемый воздух имеет очень высокую температуру (порядка 175-190°C) и давление, что вызывает необходимость его охлаждения в специальных

теплообменниках. КПД такой системы составляет 50–60 %. Кроме того, на режиме снижения самолета потребность СКВ в сжатом воздухе от двигателя вызывает необходимость неоправданного увеличения оборотов двигателя и дополнительный расход топлива. [1].

Устранение отбора воздуха является основным фактором в повышении топливной эффективности авиадвигателя.

Альтернативным способом кондиционирования и наддува кабины самолета может являться использование специального компрессора, подающего в кабину забортный воздух и приводимого электрическим двигателем с возможностью регулирования. Потенциальными преимуществами данного способа являются:

- уменьшение отбора мощности от двигателя, вследствие потенциально более высокого КПД электрического способа отбора мощности по сравнению с пневматическим. По некоторым зарубежным оценкам, это может дать снижение удельного расхода топлива до 3% за типовой полет (B-787);

- упрощение конструкции СКВ и ее монтажа за счет исключения высокотемпературных пневмотрубопроводов от двигателя к фюзеляжу;

- упрощение конструкции двигателя и снижение стоимости его обслуживания;

- улучшение качества воздуха в кабине, так как воздух берется из набегающего потока, обеспечивается 100-процентный коэффициент свежести.

Таблица 1. Сравнение систем СКВ.

Параметр	Пневматическая	Электрическая
КПД	Низкий КПД – большие потери энергии	Более высокий КПД
Удельное потребление топлива	Повышенное потребление топлива из-за отбора воздуха	Улучшенный показатель потребления топлива
Масса	–	Упрощение конструкции СКВ, монтажа, снижение массы
Техническое обслуживание	Высокая степень трудоемкости и стоимости технического обслуживания	Снижение стоимости и трудоемкости обслуживания двигателя
Сложность реализации	Отработанная технология	Новая электрическая технология
Расходы внедрения	Более низкие	Более высокие, так как это новая технология
Другие характеристики	–	100-процентный свежий воздух

Таблица 2. Технические характеристики ЭП СКВ.

Наименование параметра	Значение параметра
Мощность на валу электропривода, кВт	20-30
Диапазон регулирования частоты вращения электропривода, об/мин	35000-55000
Номинальный противодействующий момент на валу электропривода во всем диапазоне частот вращения, Н·м	5
Напряжение питания	115/200 В нестабилизированной частоты 360...800 Гц
Режим работы	продолжительный
Масса электродвигателя, кг	19,5
Габариты электродвигателя, мм	□161×290
Масса блока управления, кг	35
Габариты блока управления, мм	400×500×224

При весовом сравнении традиционной и «электрифицированной» СКВ следует учесть следующие факторы:

- в «электрифицированной» СКВ используются теплообменники значительно (на порядок) меньшего размера и массы, чем в традиционной, так как температура (порядка 90-100 °С) и давление воздуха после электроприводного компрессора существенно ниже, чем в случае отбора воздуха в двигателе;

- при использовании «электрифицированной» СКВ отпадает необходимость иметь в ВСУ специальный компрессор для обеспечения кондиционирования при неработающих двигателях, ВСУ в этом случае необходимо включать только электрогенератор [1].

Сравнение систем СКВ приведено в таблице 1 [2].

Совместными исследованиями NASA и фирмы Lockheed установлено, что летательный аппарат с тремя двигателями, осуществляющими лишь отбор механической мощности с вала, на скорости около 960 км/ч при высоте 11000 м за 5 ч полета потребляет на 900 кг меньше топлива, чем ЛА с традиционной СКВ [3].

В настоящее время одним из самолетов с «электрифицированной» СКВ является Boeing 787. СКВ данного самолета содержит четыре компрессора мощностью 75 кВт, приводимых во вращение вентильными электродвигателями.

Спроектированный электропривод компрессора СКВ (ЭП СКВ) выполнен на основе вентильного электродвигателя постоянного тока (ВДПТ) и конструктивно состоит из бесконтактного синхронного электродвигателя

ДБ160-30000-60-У и блока управления БУ-СКВ.

Основные технические характеристики ЭП СКВ приведены в таблице 2.

ЭП СКВ относится к классу бездатчиковых электроприводов по причине затруднительного использования датчиков положения ротора в высокоскоростных электроприводах. С другой стороны, работа ВДПТ без информации о положении ротора не представляется возможной. Алгоритмы вычисления положения ротора по сигналам встроенных датчиков напряжения и тока, так называемые алгоритмы бездатчикового векторного управления для невысокой частоты вращения не вызывают серьезных проблем для разработки и применения. Однако, в области высокоскоростных электроприводов, где исключается возможность применения каких-либо датчиков механических величин, реально функционирующие изделия и публикации в этой области практически отсутствуют.

Высокие показатели качества в динамических режимах работы обеспечиваются за счет векторного управления, которое в вентильном электроприводе решается путем раздельного управления составляющими тока, пропорциональными моменту i_q и магнитному потоку i_d .

Использование наблюдателей состояния для оценки положения ротора в вентильных электродвигателях

Большинство перспективных методов бездатчикового векторного управления основаны на косвенном определении угла положения ротора электродвигателя, а также частоты вращения с применением наблюдателей, позволяющих вырабатывать оценки неизмеряемых координат и использовать их для построения эффективных систем регулирования.

В системах бездатчикового векторного управления ВДПТ наблюдатель состояния выполняет вычисление всех переменных и параметров электродвигателя, необходимых для реализации алгоритма векторного управления, по информации о двух фазных токах статора и (или) двух заданных

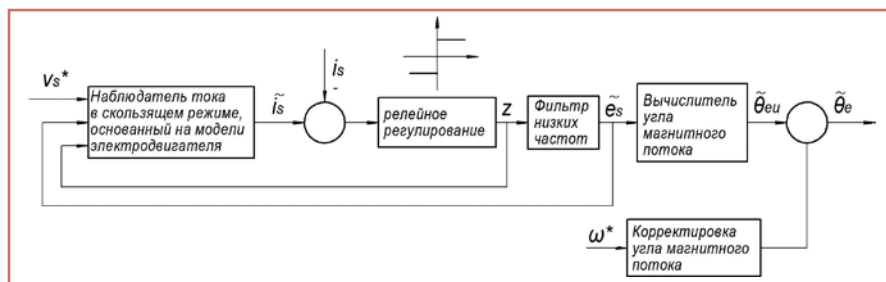


Рис. 1. Структурная схема идентификатора положения ротора, основанная на алгоритме наблюдения тока в скользящем режиме.

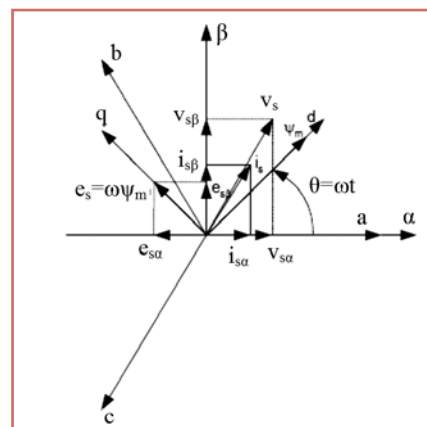


Рис. 2. Координатные преобразования при векторном управлении.

значениях фазных напряжений, а также по параметрам его математической модели с помощью специальных алгоритмов оценки (идентификации).

В общем случае наблюдатель состояния – это математическая модель объекта, на вход которой поступают измеряемые компоненты вектора состояния объекта, а на выходе выдаётся оценка вектора состояния. Эта оценка сходится к истинному вектору состояния. Другими словами, на вход модели объекта подаётся ошибка оценки измеряемых компонент вектора состояния, а наблюдатель стремится свести эти ошибки к нулю и при этом, сводит к нулю ошибки оценки всех компонент вектора состояния. Наблюдатель стремится свести эти ошибки к нулю и при этом, сводит к нулю ошибки оценки всех компонент вектора состояния.

В бездатчиковых системах ВДПТ могут использоваться идентификаторы адаптивных наблюдателей полного порядка, предусматривающих полную математическую модель электромагнитных процессов ВДПТ, содержащую частоту вращения ротора как неопределённый параметр. Посредством адаптивного наблюдателя полного порядка оценивается вектор токов статора. На выходе адаптивного наблюдателя полного порядка получают оценку доступной для прямого измерения переменной и, сводя тем или иным образом её отклонение от непосредственно измеренного значения к нулю, идентифицируют неопределённый параметр.

В практике электропривода распространение также получили алгоритмы наблюдателей, построенные на основе адаптивных систем с задающей (эталонной) моделью. Идентификаторы этого типа содержат в своей структуре две различные модели,

которые вычисляют две оценки одной и той же координаты состояния, например вектора потока ротора. Одна модель, например, модель статора, не содержащая неопределённого параметра, является задающей, и вычисленная с её помощью переменная считается эталоном. Другая модель, например, модель ротора, зависящая от неопределённого параметра, является настраиваемой, причем её адаптация осуществляется путём изменения оценки неопределённой переменной, подлежащей идентификации. Считается, что истинное значение искомой переменной найдено, если выходные координаты задающей и адаптивной модели совпадают [4].

Наблюдатель бездатчикового определения положения ротора в ЭП СКВ выполнен на основе алгоритма наблюдения тока в скользящем режиме.

Суть предлагаемого метода идентификации заключается в том, что ошибка между расчетным и измеренным токами электродвигателя, корректируется релейным звеном, образуя скользящий режим, стремящийся свести ошибку к нулю. Структурная схема наблюдателя приведена на рис. 1.

Наблюдатель выполняет оценку положения потока ротора, основанную на алгоритме наблюдения тока в скользящем режиме. Как показано на рис. 1, входными сигналами идентификатора положения ротора являются фазные токи электродвигателя и напряжения в системе координат α - β .

На рис. 2 показаны системы координат и их преобразования, выполняемые при векторном управлении электродвигателем.

Уравнение (1) является математической моделью синхронной электрической машины с постоянными магнитами в системе координат α - β

$$\frac{d}{dt} i_s = A i_s + B(v_s - e_s) \quad (1)$$

$$A \text{ и } B - \text{ матрицы: } A = -\frac{R}{L} I_2 \text{ и } B = \frac{1}{L} I_2 \text{ в которых } L = \frac{3}{2} L_m, \text{ где } L_m$$

и R индуктивность и активное сопротивление фазы обмотки статора, I_2 – это матрица, состоящая из двух строк и двух столбцов.

Наблюдатель тока в скользящем режиме состоит из моделей наблюдателя тока и релейного регулятора, управляемого величиной ошибки между оцененными и фактическими значениями токов электродвигателя. Математические выражения для наблюдателя тока и релейного регулятора приведены в уравнениях (2) и (3)

$$\frac{d}{dt} \tilde{i}_s = A \tilde{i}_s + B(v_s^* - \tilde{e}_s + z) \quad (2)$$

$$z = k \cdot \text{sign}(\tilde{i}_s - i_s) \quad (3)$$

Цель релейного регулирования z заключается в сведении ошибки оценки тока к 0. Символ \sim показывает, что это оцениваемая переменная. Символ $*$ показывает, что переменная является управляющей.

Оценка противо-ЭДС выполняется путем фильтрации релейного сигнала z , используя фильтр низких частот первого порядка в соответствии с уравнением (4)

$$\frac{d}{dt} \tilde{e}_s = -\omega_0 \tilde{e}_s + \omega_0 z \quad (4)$$

Параметр ω_0 определяется как $\omega_0 = 2\pi f_0$, где f_0 представляет собой частоту среза фильтра.

Вычисленный угол магнитного потока ротора определяется в соответствии с уравнением (5) для противо-ЭДС

$$\tilde{e}_s = \frac{3}{2} k_e \omega \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

Получив оценку противо-ЭДС, может быть рассчитан угол положения ротора в соответствии с уравнением (6)

$$\tilde{\theta} = \arctan(-\tilde{e}_{s\alpha}, \tilde{e}_{s\beta}) \quad (6)$$

Алгоритм наблюдателя ЭП СКВ на основе бездатчикового векторного управления в скользящих режимах позволяет обеспечить качественное регулирование частоты вращения в требуемом диапазоне.

К преимуществам данного способа управления следует отнести:

- высокие энергетические показатели (вполне реально достижение КПД электропривода на уровне 93-95%);
- высокая стабильность поддержания требуемой частоты вращения электродвигателя в заданном диапазоне при различных возмущающих факторах;
- высокая надежности системы в целом за счет отказа от применения механических датчиков положения ротора;
- простота реализации.

Блок управления БУ-СКВ

БУ-СКВ предназначен для реализации алгоритмов работы электропривода во всех режимах эксплуатации. При выборе элементной базы предпочтение отдавалось отечественным ЭРИ, примененные иностранные ЭРИ имеют функциональные аналоги и могут быть легко заменены на отечественные как серийно изготавливаемые, так и разрабатываемые по программам замещения импорта. При разработке БУ-СКВ широко применялись средства моделирования схемотехнических решений устройств и процессов управления электродвигателем.

БУ-СКВ содержит следующие функциональные устройства:

- устройство управления электродвигателем (УУД) – осуществляет выполнение алгоритмов управления

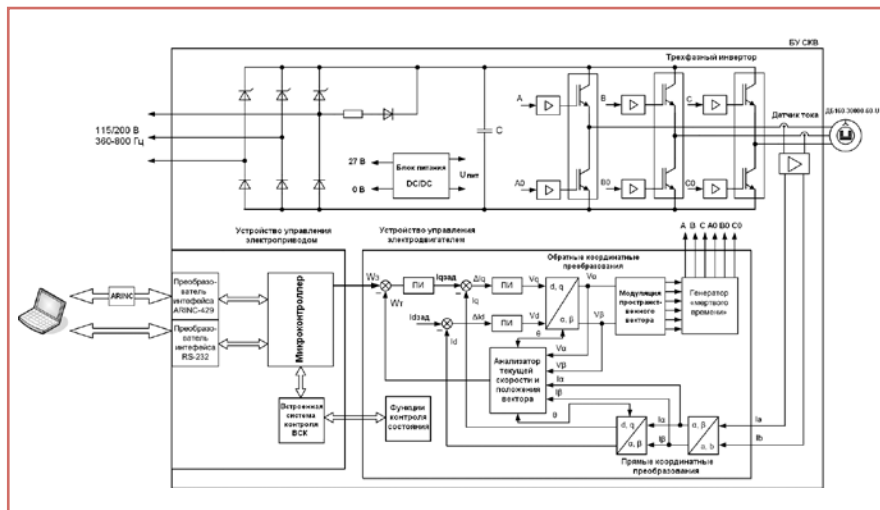


Рис. 3. Структурная схема электропривода и программного обеспечения.

электродвигателем, контроль силовой части. УУД содержит в своем составе трехфазный инвертор, драйвер управления силовыми ключами и производительный микроконтроллер с соответствующими вспомогательными компонентами;

- устройство управления электроприводом (УУЭ) – осуществляет функции взаимодействия с внешними системами и персональным компьютером;
- выпрямитель трехфазный (ВТ) – осуществляет преобразование переменного трехфазного тока напряжением 115/200 В, 360-800 Гц в напряжение 270 В постоянного тока, а также выполняет функции контроля значеный входных напряжений.

Структурная схема электропривода и программного обеспечения приведена на рис. 3.

К особенностям проектирования следует отнести сложность обеспечения формы тока близкой к синусоидальной, требующей высокой частоты переключения силовых ключей (20 кГц и более), что приводит к повышенным динамическим потерям в ключах инвертора, трудностям отвода тепла от кристалла и силового модуля.

Для обеспечения большей гибкости платформы система управления построена

на базе двух высокопроизводительных 32-х разрядных микроконтроллерах и одного вспомогательного восьми разрядного микроконтроллера:

- 1986VE91T – используется в УУД, обеспечивает выполнение алгоритмов управления электродвигателем и выполнение функций отключения силовой части при нештатных ситуациях;
- 1986VE1T – используется в УУЭ, обеспечивает взаимодействие с внешними системами, прием и передачу информации по интерфейсу ARINC-429, прием и передачу дискретных сигналов, вывод текущей информации на ЖК-экран блока управления;
- 1886VE5BU – обеспечение контрольных функций трехфазного выпрямителя и звена постоянного тока.

Внешний вид БУ-СКВ показан на рис. 4, конструкция силовой части – на рис. 5.

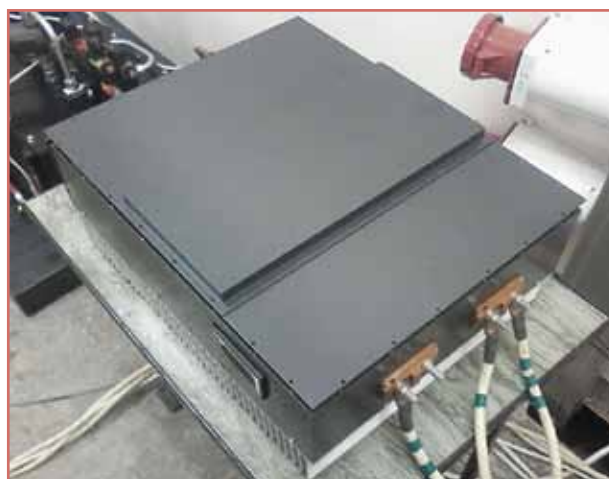


Рис. 4. Внешний вид БУ-СКВ.



Рис. 5. Конструкция силовой части БУ-СКВ.

Силовая часть блока управления выполнена по классической схеме на базе трех полумостовых модулей с малыми динамическими потерями. Конструкция силовых соединительных шин обеспечивает минимальные значения распределенных индуктивностей и сопротивлений, достаточную электрическую прочность. Положительная и отрицательная шины звена постоянного тока выполнены планарными с межслойным изолятором, расположены параллельно пути протекания тока. Все конструктивные решения обеспечили минимальные значения паразитных индуктивностей, минимальные значения выбросов напряжений при отключении ключей инвертора и, как следствие, безотказную работу силовой части. Драйвер инвертора собственной разработки имеет гальванически изолированный шестиканальный источник питания (питающие напряжения +15/-8 В). Схемные решения адаптированы для применения в авиационной технике специального назначения.

По результатам детальной проработки конструкции она претерпела значительные изменения по сравнению с этапом эскизной разработки [5]. Для обеспечения надежности и технологичности использованы наиболее совершенные схемные и конструктивные решения, передовое программное обеспечение.

Электродвигатель ДБ160-30000-60-U

Проектирование высокоскоростных электрических машин сопряжено с решением следующих проблем:

- обеспечение механической прочности ротора;
- снижение потерь и улучшение способов охлаждения;
- выбор подшипников, обеспечивающих работу на высокой частоте вращения [5].

Для быстроходных электрических машин основной проблемой при проектировании и эксплуатации является обеспечение механической прочности ротора. Главная трудность здесь заключается в удержании постоянных магнитов от действий, возникающих при вращении, центробежных сил.

Одним из основных вариантов решения данной задачи является защита постоянных магнитов от разрушения бандажом из высокопрочных немагнитных и неэлектропроводных сплавов, а также современных композиционных материалов. В разработанном электродвигателе в целях увеличения прочности применен цилиндрический магнит из материала на основе соединений самарий-кобальт с дополнительной защитой в виде бандажки из композитного материала на основе углеродной нити J IMS 60 E13 24K 830tex.

Внешний вид ротора ДБ160-30000-60-U показан на рис. 6.



Рис. 6. Ротор электродвигателя ДБ160-30000-60-U.

Показателем прочности ротора, проверенным практикой, является допустимая линейная окружная скорость. Для роторов с постоянными магнитами и бандажом из углепластика или титана допустимая линейная окружная скорость принимается не более 250-300 м/с [6]. Для разработанного электродвигателя ЭП СКВ линейная окружная скорость в режиме холостого хода не превышает 160 м/с.

Кроме угрозы разрушения ротора под действием центробежных сил, разработчик высокоскоростных машин сталкивается с проблемой проектирования вала из условия обеспечения резонансных частот вне диапазона рабочей частоты вращения машины. В связи с этим необходимо проводить тщательные расчеты, подтверждающие отсутствие резонансных частот в рабочем диапазоне частоты вращения.

Проблемы снижения потерь и улучшения охлаждения возникают из-за уменьшения габаритов высокоскоростного электродвигателя по сравнению с электродвигателем, рассчитанным на меньшую частоту вращения, при одинаковом уровне мощности, а также в связи с возрастанием потерь в стали, в подшипниках, в меди, потерь на вихревые токи в магнитах и аэродинамических потерь [5]. Влияние потерь на вихревые токи следует учитывать при проектировании.

Для получения приемлемых перегревов обмотки статора и для улучшения температурного режима в зонах подшипников была использована жидкостная система охлаждения.

При проектировании высокоскоростных электродвигателей, таких как для электропривода СКВ, возникают проблемы с выбором подшипников, обеспечивающих работу на высокой частоте вращения.

В конструкции электродвигателя ДБ160-30000-60-U были заложены высокоскоростные сдвоенные керамические подшипники фирмы FAG с допустимой частотой вращения до 100000 об/мин производства Германии, обеспечивающие

продолжительный режим работы с заданной частотой вращения при использовании жидкой смазки. Смазка подшипников осуществляется подачей масла через форсунки на дорожки качения. Для защиты электродвигателя от вытекания масла из корпуса предусмотрены лабиринтные уплотнения и маслосгонная резьба на валу ротора, а также уплотняющие кольца в корпусных деталях.



Рис. 7. Электродвигатель
ДБ160-30000-60-У.

Внешний вид электродвигателя ДБ160-30000-60-У показан на рис. 7.

В настоящее время ЭП СКВ проходит исследовательские испытания. Для проведения испытаний разработан и изготовлен испытательный комплекс с дистанционным управлением.

В процессе испытаний осуществляется проверка конструктивных решений, характеристик, алгоритмов управления, работоспособности ЭП СКВ в нормальных климатических условиях без внешней нагрузки и других требований технического задания.

Литература:

1. Оценка эффективности и реализуемости концепции «Полностью электрического самолета для перспективного БСМС». Отчет о НИР // ФГУП «ЦАГИ», Жуковский, 2006.
2. Titan Chapter 2-Systems.//AENG 30001/M2003 Aerospace Vehicle Design & System Integration 3/4 // University of Bristol Department of Aerospace Engineering.
3. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Техно-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады ТУСУРа, № 2 (20), декабрь 2009 – С. 179-184.
4. Панкратов В.В. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения/ В.В. Панкратов, М.О. Маслов // Силовая интеллектуальная электроника. Специализированный информационно-аналитический журнал. – 2007. – №1(6). – С. 23 – 43.
5. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Малюгин А.А., Хохлов О.В. «Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифициро-

ванного самолета.»//ЭЭТ №4, 2011. – С. 39-44.
6. Шумов Ю.Н. «Состояние и тенденции развития сверхвысокоскоростных электрических машин средней и большой мощности.»// Приводная техника №1, 2009. – С.32-43.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов.

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». В настоящее время работает начальником конструкторского отдела ОАО «Электропривод». Имеет 20 научных трудов.

Копчак Андрей Леонидович – родился в 1983 году. В 2005 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок». Опыт работы в области авиационного электропривода – 7 лет. В настоящее время работает начальником конструкторского бюро ОАО «Электропривод». Имеет 3 печатных труда.

Москвин Евгений Владимирович – родился в 1983 году. В 2006 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационного электропривода. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории ОАО «Электропривод». Имеет 3 печатных труда.

Тебеньков Фёдор Геннадьевич – родился в 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специ-

альности «Электромеханика». Имеет 5-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2 категории ОАО «Электропривод». Имеет 2 печатных труда.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers ». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers– 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works.

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». He is a candidate of Engineering. In 2010 he defended a thesis, the theme is: «Magnetolectric starter-generator in the New generation plain power system». At present he is working as the Head of the Design Department in JSC «Electroprivod». He is the author of 20 scientific works.

Kopchak Andrey – was born in 1983. In 2005 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electric drive and automation of production units ». Job experience in the sphere of aviation electric drive is 5 years. At present he is working as the Head of the Design Department in JSC «Electroprivod». He is the author of 3 printed works.

Moskvin Yevgeniy – was born in 1983. In 2006 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is « Electromechanics ». Job experience in the sphere of aviation electric drive is 7 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 3 printed works.

Tebekov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 5 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 2 printed works.

Испытательный комплекс для высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха

// Test complex of the high speed electric drive for compressor
of air-condition system //

Волокитина Е.В., к.т.н., Ерохин Д.В.,
Москвин Е.В., Вшивцев М.В.,
ОАО «Электропривод», г. Киров

В статье представлены результаты разработки дистанционно управляемого испытательного комплекса для испытаний высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: высокоскоростной электропривод, испытательный комплекс, дистанционное управление, система кондиционирования воздуха.

Для проведения испытаний высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха (ЭП СКВ) был разработан и введен в эксплуатацию специальный испытательный комплекс (ИК). Особенность ИК заключается в дистанционном управлении как изделием, так и испытательным оборудованием.

Необходимость дистанционно управляемого ИК заключается, в первую очередь, в обеспечении требований безопасности персонала. Максимальная частота вращения электродвигателя составляет 55000 об/мин и кинетическая энергия ротора, вращающегося на этой частоте, достаточно велика. Таким образом, существует потенциальная опасность возникновения несчастного случая в результате разрушения электродвигателя при отказе (заклинивание ротора, разрушение подшипников и т.д.).

Кроме того, при испытаниях ЭП СКВ задействовано большое количество сложного вспомогательного оборудования, что обуславливает

This paper presents results of the remote controlled test complex for the high speed electric drive of air-conditioning system compressor development.

Keywords: high speed electric drive, test complex, remote control, air-conditioning system.

ИК способен фиксировать результаты испытаний; получать более широкое представление о происходящих процессах в испытуемом электроприводе; определять предостерегающие состояния и осуществлять защиту электропривода от различных повреждений при проведении испытаний. Это позволяет контролировать весь процесс испытаний, оградить персонал от травмирования и минимизировать материальный ущерб при

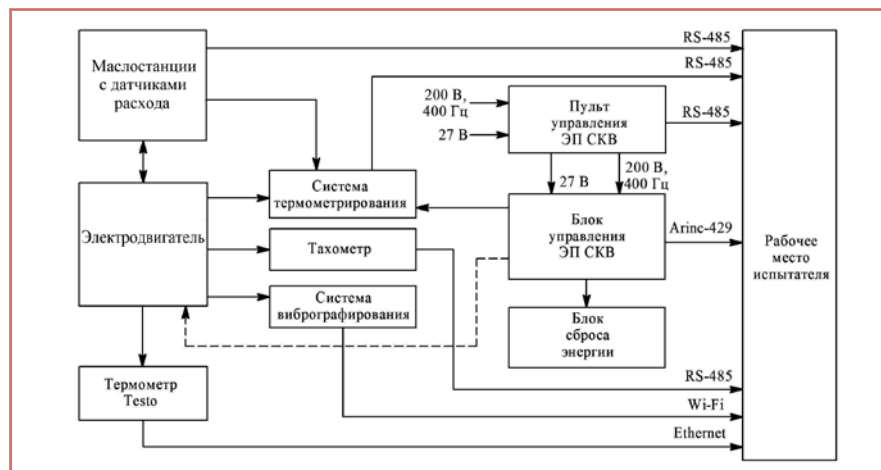


Рис. 1. Структурная схема испытательного комплекса.

необходимость создания единой централизованной системы управления и контроля испытаний, а также сбора и обработки результатов испытаний.

Структурная схема разработанного ИК показана на рис. 1.

ИК состоит из испытательного стенда (рис. 2) и рабочего места испытателя.



Рис. 2. Испытательный стенд ЭП СКВ.

повреждении оборудования в случае возникновении отказных ситуаций.

Испытательный стенд ЭП СКВ

Испытательный стенд включает в свой состав:

1. Пульт управления и контроля ЭП СКВ, структурная схема и внешний вид которого показаны на рис. 3, 4, предназначенный для:

а) дистанционного управления:

- блоком управления БУ-СКВ,
- аварийным отключением питания

по сигналу с места испытателя;

б) контроля потребляемого тока и напряжения БУ-СКВ;

в) коммутации силовых цепей питания блока БУ-СКВ;

г) передачи данных на рабочее место испытателя.

В пульте управления и контроля ЭП СКВ имеется ряд защит:

- встроенная аппаратная защита от перенапряжения, настроенная на превышение напряжения 360 В;

- защита по цепи переменного тока напряжением 115/200 В 400 Гц;

- защита по цепи переменного тока напряжением 220 В 50 Гц;

- защита по цепи переменного тока напряжением 220/380 В 50 Гц;

- защита по цепи постоянного тока напряжением 27 В.

2. Комплект жгутов для подвода питания, подключения пульта управления к БУ-СКВ, подключения блока к электродвигателю.

3. Приспособление для крепления изделия (рис. 5). Электродвигатель крепится к угольнику на испытательном стенде.

4. Устройство для измерения частоты вращения выходного вала электродвигателя.

Контроль частоты вращения осуществляется тахометром (рис. 6) с бесконтактным принципом измерения частоты, основанном на излучении и приеме светового луча, отраженного от светоотражающей метки, прикрепленной к видимой части вращающегося вала электродвигателя. Данные с тахометра поступают на рабочее место испытателя.

5. Система смазки и охлаждения.

Система смазки и охлаждения включает в себя:

- маслостанцию подачи масла с водяной системой охлаждения (подогрева) (рис. 7), обеспечивающую дозированную подачу масла в каждую пару подшипников электродвигателя. Регулирование подачи масла осуществ-

ляется изменением частоты вращения электродвигателя маслостанции частотным преобразователем;

- маслостанцию откачки масла в системе смазки подшипников, обеспечивающую дозированную откачку масла из зоны расположения подшипников. Регулирование подачи масла осуществляется изменением частоты вращения электродвигателя (насоса) маслостанции частотным преобразователем;

- систему подогрева масла в подшипниках для уменьшения вязкости охлаждающей жидкости (рис. 8);

- расходомер (рис. 9) с датчиками расхода на каждую пару подшипников.

Данные с расходомера поступают на рабочее место испытателя.

6. Система вибрографирования.

Система вибрографирования включает в себя анализатор спектра с вибродатчиками (рис. 10), закрепленными на корпусе электродвигателя (рис. 11). Данные с анализатора спектра поступают на рабочее место испытателя по беспроводной системе передачи данных Wi-Fi.

7. Система термометрирования.

Система контролирует температуру на корпусе электродвигателя, радиатора блока управления, выходного вала

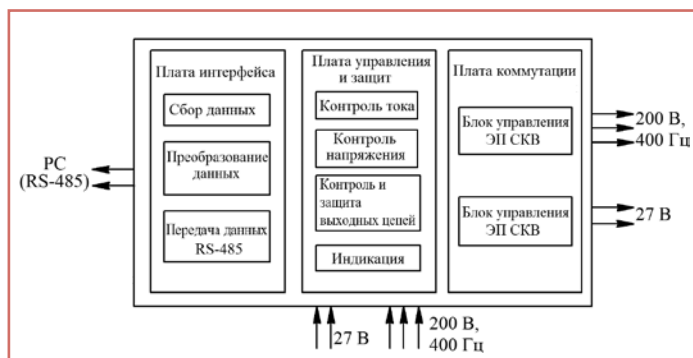


Рис. 3. Структурная схема пульта управления и контроля ЭП СКВ.



Рис. 4. Внешний вид пульта управления и контроля ЭП СКВ.



Рис. 5. Приспособление для крепления электродвигателя.



Рис. 6. Бесконтактный тахометр.

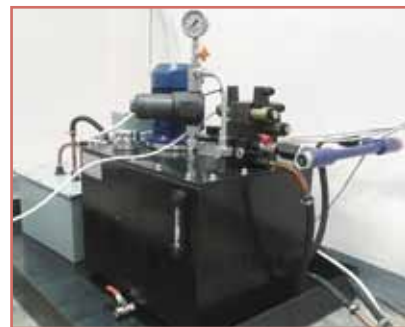


Рис. 7. Маслостанция подачи масла с системой охлаждения.



Рис. 8. Система подогрева масла.



Рис. 9. Расходомер РУС-1.



Рис. 10. Анализатор спектра с вибродатчиками.

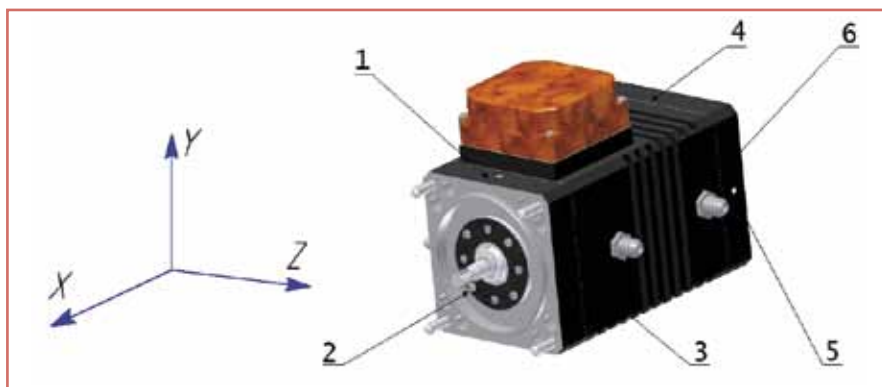


Рис. 11. Оси и точки при проверке уровня вибрации.



Рис. 12. Измеритель-регулятор ТРМ138.



Рис. 13. Лазерный термометр Testo.



Рис. 14. Рабочее место испытателя.



Рис. 15. Программа управления и контроля.

электродвигателя и масла в системе охлаждения. Данные термометрирования поступают на рабочее место испытателя. Системы термометрирования выполнена на базе ТРМ138 (рис. 12).

Для контроля температуры выходного вала электродвигателя применяется лазерный термометр Testo (рис. 13), данные которого передаются на рабочее место испытателя.

Рабочее место испытателя

Рабочее место испытателя предназначено для дистанционного контроля и управления процессом испытания (рис. 14) и включает в себя:

- персональный компьютер с источником бесперебойного питания для резервного питания ПК в случае пропадания напряжения в сети;

• программное обеспечение (рис. 15), отображающее основные параметры процесса испытаний, с записью результатов на жесткий диск ПК;

• систему видеонаблюдения для отображения видеосигнала с камер лаборатории ЭП СКВ;

• мобильные радиостанции для связи испытательного стенда и рабочего места испытателя.

Для проведения испытаний ЭП СКВ было разработано специализированное программное обеспечение, выполняющее следующие функции:

- управление испытательным оборудованием;
- управление электроприводом;
- контроль и регистрация параметров в ходе проведения испытаний.

Функция управления испытательным оборудованием осуществляет подачу сигналов на пульт управления для коммутации цепей питания блока управления электроприводом СКВ (БУ СКВ).

Функция управления электроприводом осуществляет подачу на БУ СКВ управляющих сигналов:

- пуск/стоп,
- заданная частота вращения,
- угол смещения вектора тока,
- ток размагничивания.

Функция контроля и регистрации параметров осуществляет отображение на монитор и регистрацию в файл следующих параметров:

- частота вращения (с БУ СКВ);

- ток электродвигателя (с БУ СКВ);
- напряжение питания и ток цепи управления БУ СКВ;
- силовое напряжение и ток БУ СКВ;
- расход масла по переднему и заднему подшипникам;
- температуру электродвигателя, БУ СКВ, масла;
- частота вращения (с тахометра).

Специализированное программное обеспечение позволяет автоматизировать защиту по температуре (электродвигателя, блока управления, масла в маслостанции), по контролю дозирования масла в подшипники, по вибрации, позволяет своевременно среагировать без участия человека на нестандартную ситуацию, защитить уникальное испытательное оборудование и предотвратить разрушение электродвигателя.

Выводы

1. Разработанный и изготовленный испытательный комплекс позволяет удаленно проводить испытания высокоскоростных изделий с контролем параметров.

2. Программное обеспечение управляет ходом испытаний и осуществляет запись процесса испытаний от подготовки к запуску до останова электродвигателя со всеми действиями испытателя.

3. Удаленное управление обеспечивает защиту персонала в случае непредвиденных ситуаций.

4. Регулировка подачи и откачки масла в системе смазки и охлаждения позволяет удаленно с рабочего места испытателя настроить оптимальный расход при работающем электродвигателе.

5. Анализатор спектра контролирует уровень вибрации одновременно в нескольких точках для полной оценки собственной вибрации, создаваемой электродвигателем при работе.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор более 60 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Ерохин Денис Викторович – родился в 1973 году. В 1995 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 17-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта ОАО «Электропривод». Награжден нагрудным знаком «Отличник качества авиационной промышленности».

Москвин Евгений Владимирович – родился в 1983 году. В 2006 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационного электропривода. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории ОАО «Электропривод». Имеет 3 печатных труда.

Вшивцев Максим Николаевич – родился в 1983 году. В 2009 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электропривод». Имеет 10-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником лаборатории электромеханики ОАО «Электропривод». Имеет нагрудный знак «Отличник качества авиационной промышленности».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers – 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 60 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Yerokhin Denis – was born in 1973. In 1995 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He has 17 years of work experience in the field of aircraft electro-mechanical machines. At present he is a design project engineer of JSC «Electroprivod». He was awarded the award pin «Quality exemplary of aircraft industry».

Moskvin Yevgeniy – was born in 1983. In 2006 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric drive is 7 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 3 printed works.

Vshivtsev Maxim – was born in 1983. In 2009 he graduate from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electric motor drive». He has 10 years of experience in the area of aircraft electrical machines. Currently he works as a head of the electromechanics laboratory in JSC «Electroprivod». He has the award pin «Quality exemplary of aircraft industry».

Автоматизированное проектирование электромеханических тормозов авиационного электропривода

// Computer-aided design of electromechanical brakes of the air electric drive //

Власов А.И., к.т.н., Никитин В.В.,
ОАО «Электропривод» г. Киров

В статье представлен метод интеграции полевого и аналитического способа расчета электромеханических тормозов, позволяющий оценить динамические режимы работы с учетом вихревых токов. Результаты расчета подтверждены экспериментальными данными.

Ключевые слова: электромеханическое тормозное устройство, переходный процесс, время срабатывания, программа расчета

Integration method of a field and analytical way of calculation of the electromechanical brakes, allowing to estimate dynamic operational modes taking into account eddy currents is presented in the paper. Results of calculation are confirmed by experimental data.

Keywords: electromechanical braking device, transient, operation time, the calculation program.

Проблема повышения быстродействия авиационного электропривода вызывает необходимость совершенствования и разработки новых перспективных средств автоматизации. Ответственную роль в электроприводе играют устройства точной остановки приводных механизмов, которые позволяют увеличить надежность и безопасность эксплуатации электродвигателей и механизмов, поднять производительность и качество их работы за счет уменьшения времени разгона и останова, а также фиксации рабочих органов в точке позиционирования [1].

Такие устройства в настоящее время выполняются, в основном, в виде электромеханического тормоза (ЭМТ), встроенного непосредственно в электродвигатель [2]. Классическая конструкция ЭМТ показана на рис. 1.

Широкое распространение ЭМТ объясняется тем, что известные способы электрического торможе-

ния механизмов с электроприводом в устройствах точной остановки и фиксации неприемлемы, так только механическое торможение является единственным способом остановки электродвигателя после прекращения подачи электроэнергии и удержания

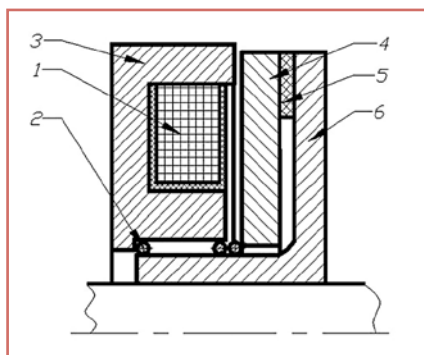


Рис. 1. Конструктивная схема ЭМТ:
1 – обмотка;
2 – противодействующая пружина;
3 – корпус ЭМТ;
4 – подвижный якорь;
5 – фрикционное кольцо;
6 – тормозной диск.

его вала в заторможенном состоянии [1]. Момент торможения ЭМТ, конструкция которого показана на рис. 1, не зависит от наличия электропитания и определяется по формуле (1)

$$M_{тр} = \mu \cdot R_{тр} \cdot F_{ном} \cdot N \quad (1)$$

где N – число пружин;

μ – коэффициент трения;

$R_{тр}$ – радиус трения;

$F_{ном}$ – номинальное усилие пружины.

Таким образом, механический способ позволяет обеспечить постоянство тормозного момента, сократить время инерционного выбега и надежно зафиксировать вал электродвигателя при отключении напряжения сети, сократить количество элементов аппаратуры управления.

В связи с тенденцией увеличения частоты вращения и скорости перемещения исполнительных механизмов возрастает потребность в высокодинамичных электроприводах с ЭМТ. Они используются в станкостроении, робототехнике, подъемно-транспортном машиностроении, авиации, легкой промышленности и т.д.

Создание ЭМТ, полностью обеспечивающих выполнение предъявляемых к ним эксплуатационных требований, в значительной степени сдерживается отсутствием методик проектирования, построенных на основе математических моделей, адекватно описывающих физические процессы, протекающие в магнитной системе ЭМТ в переходных режимах работы и при различных способах управления [1].

В связи с тем, что разработка авиационного быстродействующего электропривода требует учета динамических характеристик ЭМТ, проблема разработки методов проектирования ЭМТ с учетом его динамических характеристик имеет важное практическое значение и является актуальной.

Несмотря на относительно несложное конструктивное исполнение магнитных систем ЭМТ (рис. 1), их расчет, а тем более оптимальное проектирование, встречаются ряд затруднений, обусловленных сложностью решения нелинейных уравнений, которыми описываются процессы в электрических и магнитных цепях.

Известно, что в массивном корпусе ЭМТ при включении наводятся вихревые токи, которые приводят к увеличению времени срабатывания и возрастанию тока включения [3].

Возникающие явления при проникновении электромагнитной волны в массивный корпус ЭМТ можно описать дифференциальными уравнениями Максвелла для осесимметричной задачи [4]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r \cdot \mu_z} \cdot \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_r} \cdot \frac{\partial A}{\partial z} \right) - g \frac{\partial A}{\partial t} = \\ & = -j_{\text{сноп}} + \left(\frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

где μ_z , μ_r – компоненты тензора магнитной проницаемости,

H_{cz} , H_{cr} – составляющие коэрцитивной силы,

g – электропроводность,

A – векторный магнитный потенциал,

$j_{\text{сноп}}$ – сторонняя составляющая тока, вызванного приложенным извне напряжением.

Уравнение (2) может быть решено только при помощи численных методов расчета, например, метода конечных элементов [5].

Аналитические методы поверочных расчетов, в частности расчетов электромагнитных полей, несовершенны, но, как хорошо зарекомендовавшие себя, остаются до сих пор популярными среди разработчиков математических моделей и проектировщиков электрических машин и аппаратов.

Сочетание аналитических методов расчета с программным продуктом численного метода оптимизации обычно приводит к быстрому получению качественных результатов [6].

На основании проведенного анализа представленных на рынке специализированных программных продуктов для математического моделирования ЭМТ с помощью численного решения уравнений магнитного поля выбрано лицензионное программное обеспечение ELCUT, разработанное НПК «ТОР», г. Санкт-Петербург.

Данный пакет моделирования электромагнитных и тепловых полей отличается предельно интуитивно понятным интерфейсом, простотой, а также высокой скоростью вычислений. Магнитное поле в пакете ELCUT можно

рассчитать быстрее чем, например, в известном пакете FEMM [7], что иллюстрируется графиками на рис. 2, где показаны зависимости времени расчета модельной задачи в пакетах ELCUT и FEMM от числа узлов конечноэлементной сетки N. Это делает пакет ELCUT предпочтительным при проведении многовариантных расчетов и оптимизации ЭМТ на основе полевых математических моделей.

Следует отметить, что в ELCUT открыт доступ из среды программирования к набору объектов для постановки, решения и анализа задачи моделирования поля. Данная технология ActiveField была использована для интеграции полевого и аналитического метода расчета ЭМТ.

Описание программы расчета ЭМТ

В ходе исследований ОАО «Электропривод» был разработан специализированный программный продукт (рис. 3) на основе языка программирования Visual Basic, предназначенный для расчета как статических, так и динамических характеристик ЭМТ и построенный по модульному принципу с интеграцией полевого и аналитического метода расчета.

Расчет производится в два основных этапа. На начальном этапе осуществляется анализ исходных данных, производится аналитический расчет статических характеристик ЭМТ по инженерной методике, формируется геометрическая модель магнитной системы ЭМТ. На втором этапе гео-

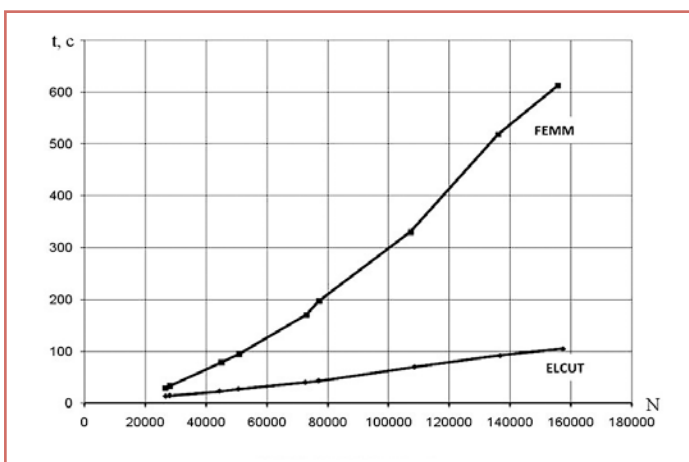


Рис. 2. Сравнение программных пакетов ELCUT и FEMM по скорости расчета.

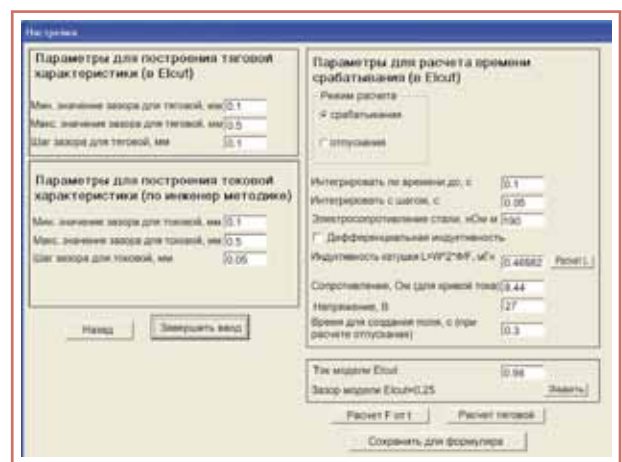


Рис. 3. Интерфейс программы расчета ЭМТ.



Рис. 4. Алгоритм работы программы расчета ЭМТ.

метрическая модель экспортируется в программный комплекс ELCUT, строится полевая модель и производится расчет динамических характеристик ЭМТ.

Расчет динамических характеристик ЭМТ реализован на основе блока ELCUT «Нестационарное магнитное поле». Данный вид анализа позволяет рассчитывать магнитное поле, возбужденное токами произвольной формы и анализировать переходные процессы. При этом в расчете учитываются геометрические особенности ЭМТ, а также насыщение магнитной цепи и т.п. Алгоритм работы программного продукта представлен на рис. 4.

В большинстве случаев ЭМТ авиационных электроприводов работают в режимах частых включений и отключений, поэтому, наряду с основным

статическим параметром – номинальным тормозным моментом $M_{тр}$, часто в ЭМТ требуется определить время срабатывания t_{cp} , а также ток включения $I_{вкл}$, т.е. такой ток, при достижении которого начинается движение якоря ЭМТ.

Рассмотрим метод определения времени срабатывания ЭМТ, реализованный в разработанном программном продукте.

В момент включения ЭМТ электромагнитное поле проникает в его сердечник и индуцирует вихревые токи, которые препятствуют дальнейшему нарастанию магнитного потока. В связи с этим, нарастание тягового усилия ЭМТ происходит с запаздыванием относительно тока катушки. Начало движения якоря и, соответственно, время срабатывания определяется исходя из условия равенства электромагнитного тягового усилия $F_{эм}$ и осевого усилия тормозных пружин F_{np} , действующих на якорь

$$F_{эм} = F_{np} \quad (3)$$

Закон изменения тока в катушке определяется исходя из условия равновесия напряжений цепи

$$U = i \cdot R + L_{cp} \cdot \frac{di}{dt} \quad (4)$$

откуда

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-t \cdot R/L_{cp}}\right) \quad (5)$$

где U – напряжение питания,
 R – активное сопротивление,
 L_{cp} – средняя индуктивность катушки,
 t – время.

При проведении дальнейших расчетов необходимо определить

индуктивность катушки L_{cp} ЭМТ.

Для этого диапазон токов от 0 до $I_{вкл}$ разбивается на n участков таким образом, чтобы

$$\Delta i = \frac{I_{вкл}}{n} \rightarrow 0 \quad (6)$$

На каждом из n участков определяется дифференциальная индуктивность L_k по формуле

$$L_k = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi}{\Delta i} \quad (7)$$

где ψ – потокосцепление катушки,
 i – ток катушки.

Для определения индуктивности L_k рассчитывается вебер-амперная характеристика ЭМТ, показанная на рис. 5.

Графическое определение индуктивности L_k по формуле (7) поясняется рис. 6.

Средняя индуктивность L_{cp} определяется по формуле

$$L_{cp} = \frac{\sum_{k=1...n} L_k}{n} \quad (8)$$

После определения закона нарастания тока и ввода геометрических и физических свойств модели проводится расчет нестационарного магнитного поля ЭМТ, временные параметры интегрирования определяются итерационным путем. В результате решения получаем зависимость тягового усилия якоря от времени (рис. 6).

Время срабатывания t_{cp} определяется графическим путем (рис. 6), ток срабатывания рассчитывается по формуле (5) для момента времени $t = t_{cp}$.

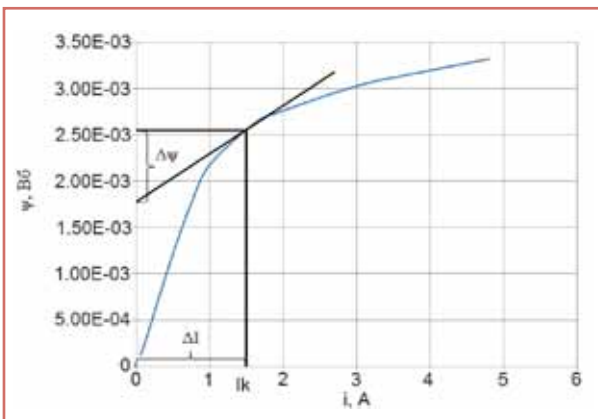


Рис. 5. Вебер-амперная характеристика ЭМТ.

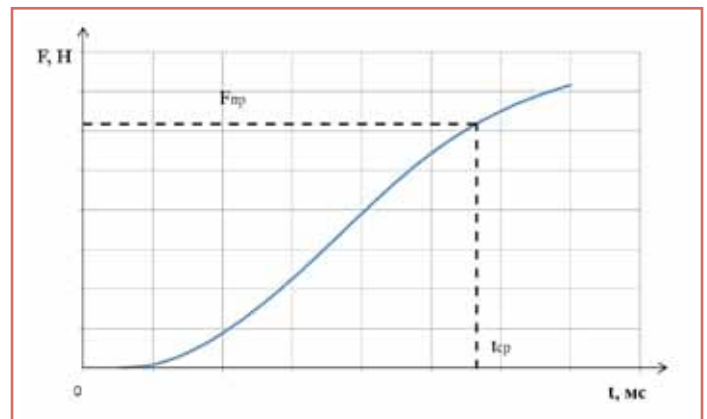


Рис. 6. Зависимость тягового усилия якоря от времени.

Таблица 1. Сравнение экспериментальных и расчетных данных ЭМТ.

Параметр	Напряжение U=18		Напряжение U=24		Напряжение U=27	
	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет
Время срабатывания, мс	96	104	70	67	59	60
Ток включения, А	1,18	1,25	1,326	1,386	1,432	1,458
Индуктивность катушки, Гн	0,906		0,805			
Усилие пружин, Н	1236					
Ток включения в статическом режиме, А	1					

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Для подтверждения достоверности и точности расчетов приведем сравнение результатов расчетов

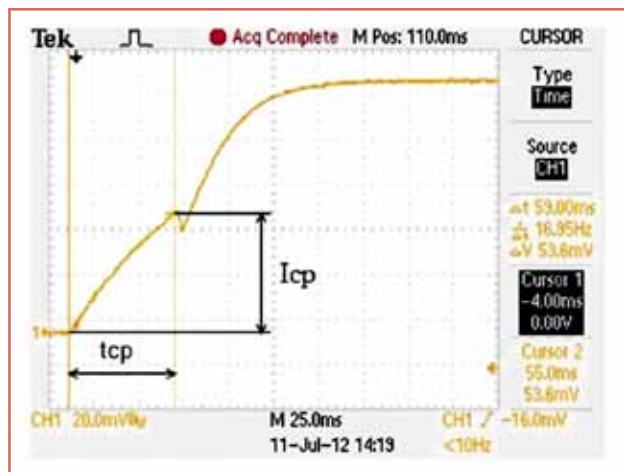


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса включения ЭМТ при напряжении 27 В.

с экспериментальными данными на примере ЭМТ вентильного электродвигателя ДБ160-3000-8 авиационного электропривода.

В таблице 1 представлены экспериментальные и расчетные значения динамических параметров ЭМТ. На рис. 7 показана осциллограмма переходного процесса включения ЭМТ при напряжении питания 27 В.

Из анализа данных таблицы следует, что расхождение экспериментальных и расчетных данных составляет не более 7 – 8 %, что позволяет сделать вывод о корректности разра-

ботанной программы и достоверности расчетов.

Выводы

1. Разработана программа расчета ЭМТ, построенная по модульному принципу с интеграцией полевого и аналитического методов расчета, позволяющая оценивать переходные режимы работы ЭМТ, определять время срабатывания и ток включения ЭМТ с учетом влияния вихревых токов,

2. Подтверждена корректность разработанной программы и достоверность расчетов методом сопоставительного анализа результатов расчета с результатами экспериментальных данных ЭМТ электродвигателя ДБ160-3000-8 авиационного электропривода.

Литература:

1. Бочкарев Игорь Викторович. Быстродействующие электрохимические тормозные устройства для электродвигателей: диссертация... доктора технических наук: 05.09.01. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 288 с.: ил. РГБ ОД, 71 05-5/75
2. Расчет времени отпущения электрохимических тормозных устройств. / Власов А.И., Волокитина Е.В., Никитин В.В. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010. – №2-3. – С.45-48.

3. Электромагниты постоянного тока./ А.В. Гордон, А.Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960 – 447 с.

4. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. ООО «ТОР», 2011 – 360 с.

5. Галлагер Р. Метод конечных элементов: основы. – М.: Мир. – 1984. – 428 с.

6. Захаренко А.Б. Оптимизация погружных синхронных электродвигателей.// Электротехника. – 2002. – №5. – с. 50-55.

7. femm.foster-miller.net.

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». 9 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником конструкторского отдела ОАО «Электропривод». Имеет 20 научных трудов.

Никитин Владимир Владимирович – родился в 1980 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электрические машины и аппараты». 11 лет работает в области авиационного электропривода. В настоящее время – инженер-конструктор I категории ОАО «Электропривод». Автор 16 научных трудов.

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». He is a candidate of Engineering. In 2010 he defended a thesis, the theme is: «Magnetolectric starter- generator in the New generation plain power system». At present he works as a Head of the Design Department in JSC «Electroprivod». He is the author of 20 scientific works.

Nikitin Vladimir – was born in 1980. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electrical machinery and equipment». He is working in the sphere of aviation electric drive for 11 years. At present he is working as a design engineer of the first category in JSC «Electroprivod». He is the author of 16 scientific works.

Сведения об авторах

Вишне夫斯基 Сергей Никодимович
(8332) 58-25-86

Малюгин Антон Александрович
(8332) 38-00-15

Коньшев Дмитрий Владимирович
(8332) 23-13-83

Ерохин Денис Викторович
(8332) 58-43-88

Миронов Владимир Александрович
(8332) 23-19-70

Рубцова Людмила Александровна
(8332) 58-43-88

Овечкин Олег Иванович
(8332) 23-22-47

Тебеньков Фёдор Геннадьевич
(8332) 38-00-15

К.Т.Н.
Власов Андрей Иванович
(8332) 38-00-35

Копчак Андрей Леонидович
(8332) 38-00-05

К.Т.Н.
Волокитина Елена Владимировна
(8332) 58-43-88

Москвин Евгений Владимирович
(8332) 38-00-05

К.Т.Н.
Опалев Юрий Геннадьевич
(8332) 38-00-15

Вшивцев Максим Николаевич
(8332) 23-28-85

Никитин Владимир Владимирович
(8332) 38-00-15

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **4 800 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95,

e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2013 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей

4-я страница обложки – 30 000 рублей

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.