

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:

М.П. Бадер, д.т.н., профессор
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент
Л.А. Герман, д.т.н., профессор
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор
В.В. Калугин, д.т.н., доцент
А.А. Ковалев, д.т.н.
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор
А.И. Попов, д.т.н., профессор
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент
В.Е. Ютт, 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
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать: __.07.2020 г.

Отпечатано:

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

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 310б.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Власов А.И., Новоселова А.В.

АО «Электропривод»: вчера, сегодня, завтра 2

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Власов А.И.

Экспериментальные исследования вентильных электродвигателей постоянного тока с различными материалами бандажей ротора 7

Нефедов Б.А., Тебеньков Ф.Г.

Разработка пассивного корректора коэффициента мощности, анализ эффективности на управляемом электроприводе авиационного назначения 12

Власов А.И., Никитин В.В., Коротков И.В., Коньшев Д.В.

Электромагнитная муфта торможения с комбинированной парой трения 16

Рубцова Л.А., Малюгин А.А., Печенкина Н.А., Киселев Р.В.

Особенности разработки малогабаритного электромагнита для электроблокиратора дверей фюзеляжа среднемагистрального самолета нового поколения 19

Губин И.В., Шешин А.Д., Фоминых А.А., Опалев Ю.Г.

Результаты исследований по созданию электрического транспорта. . . 23

Москвин Е.В., Власов А.И.

Особенности построения регулятора положения с переменной структурой для автоматизированных приводов систем механизации крыла 26

Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Каримов Р.Д., Айгузина В.В., Власов А.И.

Отказоустойчивый электрический двигатель для топливных насосов летательных аппаратов 29

Грязев К.Д., Новоселова А.В.

Об опыте разработки систем электрозапуска газотурбинных двигателей в АО «Электропривод» 34

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ

Филиппов М.А., Власов А.И., Садаков Н.А.

Опыт применения аддитивных технологий при производстве сложных корпусных деталей 37

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Трефилова Т.А., Бирюкова Г.А.

Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий 41

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Бушуев А.П., Гусев С.В.

Проблемы воспроизводимости вибрационных испытаний 45

АО «Электропривод»: Вчера, сегодня, завтра

// JSC "Electroprivod": yesterday, today, tomorrow //

**Власов А. И., к.т.н., Новоселова А. В.,
АО «Электропривод», Киров**

В статье рассматриваются основные направления деятельности АО «Электропривод». Приведены современное состояние и перспективы развития предприятия.

Ключевые слова: АО «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, experimental design bureau, development prospects.

25 августа 2020 года АО «Электропривод», одно из ведущих отечественных опытно-конструкторских бюро по разработке авиационного электротехнического оборудования, отмечает 65-летие со дня образования.

Предприятие создано как филиал Московского агрегатного завода (МАЗ) «Держинец» в г. Кирове на территории завода им. Лепсе с целью развития опытно-конструкторских бюро авиационной промышленности в восточных районах СССР, оказания помощи серийным заводам им. Лепсе и им. XX партсъезда в освоении изделий головного ОКБ и проведении разработок новой техники под его руководством.

Предприятие уверенно проходило путь становления: развивалось деловое сотрудничество с разработчиками и изготовителями отечественных самолетов и вертолетов, с отраслевыми институтами НИИАО, ЦАГИ, ЦИАМ, ВНИИ НП. За годы существования было выполнено свыше 1600 НИОКР, большая часть которых проводилась по техническим заданиям конструкторских бюро Антонова, Бериева, Ильюшина, Камова, Миля, Микояна, Мясищева, Сухого, Туполева, Яковлева, а также разработчиков авиадвигателей и авиационных бортовых систем. Значительная часть разработанных изделий внедрена в серийное производство на заводах в Кирове, Кирово-Чепецке, Курске, Кизляре, Саратове, Тюмени и Улан-Удэ. Изделия разработки предприятия применены практически на всех отечественных военных и гражданских самолетах, вертолетах и авиационных двигателях. Они работают в системах запуска авиадвигателей, управления взлетом, полетом и посадкой самолетов, бортовых

системах электроснабжения, противообледенения, кондиционирования воздуха, выпуска и уборки шасси, регулирования по высоте кресла летчика, вращения антенн, перемещения контейнеров и др.

Благодаря достижениям в создании новой техники в области авиационного оборудования предприятие завоевало высокий авторитет среди предприятий отрасли.

Разработанные в 80–90-х годах прошлого века унифицированные, высокотехнологичные, малогабаритные ряды электроприводов поступательного и вращательного движения, не уступающие по техническому уровню лучшим зарубежным аналогам, стали значительным достижением предприятия. Создание автоматизированных электроприводов на базе спроектированных вентильных электродвигателей постоянного тока взамен применяемых ранее гидравлических и пневматических систем можно считать первым практическим шагом к реализации концепции «полностью электрического самолета». Электропривод управления закрылками ЭПЗ-77, разработанный в 90-е годы для военно-транспортного самолета Ан-70, стал первым не только в отечественной, но и в зарубежной авиационной технике, электроприводом нового поколения, внедренным в систему управления механизацией крыла взамен традиционного гидропривода.

В 1989 году с целью повышения эффективности использования научно-технического потенциала предприятие было выведено из подчинения МАЗ «Держинец» и получило статус самостоятельного предприятия, в 1993 году проведена его приватизация с преобразованием

в Акционерное общество открытого типа «Электропривод». В 2008 году ОАО «Электропривод», как стратегическое предприятие ОПК РФ, вошло в государственную корпорацию «Ростехнологии» (ГК «Ростех»), созданную для поддержки и развития высокотехнологичного сегмента российской промышленности, в 2009 году – в состав холдинга «Авиационное оборудование» (с марта 2015 года – АО «Технодинамика»).

Сегодня АО «Электропривод» – научно-технический и производственный комплекс, осуществляющий полный цикл создания и внедрения высоконадежной интеллектуальной техники в соответствии с ГОСТ РВ 15.004: от начала разработки, изготовления опытных образцов, проведения испытаний до мелкосерийного производства и сопровождения в эксплуатации.

Предприятие осуществляет разработку, производство и ремонт:

- автоматизированных электроприводов различного функционального назначения и их составных элементов (электро-механизмов вращательного, поступательного и качательного движения; электродвигателей всех типов на любые бортовые напряжения питания; блоков управления, датчиков и конечных выключателей), применяемых в системах автоматического управления и регулирования в авиационной, военной и космической технике, нефтегазовом комплексе, робототехнике, станкостроении, атомной энергетике;

- аппаратуры электроавтоматики для контроля и запуска авиадвигателей;

- электростартеров для запуска газотурбинных двигателей на газоперекачивающих станциях и газотурбинных электростанциях.

В АО «Электропривод» разработана, задокументирована, внедрена, поддерживается в рабочем состоянии и постоянно улучшается система менеджмента качества (СМК), соответствующая требованиям ГОСТ РВ 0015–002–2012, ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и ГОСТ Р ЕН 9100–2011. СМК АО «Электропривод» распространяется на разработку, производство, ремонт, испытания и обслуживание военной и авиационной техники, а также продукции двойного и производственного-технического назначения.

Готовность предприятия к созданию высокотехнологичной конкурентоспособной продукции подтверждена лицензиями:

- на осуществление разработки, производства, испытания и ремонта авиационной техники;

- на осуществление разработки, производства, испытания, установки, монтажа, технического обслуживания, ремонта, утилизации и реализации вооружения и военной техники;

- на изготовление оборудования для ядерных установок: атомных станций;

- на осуществление космической деятельности.

Сформировавшийся за время развития предприятия системный подход к проектированию позволяет проводить разработки на высоком техническом уровне.

На предприятии функционирует система автоматизированного проектирования (САПР). Она реализована на модульном принципе и представляет собой совокупность проблемно-ориентированных пакетов прикладных программ, позволяющих:

- проводить 2D- и 3D-конструирование электрических машин, электромеханизмов, электронных устройств;

- выполнять автоматизированные расчеты электрических машин всех типов и электромеханизмов вращательного и поступательного движения на основе специализированных программ, включая программы собственной разработки;

- выполнять численное моделирование электромагнитных и тепловых полей на основе метода конечных элементов при проектировании электрических машин, аппаратов, электронного оборудования;

- проводить автоматизированные расчеты показателей надежности изделий;

- осуществлять моделирование и схемотехническое проектирование электронных схем, автоматизированное проектирование печатных плат.

Комплекс программных продуктов для автоматизации конструкторской подготовки производства на основе T-Flex CAD и T-Flex DOCs позволяет осуществлять внутреннюю информационную интеграцию в системы управления производственными процессами предприятия.

Необходимым условием повышения конкурентоспособности продукции является изменение организации производства и переход на полностью цифровые методы. Цель перехода: сокращение времени вывода новых продуктов на рынок, повышение степени гибкости производства, качества продукции, эффективности производственных процессов.

Переход к цифровой системе производства требует использования современных информационных технологий для точной и своевременной оценки отдельных производственных показателей, мониторинга производственных мощностей и состояния станочного парка, интеграции цифровых моделей изделий и производственных процессов, оптимизации и последующей трансформации производства.

Основные направления трансформации включают расширение кооперации, развитие цифровых методов контроля и управления производством, повышение его технологического уровня, внедрение новых методов и инструментов обеспечения загрузки производственного оборудования и формирования цепочек производственной кооперации, оптимизацию инвестиционных затрат, реструктуризацию площадей основного и вспомогательного производства.

Проект цифровой трансформации управленческих и производственных бизнес-процессов в АО «Электропривод» курируется холдинговой компанией АО «Технодинамика».

Развитию производственной системы предприятия способствует внедрение

в АО «Электропривод» инструментов бережливого производства.

В настоящее время мощности предприятия обеспечивают выполнение поставленных планов, но увеличение объемов поставок высокотехнологичной продукции, обеспечение ее конкурентоспособности требуют внедрения и использования современных инновационных технологий, совершенствования и расширения технико-технологической базы предприятия. АО «Электропривод» осуществляет техническое перевооружение производства. Приобретение нового оборудования существенно повышает уровень автоматизации производства, позволяет отказаться от аутсорсинга в обоснованных случаях, улучшает качество и сокращает сроки выполнения технологических операций (рис. 1).

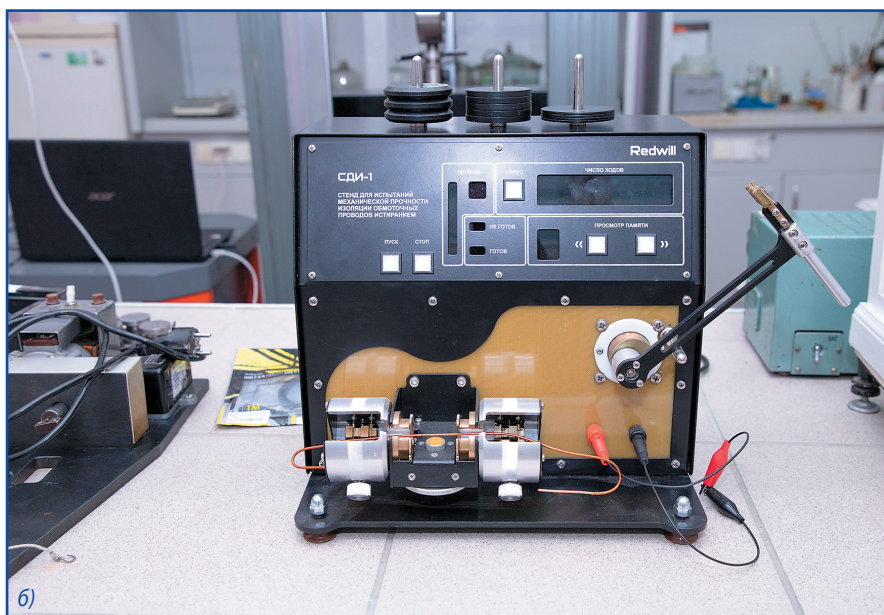


Рис. 1. Новое оборудование: разрывная машина РЭМ-20-А-1 для определения механических свойств резин, клеев, изоляционных материалов (а), стенд для испытания механической прочности изоляции обмоточных проводов истрианием «СДИ-1» (б)

Предприятие обладает компетенциями и по проектированию, изготовлению испытательного оборудования. Завершены отладочные работы трехканального нагрузочного стенда для проверки штоковых электромеханизмов, спроектированного на базе линейных приводов SewEurodrive. Стенд обладает высокими динамическими показателями регулирования нагрузки и позволяет в диапазоне рабочего хода имитировать знакопеременную нагрузку (рис. 2).

Экспериментально-исследовательский отдел предприятия имеет Свидетельство об аттестации в качестве испытательного подразделения, удостоверяющее соответствие требованиям к технической компетенции и независимости согласно РД В 319.02.70–08 «Аппаратура, приборы, устройства военного назначения. Требования к испытательным подразделениям и порядок их аттестации», выданное филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России. В соответствии с программой развития приобретает новое испытательное оборудование. Новое оборудование, в частности, позволяет расширить возможности испытательной базы предприятия при проведении испытаний на соответствие требованиям КТ-160G/14G (рис. 3).

В арсенале измерительного оборудования – координатно-измерительная машина, применение которой в процессе производства позволяет исключить необходимость проектирования, изготовления, контроль и ремонт измерительной оснастки, что составляет 20% от объема проектируемой оснастки при постановке изделия на производство (рис. 4).

В настоящее время АО «Электропривод» продолжает активную деятельность по созданию уникальных образцов новой техники для различных отраслей промышленности [1].

Базовым направлением деятельности АО «Электропривод» является разработка авиационных автоматизированных электроприводов, систем и агрегатов, применяемых в составе привода рулевых поверхностей самолета.

К числу разработок в этой области принадлежат:

- система управления приводами механизации СУПМ-76, предназначенная для управления гидравлическими приводами закрылков и предкрылком на самолете Ил-76МД-90А;
- электромеханизм МВ3,5Д25Д управления предкрылками и стабилизатором на самолете-амфибии Бе-200;
- электропривод перемещения предкрылков и закрылков ЭППЗ-204, установленный на самолете Ту-204СМ и предназначенный для управления предкрылками и закрылками на режимах взлета, посадки и ухода на второй круг;
- электропривод перемещения закрылков самолета Ил-112В.

Применение электропривода вместо традиционных гидросистем позволяет

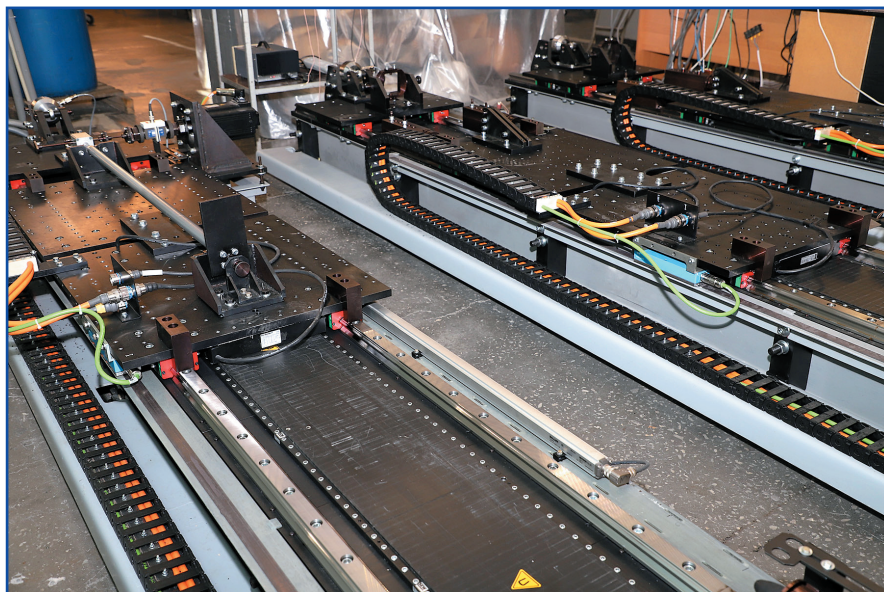


Рис. 2. Трехканальный нагрузочный стенд для проверки штоковых электромеханизмов



Рис. 3. Гидростан REOCAM TCH-500-EtEh

обеспечить улучшенные эксплуатационные и ресурсные характеристики и высокую эксплуатационную надежность, а также уменьшить массу системы по сравнению с аналогичной системой, выполненной на базе гидравлического привода.

В соответствии с федеральной целевой программой «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010 годы и на период до 2015 года» по договору с АО «ОДК-Авиадвигатель» на предприятии идут работы в рамках стратегического проекта российского авиатора – авиадвигателя ПД-14. Среди систем и агрегатов, разработанных для авиадвигателя:

- электропривод реверсивного устройства ЭРУ-ПД14 для двигательной установки с двигателем ПД14;
- приводы сдвиги реверсивного устройства ПСФ-14;

- система электропитания и коммутации СЭПК-14–1 для САУ и электронных блоков;
- электромеханизм привода заслонки воздушного стартера двигателя ПД-14 МЗС-14;
- система сигнализации пневмоцилиндров механизации двигателя ССП-ПД14;
- электромагнит ЭМТ-14РУ для замка РУ. Изделиям МЗС-14, ССП-ПД14, ЭМТ-14РУ, ПСФ-14 присвоена литера «О1».

Конкурсная работа предприятия «Разработка, изготовление и испытание электротехнических агрегатов для перспективного авиационного турбовентиляторного авиадвигателя ПД-14» отмечена дипломом «Авиастроитель года – 2018» в номинации «За успехи в создании систем и агрегатов для авиастроения».

Предприятие принимает участие в проектах импортозамещения.



Рис. 4. Координатно-измерительная машина Contura G2 10/12/6 Aktiv Carl Zeiss

Так, в 2012 году АО «Электропривод» разработало бесконтактные электродвигатели серии ДБМ, предназначенные для работы в составе электроприводов исполнительных механизмов универсальных технологических роботов, а также прецизионного металлообрабатывающего, деревообрабатывающего и другого оборудования. Предприятием изготовлены и испытаны опытные образцы 11 типов ДБМ, осуществлены их поставки на ООО «ВМЗ» (г. Тольятти), где они успешно прошли испытания в составе роботов типа ТПК. Разработанные электродвигатели не уступают по своим техническим характеристикам зарубежным аналогам фирм Siemens и AEG [2].

В целях реализации планов-графиков мероприятий по импортозамещению комплектующих изделий украинского производства, используемых для разработки, производства и ремонта образцов ВВСТ, утвержденных заместителем министра обороны РФ и заместителем министра промышленности и торговли РФ, АО «Электропривод» в 2015–2016 годах осуществило постановку на производство шести изделий для образцов ВВСТ.

В настоящее время АО «Электропривод» реализует проекты по импортозамещению агрегатов иностранного производства для самолетов MC-21 и Sukhoi Superjet NEW по разработке, изготовлению и поставке:

- устройства с электроприводом для грузовых дверей фюзеляжа для MC-21;
- электропривода воздушозаборных створок ВСУ для MC-21;
- системы очистки лобовых стекол для MC-21;
- разработке электромагнитного блокиратора для MC-21;
- системы управления механизацией крыла Sukhoi Superjet NEW;
- привода створки ВСУ и датчика положения створки ВСУ для Sukhoi Superjet NEW.

2019 год отмечен для предприятия началом реализации проектов НИОКР, выполняемых для перспективного авиационного двигателя тягой 35 тонн (ПД-35) по договору с АО «ОДК-Авиадвигатель»:

- по разработке технического предложения электропривода ВНА;
- по разработке эскизного проекта регулируемых электроприводов для насосов-дозаторов двигателя демонстратора технологий.

Проекты по авиадвигателю ПД-35 продолжают и в 2020 году.

Тематический план предприятия по выполнению ОКР, реализуемых в рамках ГОЗ, также дополняется новыми проектами.

В рамках выполняемых НИР и ОКР АО «Электропривод» тесно сотрудничает с высшими учебными заведениями страны:

- с Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»;
- с Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»;
- с Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Вятский государственный университет» (ВятГУ) и созданным на его базе «Инжиниринговым центром ВятГУ».

АО «Электропривод» развивает и диверсификационные направления.

Диверсификационный проект по разработке, изготовлению и поставке комплектов систем электрозапуска ГТД газоперекачивающих агрегатов и электростартеров определен одним из основных направлений развития предприятия. Электростартеры спроектированы и изготовлены на базе

асинхронных электродвигателей взрывозащищенного исполнения. Их использование взамен пневмостартеров обеспечивает экологическую чистоту и энергосбережение в процессе запуска.

В настоящее время параметрический ряд электростартеров с блоками управления обеспечивает электрозапуск газотурбинных двигателей НК-16СТ, НК-16–18СТ, НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ, Д-30ЭУ, ПС-90ГП, АЛ-31СТ, газотурбинных двигателей в составе газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р, ГТУ Т-16, ГТУ типа НК-361 газотурбовоза ГТ-1.

Технический уровень систем электрозапуска подтвержден патентами на изобретение и промышленный образец, разрешениями на применение Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Системы крайне успешно зарекомендовали себя в процессе эксплуатации. Разработанные стартеры позволяют устанавливать их вместо пневмостартеров с минимальными доработками, а в некоторых случаях полностью без доработок по месту стыковки [3, 4].

Также в составе агрегатов объектов газотранспортной системы применяются такие изделия, как блок коммутации БК-90Э, обеспечивающий коммутацию цепей электроагрегатов ГТУ при запуске и остановке, блок автоматического запуска БА3-36 для управления запуском и холодной прокруткой двигателя НК-36СТ (НК-38СТ), электродвигатели ЗДВШ100-1,6 и 4ДВШ100-1,6, предназначенные для работы в составе САУ ГПА и ГТЭС.

Для атомной промышленности предприятие поставляет электродвигатели ДП100-500-2,5 и 2ДП100-500-2,5, предназначенные для работы в составе сервоприводов для перемещения регулирующего органа в системах контроля, управления и защиты атомных реакторов РБКМ. Номенклатура продукции для АЭС расширяется: заключен договор на изготовление и поставку для нужд АО «НИКИЭТ» редукторов РБМ-К7.С6.237-2 и РБМ-К7.С6.238-1, шестерней РБМ-К7.237-65.

АО «Электропривод» – постоянный участник Международного авиационно-космического салона МАКС и Международного военно-технического форума «Армия», выпускаемая продукция удостоена дипломов и положительных отзывов.

Несомненно, основной ценностью предприятия является сплоченный высококвалифицированный коллектив, решающий сложные научно-технические задачи. Сотрудники предприятия имеют множество наград, в том числе более 360 правительственных – за достижения в создании новой техники и профессиональное мастерство.

За заслуги в области конструкторской деятельности и многолетний добросовестный труд четверо сотрудников предприятия удостоены почетного звания «Заслуженный конструктор Российской Федерации». Среди талантливых разработчиков лауреат

Всероссийского конкурса «Инженер года» и лауреат государственной стипендии за выдающиеся достижения в создании прорывных технологий и разработке современных образцов вооружения, военной и специальной техники в интересах обеспечения обороны страны и безопасности государства.

Для молодых специалистов и рабочих созданы благоприятные условия для профессионального роста, освоения смежных профессий, повышения квалификации.

В коллективе предприятия длительное время работали более 50 участников Великой Отечественной войны и свыше 80 труженников тыла. Все они были примером честного служения делу.

Сегодня АО «Электропривод» располагает всеми ресурсами для успешной деятельности, что позволяет с оптимизмом смотреть в будущее, еще более интенсифицировать процесс создания инновационной продукции, сохранить традиционно высокий технический уровень и конкурентоспособность разрабатываемых и выпускаемых серийно изделий.

Литература

1. Власов А.И. Обзор современных разработок электротехнического оборудования АО «Электропривод» / А.И. Власов, Д.В. Конышев, А.В. Новоселова // Электроника и

электрооборудование транспорта, 2017, № 4. с. 12–19.

2. Власов А.И. Новые моментные вентиляционные электродвигатели для прецизионных электроприводов технологических роботов и металлообрабатывающего оборудования / А.И. Власов, Е.В. Волокитина, Ю.Г. Опалев // Электроника и электрооборудование транспорта, 2011, № 4, с. 32–35.

3. Власов А.И. Учет постоянной времени нагрева при разработке электростартера для запуска газотурбинных установок / А.И. Власов, Д.В. Конышев, И.В. Коротков // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019, № 1, с. 20–23.

4. Грязев К.Д. Частотно-управляемые электростартеры для запуска газотурбинных установок / К.Д. Грязев, А.В. Новоселова, В.Ф. Шалагинов // Научно-технический семинар «Электропривод: теория, технология, практика и перспективы», Киров, 25 апреля 2018 г. Сборник тезисов докладов. – Киров: АО «Электропривод», 2018. – 117 с.

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил ВятГУ по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных

электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Новоселова Алла Владимировна

Родилась в 1978 году. В 2002 году окончила ВятГУ по специальности «Электропривод». Опыт работы в области авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает начальником отдела маркетинга АО «Электропривод».

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in “Electric engineering”. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic “Magnetoelectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft”. Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director – chief designer of JSC “Electroprivod”. He has 41 scientific publications.

Novoselova Alla

Was born in 1978. In 2002 graduated from Vyatka State University majoring in “Electric motor drive”. Experience in the field of aviation electric drive – 17 years. At present she works as Head of marketing department of JSC “Electroprivod”.

Экспериментальные исследования вентильных электродвигателей постоянного тока с различными материалами бандажей ротора

// Experimental studies of brushless dc motors with armature bands made
of different materials //

Власов А.И, к.т.н.,
АО «Электропривод», Киров

В статье приведены экспериментальные исследования двух вентильных электродвигателей постоянного тока, бандаж ротора которых выполнен из различных материалов. Показано влияние материала бандаж ротора на рабочие характеристики вентильных электродвигателей постоянного тока.

Ключевые слова: вентильный электродвигатель постоянного тока, экспериментальные исследования, бандаж ротора, потери на вихревые токи в бандаже ротора, рабочие характеристики.

Развитие высокотехнологичных инновационных отраслей промышленности, таких как медицина, робототехника, станкостроение, и разработка новых летательных аппаратов, при общей тенденции миниатюризации технических систем, используемых в данных отраслях, требуют создания новых электромеханических преобразователей энергии, которые способны обеспечивать минимальные габаритные размеры и максимальную плотность энергии [1].

Решение этой задачи вытекает из математической формулы постоянной Арнольда

$$P = \frac{\pi^2}{60 \cdot 10^{10} \cdot k_e} \alpha_\delta \cdot D^2 \cdot l_a \cdot B_\delta \cdot n \cdot k_\phi \cdot k_{обм}, \quad (1)$$

где P – мощность электромеханического преобразователя энергии; A – линейная токовая нагрузка; D – диаметр ротора; l_a – расчетная длина электрической машины; B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре; n – частота вращения ротора; k_ϕ – коэффициент формы поля в воздушном зазоре; α_δ – коэффициент полюсного деления; $k_{обм}$ – обмоточный коэффициент.

Из выражения (1) следует, что при неизменном объеме $\alpha_\delta \cdot D^2 \cdot l_a$ активных элементов электромеханических преобразователей энергии мощность преобразователя можно повысить тремя способами или их комбинациями:

- повысить линейную токовую нагрузку;
- повысить магнитную индукцию в воздушном зазоре;

The article presents experimental studies of two brushless DC motors, equipped with armature bands made of different materials. Effect of armature band material on brushless DC motors performance characteristics is shown. **Keywords:** brushless DC motor, experimental studies, armature band, eddy current losses into armature band, performance characteristics.

- повысить частоту вращения ротора [2].

В связи с тем, что в авиационных электроприводах в качестве электромеханического преобразователя энергии наибольшее распространение получили вентильные электродвигатели постоянного тока (ВДПТ), которые спроектированы уже с максимальными значениями A и B_δ , наиболее перспективным способом повышения мощности является повышение частоты вращения электрической машины.

Проектирование ВДПТ с высокой частотой вращения сопряжено с решением следующих проблем:

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

Для ВДПТ с высокой частотой вращения 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 [3].

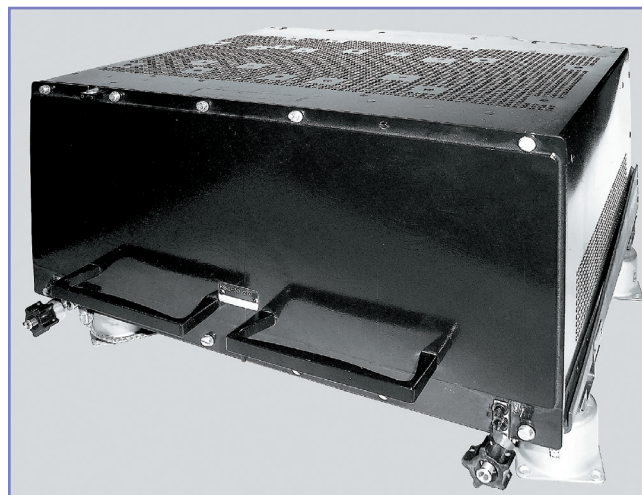
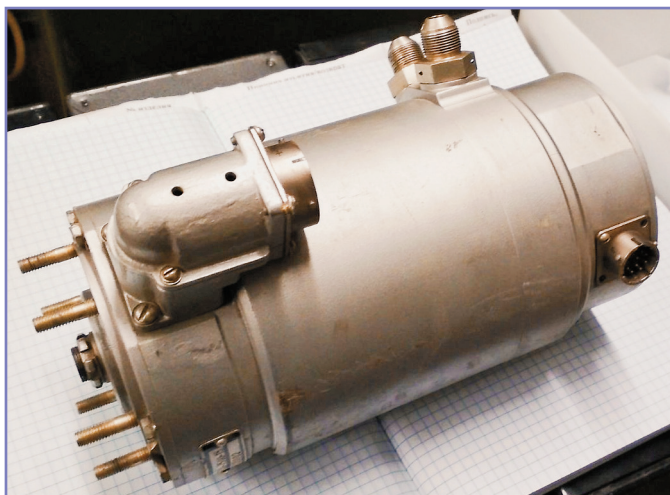
Среди множества известных вариантов наиболее эффективным средством упрочнения ротора с постоянными магнитами является применение бандажных колец. В качестве материалов для бандажей могут использоваться немагнитные высокопрочные материалы с высоким удельным электрическим сопротивлением, к числу которых относятся немагнитные стали, сплавы титана, а также волокнистые композиционные

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов бандаж

Тип материала	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, ГПа
Титан ВТ6	4430	0,82
Титан ВТ2-1Л	4430	1,02
Стекловолокно	2500	2,5
Углеродное волокно	1,76	2,8
Кевлар-49	1450	3,5

Таблица 2. Свойства композиционных материалов зарубежного производства

	GFRP DW 2100	AFRPDW 152	CFRP DW 231	CFRP DW 260
Предел прочности на разрыв, МПа	1440	1880	2420	2420
Плотность, кг/м ³	2100	1330	1520	1520
Максимальная рабочая температура, °С	<110	<140	<140	>300
Коэффициент теплового расширения	7	0,2	0,2	0,2



а) Рис. 1. Электродвигатель ДБ120-2200-15 (-6) и коммутатор КВД30-270

материалы – стекловолно, волокно бора, углеродные волокна – углепластики и др. [4].

Физико-механические характеристики некоторых материалов бандажа представлены в таблицах 1 и 2.

При выборе материала бандажа необходимо учитывать возможность появления в нем дополнительных потерь на вихревые токи и влияние их на нагрев ротора.

В ВДПТ с высокой частотой вращения потери в бандаже ротора создаются токами обратной последовательности. Эти потери можно определить из выражения

$$P_0 = \frac{\pi^3 \cdot (D_M + \delta_0) \cdot \delta_0 \cdot L_M \cdot (2f)^2 \cdot C_p \cdot B_{обр}^2}{2p \cdot \rho_t} \Big]_{r^*=1}, \quad (2)$$

где ρ_t – удельное эклектическое сопротивление материала бандажа, Ом*м;

C_p – коэффициент потерь;

$B_{обр} \Big]_{r^*=1}$ – радиальная составляющая вектора магнитной индукции на поверхности постоянного магнита, созданная током обратной последовательности, Тл.

При $p = 2$

$$B_{обр} \Big]_{r^*=1} = \frac{m}{4\pi^2} \mu_0 \sin \frac{\pi}{2m} \times \\ \times \frac{I_{\phi,обр} \cdot W_{\phi}}{\delta} [1 - (1 + \delta_s)^4 + 4 \ln(1 + \delta_s)].$$

При $p \neq 2$

$$B_{обр} \Big]_{r^*=1} = \frac{\mu_0}{p^2 - 4} \cdot \frac{m}{\pi^2} \sin \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{I_{\phi,обр} \cdot W_{\phi}}{\delta} \times \\ \times \left[-\frac{4}{p} (1 + \delta_s)^{2-p} + \left(\frac{2}{p} - 1\right) \times (1 + \delta_s)^{2-p} + \frac{2}{p} - 1 \right],$$

где $I_{\phi,обр}$ – ток обратной последовательности в фазе А [5].

Аналитическое определение данных потерь не дает необходимой точности, поэтому для анализа потерь в бандаже предпочтительно использовать метод конечных элементов или экспериментальные исследования [2].

В ВДПТ с высокой частотой вращения потери на вихревые токи в бандаже ротора оказывают влияние и на рабочие характеристики электрической машины.

С целью оценки влияния данных потерь на рабочие характеристики, а также определения механических потерь в ВДПТ АО «Электропривод» провело экспериментальные

исследования на двух ВДПТ: ДБ120-2200-15 и ДБ120-2200-6, которые отличаются только обмоточными данными.

Электродвигатели конструктивно представляют синхронные электрические машины с индуктором на постоянных магнитах Sm_2CO_5 и встроенным датчиком положения ротора.

С целью уменьшения потерь ротор электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 выполнен в новой конструкции: в качестве крепления магнитов ротора применен бандаж лентой типа ЭЛУР-П ТУ 6-06-486-8, пропитанной смолой ЭДТ69Н (в дальнейшем – углепластик).

Лента из углепластика наматывалась на ротор, и производилась полимеризация в узле при температуре +130 °С в течение 4–6 часов. Для создания избыточного давления на бандаж при полимеризации устанавливалось фторопластовое кольцо.

Бандаж из углепластика имеет малую электропроводность, что создает условия для снижения потерь, обусловленных переходными процессами в электродвигателе.

При проведении экспериментальных исследований осуществлено снятие рабочих характеристик и определение механических потерь на электродвигателях ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 с ротором новой конструкции (из углепластика) и сравнение их с ранее полученными характеристиками тех же электродвигателей с роторами, где в качестве крепления магнитов использовался полый цилиндр из бронзы.

Проверка электродвигателей ДБ120-2200-15 и ДБ120-2200-6 (рис. 1а) с новой конструкцией ротора (из углепластика) проводилась с макетом коммутатора КВД30-270 (рис. 1б).

Материалы экспериментальных исследований

Определение ЭДС фаз электродвигателей ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 с ротором № 1 новой конструкции (с углепластиком).

Форма ЭДС у обоих электродвигателей при проведении испытаний – правильная синусоида.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости ЭДС от частоты вращения $E = f(n)$ для электродвигателей ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 как с ротором № 1 (с углепластиком), так и с ротором № 1 и 2 (с полым цилиндром из бронзы).

Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что при $n = 15000$ об/мин ЭДС электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 с ротором № 1 с углепластиком на 10 В (5,5%) ниже, чем у того же электродвигателя с ротором № 1 из бронзы. Это объясняется тем, что перед постановкой бандажа из углепластика ротор был перегрет и повторно намагничен не до насыщения (до меньшего значения индукции).

Из приведенных на рис. 3 зависимостей видно, что при $n = 6000$ об/мин ЭДС электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 с ротором № 1 с углепластиком на 19 В (12%) ниже, чем у того же электродвигателя с ротором № 2 с полым цилиндром из бронзы.

Определение механических потерь холостого хода и в стали в генераторном режиме.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости суммы потерь холостого хода и потерь в стали от частоты вращения $P_{пот.хх+ст} = f(n)$ для электродвигателей ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 как с ротором № 1 (с углепластиком), так и с ротором № 1 и 2 (с полым цилиндром из бронзы).

Из приведенных на рис. 4 и 5 графиков видно, что для электродвигателей ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 с ротором новой конструкции (с углепластиком) потери холостого хода и в стали в 3,5÷5 раз ниже, чем в тех же электродвигателях с роторами № 1 и 2 (с полым цилиндром из бронзы).

Различие потерь и их повышенная величина не могут быть объяснены пульсациями тока, т.к. потребляемый ток отсутствует (холостой ход, генераторный режим).

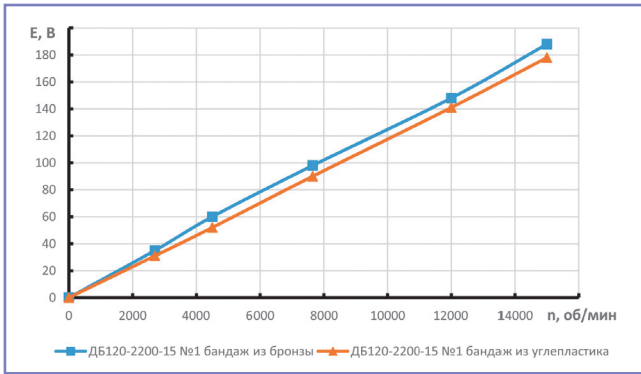


Рис. 2. Зависимость $E = f(n)$ для электродвигателей ДБ120-2200-15 № 1

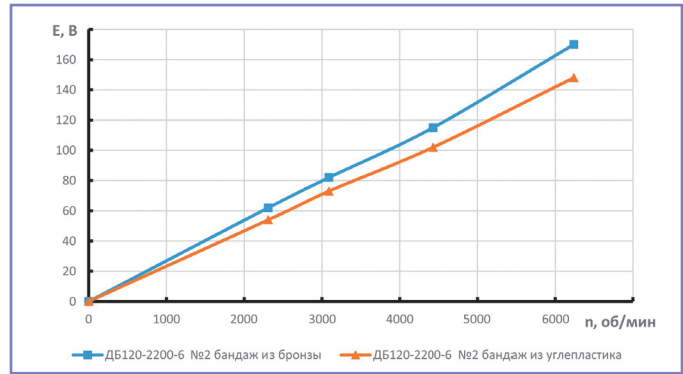


Рис. 3. Зависимость $E = f(n)$ для электродвигателей ДБ120-2200-6 № 2

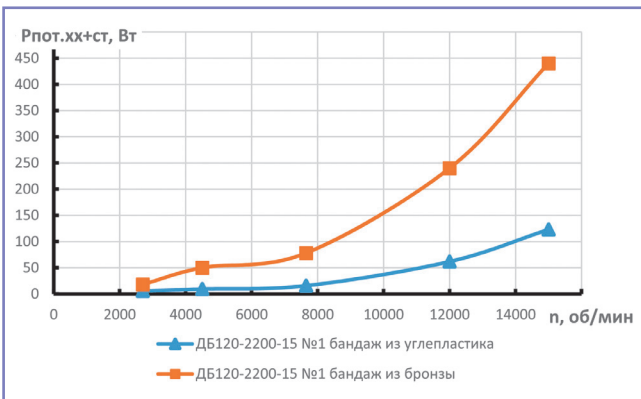


Рис. 4. Механические потери холостого хода и в стали ДБ120-2200-15 № 1

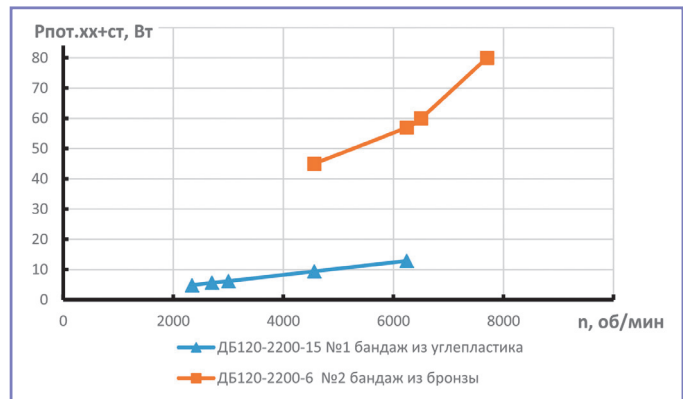


Рис. 5. Механические потери холостого хода и в стали ДБ120-2200-6 № 2

Снятие рабочих характеристик.

Рабочие характеристики снимались при номинальном напряжении питания 270 В и угле опережения включения фаз $Q = 0$ и $Q = +30$ эл. град. на электродвигателе ДБ120-2200-15 № 1 и ДБ120-2200-6 № 2 с ротором новой конструкции № 1 (с углепластиком).

Рабочие характеристики электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 показаны на рис. 6

и 7. Там же приведены характеристики электродвигателя с ротором № 1 (с полым цилиндром из бронзы). Из графиков видно, что у электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 (ротор с углепластиком) частота вращения, полезно отдаваемая мощность и коэффициент полезного действия во всем диапазоне нагрузок выше, чем с ротором № 1 (с полым цилиндром из бронзы), хотя, как говорилось

выше, ЭДС у электродвигателя с ротором новой конструкции (с углепластиком) на 5,5% ниже, чем с ротором № 1 (с полым цилиндром из бронзы).

Загиб механической характеристики электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 с ротором с полым цилиндром из бронзы при угле опережения $Q = 0$ эл. град. объясняется тем, что при снятии данных характеристик

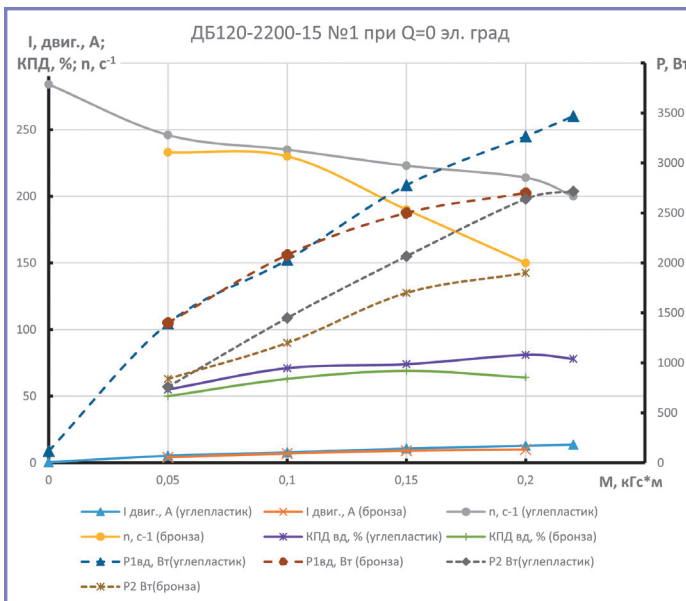


Рис. 6. Рабочие характеристики ДБ120-2200-15 № 1 при $Q = 0$ эл. град.

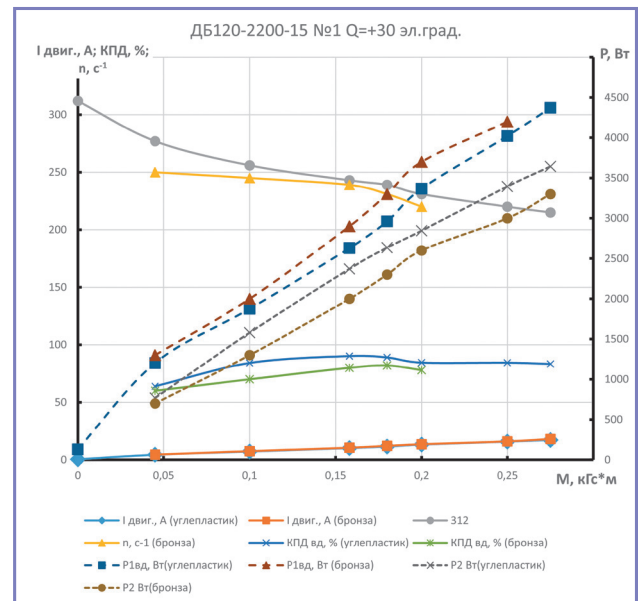


Рис. 7. Рабочие характеристики ДБ120-2200-15 № 1 при $Q = +30$ эл. град.

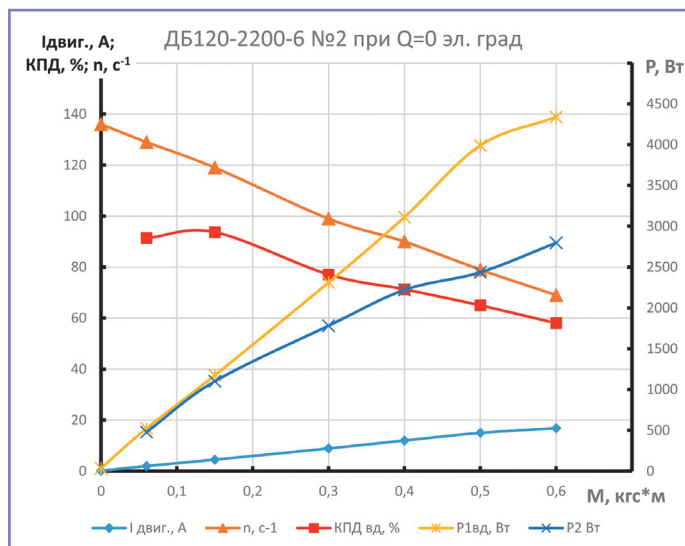


Рис. 8. Рабочие характеристики ДБ120-2200-6 № 2 при Q = 0 эл. град.

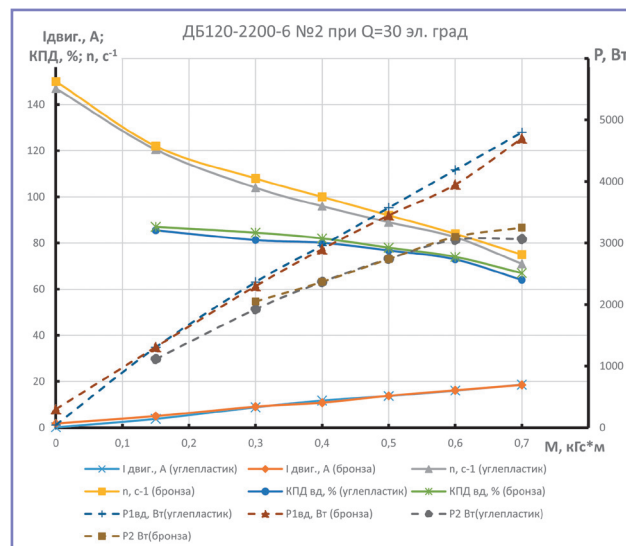


Рис. 9. Рабочие характеристики ДБ120-2200-6 № 2 при Q = 30 эл. град.

в коммутаторе работала схема ограничения по частоте.

Рабочие характеристики электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 показаны на рис. 8 и 9. Также на рис. 9 приведены характеристики электродвигателя с ротором № 2 (с полым цилиндром из бронзы). Сравнительные данные на рис. 8 по данному электродвигателю с ротором с полым цилиндром из бронзы отсутствуют, так как рабочие характеристики не снимались.

Из анализа рабочих характеристик электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 с ротором № 1 (с углепластиком) и этого же электродвигателя с ротором № 2 (с полым цилиндром из бронзы) видно, что:

- ток холостого хода (потребляемая мощность) меньше в 7 раз у электродвигателя с ротором № 1 (с углепластиком). Причиной являются повышенные пульсации тока на холостом ходу в электродвигателе с полым ротором из бронзы;
- частота вращения (полезно отдаваемая мощность) при противодействующем моменте, равном 0,3 кгс-м, ниже всего на 1% у электродвигателя с ротором № 1 (с углепластиком);
- коэффициент полезного действия ниже на 4% у электродвигателя с ротором № 1 (с углепластиком).

При этом следует иметь в виду, что ЭДС электродвигателя с ротором № 1 (с углепластиком) ниже на 12%, чем с ротором № 2 с полым цилиндром из бронзы.

Разделение потерь электродвигателя

Разделение потерь электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 с ротором № 1 (с углепластиком) проводилось при номинальном противодействующем моменте 0,13 кгс-м и угле опережения включения фаз Q = 0

и Q = +30 эл. град. Полученные данные приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 следует, что для снижения добавочных и суммарных потерь электродвигателя под нагрузкой следует вводить опережение на включение фаз приблизительно на +30 эл. град.

Проверка при повышенной частоте вращения

Электродвигатель ДБ120-2200-6 № 2 с ротором № 2 (с углепластиком) прошел проверку при повышенной частоте вращения n = 16000 об/мин в течение двух минут. Проверка проводилась в генераторном режиме электродвигателя, в качестве привода использовалась баланс-машина БМ-42. При разборке электродвигателя следов

механических задеваний и разрушения углепластика ротора не обнаружено. Электродвигатель ДБ120-2200-6 № 2 с ротором новой конструкции (с углепластиком) выдержал проверку при повышенной частоте вращения.

Выводы

1. Действующее линейное значение ЭДС фаз электродвигателей составило:

- ДБ120-2200-15 № 1 при n = 15000 об/мин – 178 В, что на 5,5% ниже, чем с ротором с полым цилиндром из бронзы;
- ДБ120-2200-6 № 2 при n = 6000 об/мин – 141 В, что на 12% ниже, чем с ротором с полым цилиндром из бронзы.

2. Механические потери холостого хода и в стали (суммарные) в генераторном режиме составили:

Таблица 3. Разделение потерь ДБ120-2200-15 № 1 с ротором № 1 (с углепластиком)

Параметры	Q = 0 эл. град.	Q = +30 эл. град.
М противод., кгс-м	0,13	0,13
П ном., об/мин	14050	15100
I двиг., А	8,0	8,45
U двиг., В	270	270
2 R фазы гор. сост., Ом	0,424	0,420
М пот. хх. и стали, кгс-м	0,006	0,008
P пот. хх. и стали, Вт	86,7	124,18
P пот. в ключах, Вт	64	67,6
P пот. в кабеле, Вт	14	15,71
P ₁ системы, Вт	2160	2281,5
P ₁ вд, Вт	2082	2198,1
P ₂ , Вт	1877,64	2017,96
КПД, %	90,2	91,8
Сумма потерь, Вт	204,3	180,14
P пот. электр., Вт	27,136	29,99
P пот. добавочных, Вт	90,46	25,97

• у электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 при $n = 15000$ об/мин – 123 Вт, что в 3,6 раза меньше, чем с ротором с полым цилиндром из бронзы;

• у электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 при $n = 6000$ об/мин – 12 Вт, что в 5 раз меньше, чем с ротором с полым цилиндром из бронзы.

3. Параметры холостого хода электродвигателей при угле опережения включения фаз $Q = +30$ эл. град. составили:

а) у электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 при $U_{пит.} = 290$ В:

- частота вращения – 18740 об/мин;
- потребляемый ток – 0,46 А;
- потребляемая мощность – 129,6 Вт.

Сравнительные данные по данному электродвигателю с ротором с полым цилиндром из бронзы отсутствуют.

б) у электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 при $U_{пит.} = 270$ В:

• частота вращения – 8820 об/мин (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 7980 об/мин);

• потребляемый ток – 0,166 А (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 1,33 А);

• потребляемая электродвигателем мощность – 43,47 Вт (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 349 Вт).

4. Параметры электродвигателя под нагрузкой при угле опережения включения фаз $Q = +30$ эл. град. составили:

а) у электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 при $U_{пит.} = 270$ В и номинальном противодействующем моменте 0,13 кгс-м:

• частота вращения – 14700 об/мин (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 14400 об/мин);

• потребляемый ток – 8,6 А (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 9,2 А);

• коэффициент полезного действия – 89% (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 79%).

б) у электродвигателя ДБ120-2200-6 № 2 при $U_{пит.} = 270$ В и противодействующем моменте 0,3 кгс-м:

• частота вращения – 6240 об/мин (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 6300 об/мин);

• потребляемый ток – 8,83 А (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 9,1 А);

• коэффициент полезного действия – 81,3% (с ротором с полым цилиндром из бронзы – 84,5%).

5. Добавочные потери электродвигателя ДБ120-2200-15 № 1 с ротором новой конструкции (из углепластика) при $U_{пит.} = 270$ В и номинальном противодействующем моменте 0,13 кгс-м составили:

• при угле опережения включения фаз $Q = 0$ эл. град. – 90,46 Вт (суммарные потери при этом – 204,3 Вт);

• при угле опережения включения фаз $Q = +30$ эл. град. – 25,97 Вт (суммарные потери при этом – 180,14 Вт).

Проведенные экспериментальные исследования показали наличие влияния материала бандаж ротора на рабочие характеристики ВДПТ. Результаты экспериментов показано, что с целью снижения потерь в ВДПТ крепление магнитов ротора необходимо осуществлять бандажом из углепластика или другого материала с малой электропроводностью.

Литература

1. Сверхвысокооборотные электромеханические системы: монография / Исмагилов Ф. Р. и др. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – 193 с.
2. Высокооборотные электрические машины с высококоэрцитивными постоянными

магнитами: учебное пособие / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, В. Е. Вавилов. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 247 с.

3. Власов А. И. Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета / Власов А. И., Волокитина Е. В., Копчак А. Л., Москвин Е. В., Тебеньков Ф. Г. // Электроника и электрооборудование транспорта, 2013, № 3, с. 34–39.

4. Компоненты интеллектуальных мехатронных модулей / В. А. Нестерин, Е. В. Волокитина. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2014. – 305 с.

5. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнетозлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in “Electric engineering”. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic “Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft”. Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director – chief designer of JSC “Electroprivod”. He has 41 scientific publications.

Разработка пассивного корректора коэффициента мощности, анализ эффективности на управляемом электроприводе авиационного назначения

// Development of a passive power factor corrector, analysis of efficiency on the controlled electric drive of aircraft purpose //

Нефедов Б. А., Тебеньков Ф. Г.,
АО «Электропривод», Киров

В статье рассматриваются практические аспекты разработки пассивного корректора коэффициента мощности для автономного инвертора напряжения сети переменного трехфазного тока. Дополнительно рассматривается влияние использования пассивного корректора коэффициента мощности на паразитные гармоники тока. Анализ эффективности применения был проведен с помощью расчетов и математического моделирования.

Ключевые слова: активный, пассивный, корректор, активная мощность, реактивная мощность, вентильный электродвигатель постоянного тока.

The article discusses the practical aspects of developing a passive power factor corrector for an autonomous three-phase AC voltage inverter. Additionally, the impact of using a passive power factor corrector on the spurious current harmonics is considered. Analysis of the effectiveness of the application was carried out using calculations and mathematical modeling.

Keywords: active, passive, corrector, active power, reactive power, DC brushless motor.

Современная тенденция улучшения показателей расхода топлива воздушных судов приводит к ужесточению требований, предъявляемых к бортовому оборудованию в части энергоэффективности. Одним из способов повышения энергоэффективности бортовых систем является выполнение их на базе регулируемого электропривода [1, 2].

В настоящее время на самолетах используются три энергетические системы: электрическая, гидравлическая и пневматическая [3].

Построение бортовых систем с использованием электрической, гидравлической и пневматической не является оптимальным для перспективных воздушных летательных аппаратов, поскольку требует существенных затрат на их эксплуатацию и значительно затрудняет интеграцию бортового оборудования.

Одним из наиболее перспективных направлений является переход к концепции создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием (ПЭС) (рис. 1).

По некоторым оценкам, реализация концепции ПЭС применительно к тяжелому транспортному самолету позволит снизить потребление топлива на 8–12%, полную взлетную массу на 6–10%, прямые эксплуатационные расходы на 5–10%, стоимость жизненного цикла на 3–5%, при этом средний налет на отказ увеличивается на 5–6%, время технического обслуживания на 4–4,5%.

Ключевым моментом в реализации концепции ПЭС является создание электромеханических приводов систем управления полетом и системы кондиционирования воздуха.

В электромеханических приводах авиационного применения используются следующие электродвигатели:

- асинхронный электродвигатель;
- синхронный электродвигатель;
- электродвигатель постоянного тока;
- вентильный электродвигатель постоянного тока.

Накопленный АО «Электропривод» опыт, а также отечественная и зарубежная литература показывают, что наиболее перспективным является вариант построения авиационного электропривода на основе вентильного электродвигателя постоянного тока (ВДПТ) [4].

Вентильный электродвигатель постоянного тока является одним из самых перспективных, что объясняется рядом преимуществ, изложенных в [5, 6, 7]. Высокомоментные ВДПТ с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, предназначенные для таких ответственных прецизионных ЭП, как приводы подачи в станках с ЧПУ и технологические роботы, должны удовлетворять специфичному комплексу требований [8], частью которых являются высокая плавность и точность хода.

В структуру силовой части авиационного электропривода на основе ВДПТ обычно входят:

- выпрямитель, позволяющий питать электропривод от систем электропитания переменного тока;
- силовой преобразователь, как правило, на основе автономного инвертора напряжения (АИН), управляемого с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ);
- исполнительный электродвигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую.

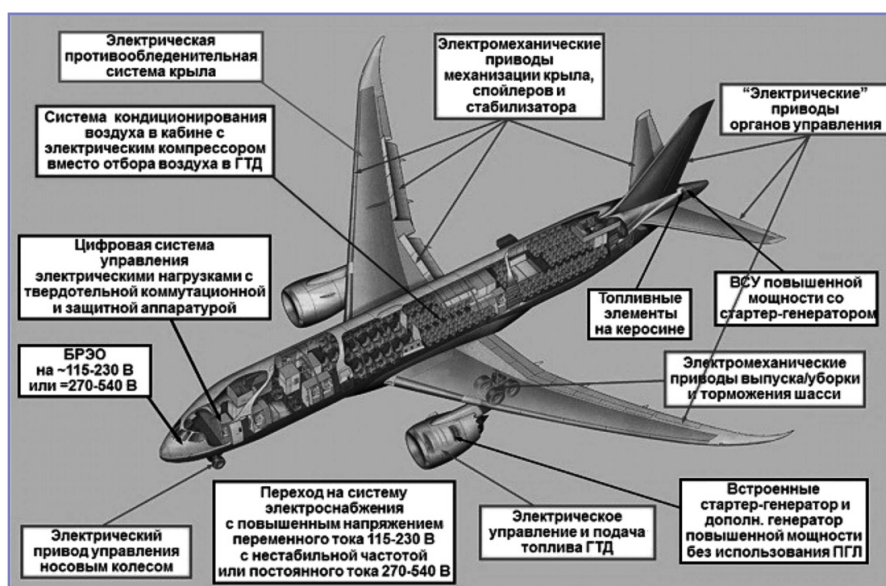


Рис. 1. Концепция полностью электрического самолета

Наличие в структуре выпрямителя и АИН создает такой нежелательный эффект, как искажение гармонического состава тока, потребляемого из сети. Кроме того, данный эффект приводит к снижению коэффициента мощности, что негативно сказывается на энергоэффективности электропривода.

Современные квалификационные справочники КТ-160/ДО-160G и ГОСТ Р 54073-2017 предъявляют весьма жесткие требования к гармоническому составу потребляемого тока и коэффициенту мощности потребителей. Таким образом, в настоящее время перед разработчиками электроприводов авиационного назначения стоит задача обеспечения требований к качеству потребляемого тока.

Возможными способами решения данной проблемы являются:

- использование пассивных корректоров коэффициента мощности (ККМ), дополнительно выполняющих функции фильтров (рис. 2);
- использование активных корректоров коэффициента мощности.

Коррекция коэффициента мощности используется, чтобы избежать паразитных гармоник выходного тока, тем самым сводя к минимуму помехи для других устройств, питающихся от того же источника. Характеристики пассивных ККМ приведены в таблице 1.

Использование активных ККМ в данной статье рассматриваться не будет, т.к. их применение крайне затруднительно из-за высокой стоимости и трудности задания алгоритма управления, несмотря на высокий коэффициент полезного действия

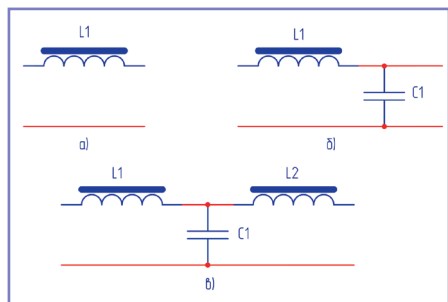


Рис. 2. Топологии пассивных ККМ: L – фильтр первого порядка (а); LC – фильтр второго порядка (б); LCL – фильтр третьего порядка (в)

Параметр	L-фильтр	LC-фильтр	LCL-фильтр
Величина затухания, дБ/декада	-20	-40	-60
Достоинства	Простота схемотехники	Более эффективное по сравнению с L-фильтром ослабление гармоник при низких частотах переключения ключей инвертора	Выработка реактивной мощности, эффективная работа при низких частотах переключения ключей инвертора
Недостатки	Необходимый уровень ослабления гармоник происходит только при высокой частоте переключения ключей инвертора [9]	Повышенная по сравнению с L-фильтром сложность конструкции и стоимость	Наибольшая сложность конструкции и стоимость

при различных входных частотах сети трехфазного переменного тока.

АО «Электропривод» при выполнении ОКР по разработке системы электропривода перемещения закрылков перспективного военного транспортного самолета для решения проблемы гармонического состава потребляемого тока был выбран пассивный ККМ, построенный на основе топологии LCL-фильтра (рис. 3).

Пассивный ККМ был использован в разработанном сотрудниками предприятия АО «Электропривод» перспективном электроприводе перемещения закрылков военного транспортного самолета. Образец блока управления и контроля, а также электромеханизм представлены на рис. 4.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.

Таблица 1. Характеристики пассивных ККМ

Расчет корректора коэффициента мощности проводился для однофазного эквивалента сети [10] (рис. 5).

Требуемая реактивная мощность конденсаторной сборки пассивного корректора коэффициента мощности [11], вар

$$Q_{cap} = P \cdot (\tan\varphi_{actual} - \tan\varphi_{target}), \quad (1)$$

где P – активная мощность, потребляемая из сети переменного тока, Вт;

$\tan\varphi_{actual}$ – тангенс угла сдвига между напряжением и током в схеме без корректора коэффициента мощности;

$\tan\varphi_{target}$ – целевое значение тангенса угла сдвига между напряжением и током при введении корректора коэффициента мощности.

Расчетное количество активной мощности, потребляемой из сети переменного трехфазного тока [11], Вт

Таблица 2. Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение питающей сети (действующее значение), В	115/200
Пиковое значение фазного напряжения, В	155
Номинальный ток в фазе на входе в выпрямитель (действующее значение), А	65
Частота питающей сети, Гц	От 360 до 800
Коэффициент пульсации сети	7%
Текущий тангенс угла коэффициента мощности	0,75
Целевой тангенс угла коэффициента мощности	0,33
Целевой коэффициент мощности	0,95

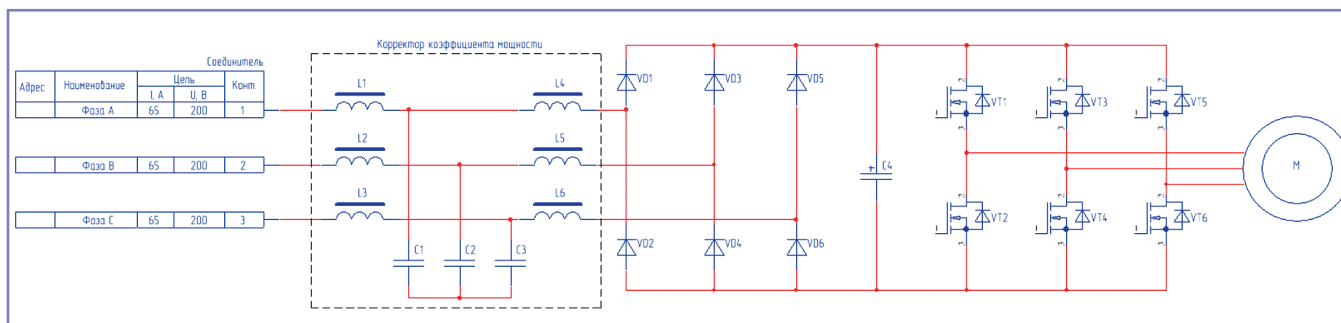
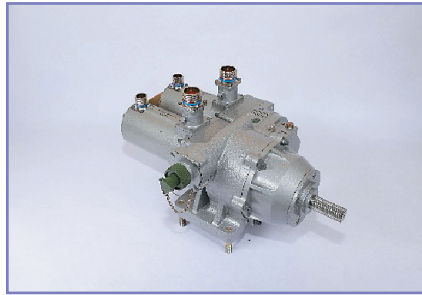


Рис. 3. Схема силовой части электропривода



а) Изделие, на котором проверялась эффективность рассчитанного ККМ: блок управления и контроля перспективным электродвигателем (а); электромеханизм (б)

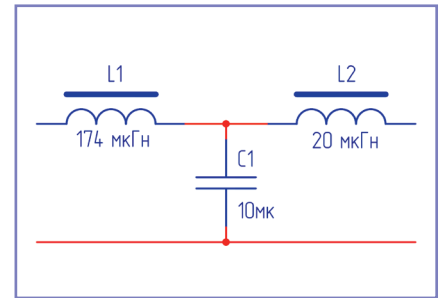


Рис. 5. Однофазный эквивалент сети

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

где P – активная мощность, потребляемая из сети переменного тока, Вт;

U_L – действующее значение линейного напряжения, В;

I – среднее квадратичное значение тока, потребляемого из сети, А;

$\cos \varphi$ – текущее значение коэффициента мощности (косинус угла сдвига между током и напряжением в схеме без корректора коэффициента мощности).

Ток, протекающий в конденсаторе пассивного корректора коэффициента мощности [11], А

$$I_{cap} = \frac{Q_{cap}}{\sqrt{3} \cdot U_L}, \quad (3)$$

где I_{cap} – ток в конденсаторной сборке пассивного корректора коэффициента мощности, А.

Требуемая емкость конденсатора C_1 (рис. 3)[6], мкФ

$$C_1 \leq \frac{\sqrt{3} \cdot I_{cap}}{2 \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot U_L}, \quad (4)$$

где f_{grid} – частота сети трехфазного переменного тока, Гц;

K_C – добавочный коэффициент, выбирается разработчиком для определения необходимого $\cos \varphi$ согласно ГОСТ Р 54073–2017. Добавочный коэффициент будет равен 1, если первоначальный расчет удовлетворяет требованиям.

Расчетная реактивная мощность конденсаторной сборки сети пассивного корректора коэффициента мощности сети трехфазного переменного тока с учетом индуктивности [11], вар

$$Q_c = \frac{C_1 \cdot 3 \cdot U_L^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{grid}}{1 - p}, \quad (5)$$

где p – коэффициент пульсации сети [12].

Когда АИН, подключенный к сети, работает в установившемся режиме, значение индуктивности фильтра L_1 должно соответствовать задаче выходной мощности инвертора [13], мкГн.

$$L_1 = \left(\frac{\sqrt{\sqrt{6} \cdot U_L^2 - U_p^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot I} \right) \cdot 0,5, \quad (6)$$

где L_1 – первичная индуктивность корректора коэффициента мощности, мкГн,

U_p – максимальное среднее квадратичное фазное напряжение в фазе сети трехфазного переменного тока, В, [12].

$$L_2 = \frac{L_1}{K_L}, \quad (7)$$

где L_2 – вторичная индуктивность корректора коэффициента мощности, мкГн,

K_L – добавочный коэффициент, выбирается разработчиком для определения необходимого $\cos \varphi$ в соответствии с ГОСТ Р 54073–2017. Добавочный коэффициент будет равен 1, если первоначальный расчет удовлетворяет требованиям;

L_2 – вторичная индуктивность корректора коэффициента мощности, мкГн;

$$\cos \varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_L - Q_c}{P} \right)^2}. \quad (8)$$

Пример расчета пассивного корректора коэффициента мощности

Исходные расчетные данные приведены в таблице 2.

Расчет активной мощности, потребляемой из сети трехфазного переменного тока, проводится по формуле (2):

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 65 \cdot 0,8 = 11390 \text{ Вт.}$$

Расчет реактивной мощности, потребляемой из сети трехфазного переменного тока, проводится по формуле (1):

$$Q = P \cdot (\tan \varphi_{actual} - \tan \varphi_{target}) = 11390 \cdot (0,75 - 0,33) = 4785 \text{ вар.}$$

Расчет тока, протекающего в конденсаторной сборке пассивного корректора коэффициента мощности, проводится по формуле (3):

$$I_{cap} = \frac{Q_{cap}}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{4785}{\sqrt{3} \cdot 115} = 24.$$

Расчет достаточной емкости конденсаторной сборки проводится по формуле (4):

$$C_1 \leq \frac{\left(\frac{\sqrt{3} \cdot I_{cap}}{2 \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot U_L} \right)}{K_C} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3} \cdot 24}{2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 115} \right)}{15} = 11,65.$$

Расчет реактивной мощности конденсаторной сборки сети пассивного корректора коэффициента мощности сети трехфазного переменного тока с учетом индуктивности проводится по формуле (5):

$$Q_c = \frac{C_1 \cdot 3 \cdot U_L^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{grid}}{1 - p} = \frac{2,9 \cdot 3 \cdot 115 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 800}{1 - 0,07} = 6744.$$

Расчет значения первичной индуктивности проводится по формуле (6):

$$L_1 = \left(\frac{\sqrt{\sqrt{6} \cdot U_L^2 - U_p^2}}{2 \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot I} \right) \cdot 0,5 = \frac{\sqrt{\sqrt{6} \cdot 115^2 - 155^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 65} = 173.$$

Расчет значения вторичной индуктивности проводится по формуле (7):

$$L_2 = \frac{L_1}{K_L} = \frac{173}{15} = 23.$$

Расчет проводится по формуле (8):

$$\cos \varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{Q_L - Q_c}{P} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{9922 - 6744}{11390} \right)^2} = 0,969.$$

Таблица 3. Результаты расчета корректора коэффициента мощности

Наименование параметра	Значение
Емкость конденсатора пассивного корректора коэффициента мощности, мкФ	11
Первичная индуктивность корректора коэффициента мощности, мкГн	173
Вторичная индуктивность корректора коэффициента мощности, мкГн	23
$\cos \varphi$	0,969

Результаты расчета параметров корректора коэффициента мощности приведены в таблице 3.

Влияние рассчитанного ККМ было исследовано путем имитационного моделирования в программной среде Proteus 8.1 (рис. 6 и 7). Гармонический состав кривой потребляемого тока с корректором коэффициента мощности и без показан на рис. 8 и 9 соответственно.

Как видно из рис. 6 и 7, введение ККМ позволяет значительно уменьшить амплитуды высших гармоник тока, потребляемого из сети, и обеспечить требуемое значение коэффициента мощности 0,95.

Выводы

1. Приведена методика расчета пассивного ККМ, выполненного по топологии LCL-фильтра.

2. Предложенная методика расчета была опробована при проектировании перспективного военного-транспортного самолета. Эффективность рассчитанного ККМ подтверждена расчетами и результатами имитационного моделирования в программе Proteus.

Литература

1. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Малюгин А.А., Хохлов О.В. Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета // Электроника и электрооборудование транспорта, 2011, № 4, с. 44–49.
2. Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г. Имитационная математическая модель электропривода колеса шасси самолета // ЭЭТ, 2015, № 3, с. 32–37.

3. Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. Полностью электрический самолет // Авиапарома, 2009, № 2, с. 14–17.

4. Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г. Магнитоэлектрические вентильные электродвигатели в электроприводах разработки АО «Электропривод» // ЭЭТ, 2015, № 3, с. 38–41.

5. Волокитина Е.В., Шалагинов В.Ф. Особенности применения постоянных магнитов в вентильных электродвигателях авиационных электроприводов // Электротехника, 2003, № 7, с. 55–60.

6. Копылов И.П., Фрумун В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. – М.: Энергоиздат, 1986. – 166 с.

7. Жуков В.П., Нестерин В.А. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5ДВМ // Электротехника, 2000, № 6, с. 19–21.

8. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко, В.В. Путников. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.

9. El-Habrouk M., Darwish M.K. and Mehta P. Active power filters: a review. Electric power applications, IEE Proc. Vol. 147, Issue 5, 2000, pp. 403–413.

10. LCL Filter design and performance analysis for grid interconnected systems. A. Reznik, M. Godoy Simoes, Ahmed Al-Durra, S.M. Mueyen.

11. Manual of Power factor correction. Peter Riese.

12. ГОСТ Р 54073–2017.

13. Analysis of current ripples to design an LCL filter for grid-connected three-level inverters. Yongchao CHEN, Rui MA, Shifeng CHEN.

Нефедов Борис Алексеевич

Родился в 1992 году. В 2017 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Управление в технических системах». Опыт работы в области разработки авиационных электроприводов – 5 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором 2-й категории АО «Электропривод».

Тебеньков Федор Геннадьевич

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационного электропривода – 12 лет. В настоящее время работает начальником конструкторского отдела АО «Электропривод». Имеет 7 научных работ.

Nefedov Boris

Was born in 1992. In 2017 he graduated from Vyatka State University with a degree in Management in Technical Systems. Work experience in the field of development of aviation electric drives is 5 years. At present he works as a category 2 design engineer of JSC "Electric Drive".

Tebenkov Fedor

Was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University, specialization is "Electromechanics". Experience in the field of aviation electric drive – 12 years. At present he is working as the head of the design department in JSC "Electroprivod". He is the author of 7 scientific works.

Электромагнитная муфта торможения с комбинированной парой трения

// Electromagnetic brake clutch with combined friction pair //

Власов А. И., к.т.н., Никитин В. В., Коротков И. В.,
АО «Электропривод», Киров

Коньшев Д. В.,
АО НПК «ТехМаш», Москва

В статье представлены результаты разработки электромагнитной муфты торможения с комбинированной парой трения на основе материала титан. В конструкции электромагнитной муфты торможения решена известная проблема материала титан к контактно-му схватыванию при трении. **Ключевые слова:** электромеханическое тормозное устройство, момент трения, титан, комбинированная пара трения.

In this paper presents the results of the development of an electromagnetic brake clutch with a combined friction pair based on titanium material. In the design of the electromagnetic brake clutch, the well-known problem of the titanium material to contact setting during friction is solved. **Keywords:** electromechanical braking device, friction moment, titanium, combined friction pair

Ответственную роль в авиационном электроприводе играют устройства точной остановки приводных механизмов, которые позволяют увеличить надежность и безопасность эксплуатации электродвигателей и электромеханизмов, повысить производительность и качество их работы за счет уменьшения времени разгона и остановки, а также фиксации рабочих органов в точке позиционирования [1].

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

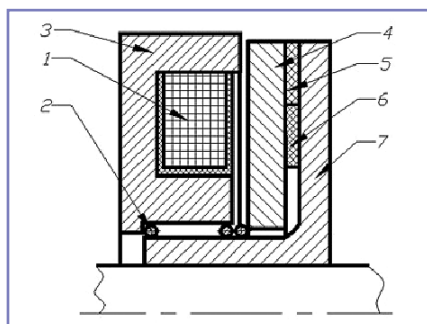


Рис. 1. Конструктивная схема ЭМТ:
1 – обмотка; 2 – противодействующая пружина; 3 – корпус муфты;
4 – подвижный ярлык; 5 – первый диск тормозной пары; 6 – второй диск тормозной пары; 7 – тормозной диск

Широкое распространение ЭМТ объясняется тем, что известные способы электрического торможения механизмов с электроприводом в устройствах точной остановки и фиксации неприемлемы, так как только механическое торможение является единственным способом остановки электродвигателя после прекращения подачи электроэнергии и удержания его вала в заторможенном состоянии [1].

Основные требования, предъявляемые к ЭМТ:

- максимальный тормозной момент при минимальной массе;
- максимальное быстродействие;
- надежность;
- минимальные габариты;
- максимальное количество включений.

Момент торможения ЭМТ определяется по формуле

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

где N – число пружин;

μ – коэффициент трения;

$R_{тр}$ – радиус трения;

$F_{ном}$ – номинальное усилие пружин.

Исходя из формулы (1), для обеспечения максимального момента ЭМТ необходимо:

- увеличивать усилие пружин $F_{ном}$, что ограничивается допустимым удельным усилием на материал пары трения при постоянстве размеров;
- увеличивать число пружин N , что в авиационных электродвигателях ограничивается допустимыми габаритами;
- увеличить радиус трения $R_{тр}$, что также в комплексе ограничивается как допустимым удельным усилием на материал пары трения, так и ограниченными габаритными размерами ЭМТ;
- увеличить коэффициент трения μ .

Еще одним способом увеличения момента торможения является увеличение количества пар трения. Такой способ широко используется в сервоприводах компании SEW-Euridrive [3] (рис. 2).

Недостатком таких ЭМТ по сравнению с классической конструкцией является их сложность при изготовлении и худшая работа при вибрациях, характерных для авиационных электродвигателей.

Таким образом, для обеспечения максимального тормозного момента ЭМТ необходимо увеличивать коэффициент трения μ ,

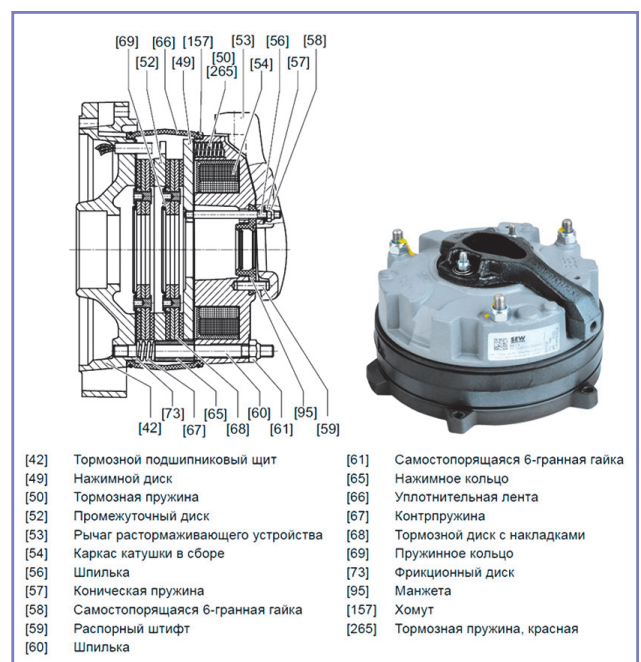


Рис. 2. Двухдисковый тормоз BMG компании SEW-EURODRIVE

Таблица 1. Значения коэффициентов трения

Пара трения	Сталь – сталь	Титан – титан	Сталь – ТФМ	Сталь – титан	ТФМ – бронзографит	Сталь – металлокерамика
Коэффициент трения	≈0,15	≈0,41	≈0,3	≈0,3	≈0,3	≈0,3

который зависит от примененного материала тормозной пары.

Следовательно, для получения максимального тормозного момента ЭМТ оптимальным материалом тормозной пары будет материал с максимальным коэффициентом трения μ .

Коэффициенты трения различных фрикционных материалов (опытные данные АО «Электропривод») представлены в таблице 1.

В авиационных электродвигателях наиболее широко применяемыми парами трения являются сталь – сталь, сталь – ТФМ, сталь – металлокерамика, ТФМ – бронзографит, сталь – титан. Пара с наиболее высоким коэффициентом и, соответственно, моментом трения – титан – титан.

Негативной особенностью титана и его сплавов является высокая склонность к контактному схватыванию при трении, что приводит к опасной работе узла, снижению надежности и повышенному износу.

Появление начала схватывания на трущихся поверхностях зависит от многих факторов, таких как удельная нагрузка, скорость трения, величина относительного перемещения и его характер, шероховатость поверхности, окружающая среда и т.п. При прочих равных условиях значение удельной нагрузки схватывания сильно зависит от величины пути взаимного перемещения трущихся поверхностей, уменьшаясь с увеличением пути трения L . Так, например, при сухом трении на воздухе и перемещении в пределах 1–2 мм со скоростью 0,1 м/с нагрузка схватывания составляет 2000 кгс/см²; при $L = 565$ мм нагрузка схватывания равна 60 кгс/см²; а при $L = 10 \div 15$ м она составляет всего 5–12 кгс/см². Это указывает на необходимость для реальных узлов трения ЭМТ регламентировать допустимые параметры трения в зависимости от условий работы узла [4].

С целью повышения надежности, исключения схватывания, обеспечения заданного

числа циклов при высоком удельном моменте трения в ЭМТ разработанного АО «Электропривод» электродвигателя специального назначения ДП100–500–2,5 (рис. 3) была применена комбинированная пара трения (состоящая из внешней и внутренней пары трения) на основе титана.

Материалы и размеры дисков пары подобраны из условия, что произведение коэффициентов трения каждой тормозной пары на соответствующие средние радиусы торможения остаются постоянными. При этом обеспечивается равномерная нагруженность фрикционных пар по радиусу за счет компенсации увеличения скорости скольжения фрикционных пар на периферии дисков.

$$f \cdot R_{cp} = const, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения тормозной пары; R_{cp} – средний радиус тормозной пары.

Диски внутренней тормозной пары выполнены из материала с более высоким коэффициентом трения (титан – титан), чем диски внешней тормозной пары (сталь – сталь), одновременно диски внешней тормозной пары выполнены из материала с более высоким коэффициентом трения покоя, чем диски внутренней тормозной пары.

Как известно [4], для количественной оценки трения вводится понятие силы трения (T). Сила трения представляет собой равнодействующую сил тангенциальных сопротивлений, возникающих на реальных пятнах контакта при скольжении одного тела по поверхности другого.

При переходе от покоя к скольжению имеется участок предварительного смещения (участок АО, рис. 4).

Полная сила трения покоя соответствует переходу от предварительного смещения к скольжению (точка А). Ее условно называют трением покоя. После предварительного

смещения начинается устойчивое скольжение, характеризуемое силой трения скольжения (линия А₁В).

В первоначальный момент времени срабатывания ЭМТ основной момент торможения создается внешними тормозными дисками, так как коэффициент трения покоя внешних тормозных дисков больше, чем коэффициент трения покоя внутренних тормозных дисков.

При достижении точки срыва А внешние тормозные диски переходят в режим трения скольжения, а внутренние резко и скачкообразно переключаются с режима предварительного смещения в режим скольжения за счет накопленной внешними тормозными дисками потенциальной энергии в режиме предварительного смещения, что сокращает величину предварительного смещения и ускоряет срыв пары титан – титан внутренней тормозной пары в режим скольжения, а в конечном итоге уменьшает опасность контактного схватывания пары титан – титан.

Поскольку коэффициент трения скольжения внутренней тормозной пары выше, чем коэффициент трения скольжения внешней тормозной пары, остаточная энергия вала электродвигателя гасится внутренней тормозной парой, то есть внешняя тормозная пара играет роль своеобразного демпфера для внутренней тормозной пары.

Конструкция электродвигателя ДП100–500–2,5 с ЭМТ показана на рис. 5.

ЭМТ двигателя содержит корпус, магнитопровод 1, катушку 2, якорь 3 с тормозными дисками 4 и 5. Якорь 3 подпружинен пружиной 6. На корпусе магнитопровода 1 установлены тормозные диски 7 и 8. Внешнюю тормозную пару составляют тормозные диски 4 и 8 из стали 10, а внутреннюю – тормозные диски 5 и 7, выполненные из титанового сплава ВТЗ–1.

ЭМТ работает следующим образом. В обесточенном состоянии ЭМТ не заторможена, пружина 6 отжимает якорь 3, и вал электродвигателя 9 свободно вращается.



Рис. 3. Электродвигатель специального назначения с комбинированной парой трения

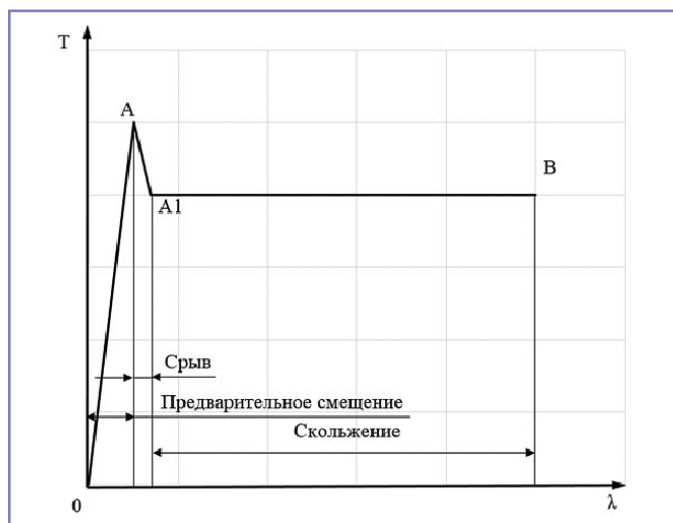


Рис. 4. Сила трения

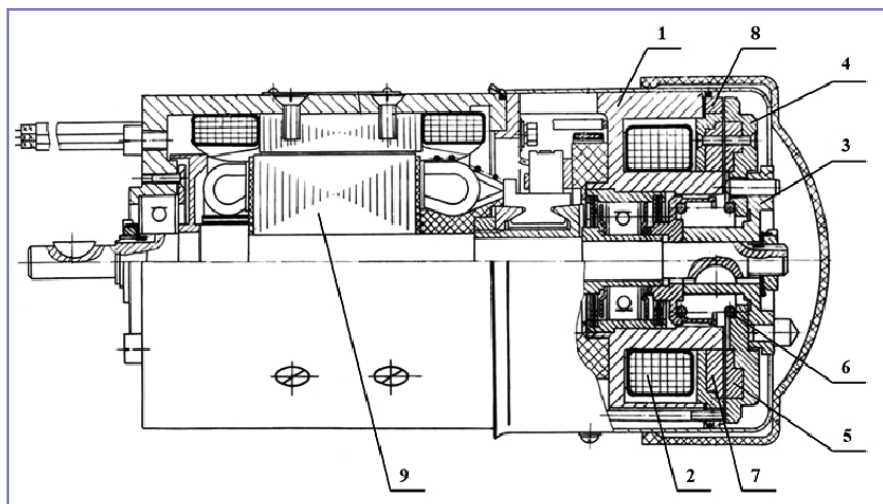


Рис. 5. Конструкция электродвигателя ДП100-500-2,5

В режиме торможения, при наборе частоты вращения, за счет самоиндукции электродвигателя в его обмотках наводится электродвижущая сила, которой достаточно для питания катушки 2, и якорь 3, сжимая пружину 6, притягивается к тормозным дискам 7 и 8. Вал электродвигателя 9 затормаживается. Его растормаживание происходит в силу падения величины наведенной электродвижущей силы с последующим набором частоты вращения и, соответственно, увеличением электродвижущей силы, повторением циклов торможения и раскрутки вала электродвигателя 9 на протяжении рабочего хода.

В результате испытаний на гарантийную наработку электродвигатель ДП100-500-2,5 безотказно отработал 2 000 000 включений, максимальный износ дисков ЭМТ составил 0,4 мм.

Применение комбинированной титановой пары в электродвигателе ДП100-500-2,5 позволило увеличить (без увеличения размеров) средний момент торможения до 23,5 Н·м, что в 1,12 раза выше момента торможения функционального аналога электродвигателя Д-500МФ-3 с парой трения сталь – сталь.

Технический уровень разработанной ЭМТ с комбинированной парой трения подтвержден патентом RU2662270 C2.

Выводы

Разработана ЭМТ с комбинированной парой трения на основе титана, которая применена в электродвигателе специального назначения ДП100-500-2,5. В конструкции ЭМТ решена известная проблема материала титан к контактному схватыванию при трении.

Предложенное техническое решение ЭМТ может применяться в электродвигателях различных отраслей промышленности, таких как автомобильная, судостроение, авиационная и т.д.

Литература

1. Бочкарев И. В. Быстродействующие электромеханические 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 электромеханических тормозных устройств / Власов А. И., Волокитина Е. В., Никитин В. В. // Электроника и электрооборудование транспорта, 2010, № 2–3, с. 45–48.
3. Двухдисковый тормоз ВМГ.. Т SEW Eurodrive для приводов сценических механизмов. Инструкция по эксплуатации.
4. Патент РФ № RU2662270 C2. Электромагнитная муфта-тормоз для электродвигателя привода стержней атомного реактора / Коротков И. В., Конышев Д. В. // Опулб. 25.07.2018.

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Никитин Владимир Владимирович

Родился в 1980 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает начальником расчетного бюро АО «Электропривод». Имеет 20 научных публикаций.

Коротков Илья Владимирович

Родился в 1955 году. В 1980 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационного электропривода – 38 лет. В настоящее время работает начальником бюро патентования, информации и защиты интеллектуальной собственности АО «Электропривод». Имеет 10 научных публикаций.

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 по специальности «Экономика и управление на промышленном предприятии». Опыт работы в области авиационного электропривода – 18 лет. В настоящее время работает директором по цифровой трансформации АО НПК «ТехМаш». Имеет 8 научных публикаций.

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in “Electric engineering”. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic “Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft”. Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director-chief designer of Electroprivod OJSC. He has 41 scientific publications.

Nikitin Vladimir

Was born in 1980. In 2002 he graduated from Vyatka State University with a degree in Electromechanics. Work experience in the field of aircraft electrical machines is 17 years. At present he works as the head of the settlement bureau of JSC “Electric Drive”. Has 20 scientific publications.

Korotkov Ilya

Was born in 1955. In 1980 he graduated from the Kirov Polytechnic Institute with a degree in Electromechanics. Work experience in the field of aviation electric drive is 38 years. At present he works as the head of the Bureau of Patent, Information and Intellectual Property Protection of JSC “Electric Drive”. He has 10 scientific publications.

Konyshev Dmitry

Was born in 1977. He graduated from Vyatka State Agricultural Academy with a degree in Agricultural Mechanization (1999) and Vyatka State University with a degree in Economics and Management at an Industrial Enterprise (2003). Experience in the field of aircraft electric drive is 18 years. At present he works as the director of digital transformation of JSC NPK TechMash. He has 8 scientific publications.

Особенности разработки малогабаритного электромагнита для электроблокиратора дверей фюзеляжа среднемагистрального самолета нового поколения

// Features development of compact electromagnet for electromagnetic locking device for a new generation Medium-haul aircraft fuselage doors //

Рубцова Л. А., Малюгин А. А., Печенкина Н. А., Киселев Р. В.,
АО «Электропривод», Киров

В статье рассмотрена конструкция электромагнита постоянного тока втяжного типа, а также приведены основные рекомендации к расчету. Ключевые слова: электромагнит постоянного тока, полевая модель, магнитная система.

In this article describes the design of a DC electromagnet retractable type, and provides key recommendations to the calculation.

Keywords: DC electromagnet, field model, magnetic system.

В летательных аппаратах в качестве привода исполнительных механизмов, имеющих относительно малый ход и не требующих преодоления больших противодействующих усилий, широкое применение находят электромагниты постоянного тока.

По характеру перемещения якоря электромагниты бывают втяжными, поворотными, притяжными [1].

Наибольшее распространение в качестве силовых получили втяжные электромагниты, основным назначением которых является совершение работы на протяжении определенного пути, приводя при этом в движение рабочие органы различных механизмов.

В общем виде электромагнит состоит из следующих основных частей:

- катушки с намагничивающей обмоткой;
- неподвижной части магнитопровода – полюса;
- подвижной части магнитопровода – якоря;
- противодействующего элемента – пружины, служащей для возврата якоря в исходное положение.

При проектировании электромагнитов авиационного назначения особое внимание необходимо уделить массогабаритным показателям, для чего руководствуются целесообразностью выбора размеров основных частей электромагнита. В первую очередь это относится к размерам полюса и якоря, а также к форме воздушного зазора между ними, так как они главным образом определяют размер обмотки электромагнита.

Также спецификой авиационной техники является обеспечение параметров в широком диапазоне питающего напряжения.

Основной параметр электромагнита – это тяговая характеристика, являющаяся зависимостью усилия электромагнита от

рабочего воздушного зазора. В зависимости от требуемых характеристик и режима работы электромагнита выбирается наиболее рациональная форма воздушного зазора, обеспечивающего возможность получения электромагнита минимальных размеров и массы для заданных условий работы.

Выбор наиболее рациональной формы воздушного зазора (плоская, конусная, усеченно-конусная), обеспечивающей возможность получения электромагнита минимальных размеров и массы для заданных условий работы, определяется конструктивным фактором электромагнита [2]

$$k = \frac{\sqrt{F_H}}{\delta_H},$$

где F_H – начальное тяговое усилие электромагнита, кг; δ_H – величина начального воздушного зазора, см.

Одной из последних разработок АО «Электропривод» является электромагнитный блокиратор дверей фюзеляжа среднемагистрального самолета нового поколения, работающий в двух режимах: в режиме включения и в режиме удержания. Целью данной разработки является создание аналога импортного электроблокиратора фирмы Ratier-Figeas для его последующей замены. Основными требованиями к электроблокиратору, помимо создаваемого тягового усилия, являлись масса, габаритные размеры и потребляемый ток.

Электроблокиратор состоит из электромагнита с возвратной пружиной, резистора, электрического соединителя и штока с элементами крепления к объекту управления. Электромагнит относится к группе нейтральных электромагнитов постоянного тока, рабочий магнитный поток в которых создается с помощью обмотки. Действие электромагнита зависит только от величины магнитного потока и не зависит от его

направления, а следовательно, и от направления тока в обмотке электромагнита [3].

Включение электроблокиратора осуществляется путем подачи напряжения питания на обмотку электромагнита, после чего системой управления общесамолетным оборудованием электроблокиратор переводится в режим удержания. Режим удержания обеспечивается путем включения последовательно с обмоткой резистора, при этом происходит снижение потребляемого тока.

Электромагнит, входящий в состав электроблокиратора, разработан с применением конструктивных решений, основных материалов и покрытий, отработанных на изделии-аналоге [4].

Внешний вид электроблокиратора показан на рис. 1.

Якорь под действием электромагнитных сил перемещается вдоль внутренней поверхности втулки, имеющей немагнитную вставку, и обеспечивает перемещение штока на заданный ход. Пружина обеспечивает возврат якоря и штока в исходное положение после снятия напряжения питания.

Особенностью разработанного электромагнита является наличие режима удержания при сниженном потребляемом токе за счет включения в цепь обмотки резистора. Таким образом, при проектировании электромагнита необходимо учитывать снижение МДС катушки в режиме удержания, которая определяется по формуле

$$F = I \cdot W,$$

где I – ток, протекающий в катушке, А; W – число витков катушки.

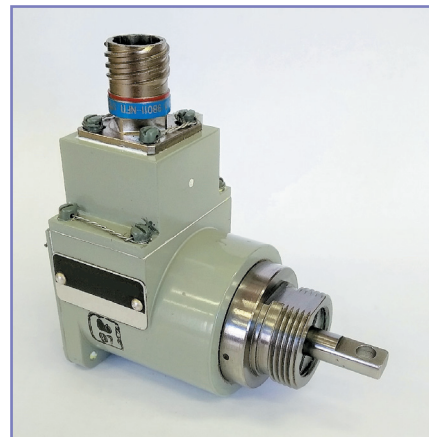


Рис. 1. Внешний вид электроблокиратора

В процессе проектирования первым вариантом электромагнита стал электромагнит с классической конусной конфигурацией воздушного зазора. Как показали исследования [5], угол конуса влияет на крутизну тяговой характеристики – чем меньше угол, тем больше тяговое усилие электромагнита в начале хода штока и меньше в конце хода штока. В связи с этим для изготовления первого варианта был спроектирован электромагнит с коническим воздушным зазором, с углом конуса 50°. Угол конуса был определен путем аналитического расчета и математического моделирования и учитывает снижение МДС катушки в режиме удержания, обеспечивая требуемую крутизну тяговой характеристики электромагнита.

Расчет электромагнита был выполнен по методике, разработанной

АО «Электропривод», а также с помощью моделирования методом конечных элементов в программе Elcut, путем решения нелинейной задачи магнитостатики с осесимметричной моделью. Магнитная система и картина магнитного поля электромагнита показана на рис. 2.

По результатам расчета был изготовлен макетный образец электромагнита, удовлетворяющий требованиям по создаваемому усилию, потребляемому току, но превышающий допустимую массу.

На рис. 3 показан внешний вид макетного образца электромагнита и процесс определения его тяговой характеристики.

Результаты расчетов и эксперимента показаны на рис. 4 и 5.

Для снижения массы электромагнита было принято решение изменить

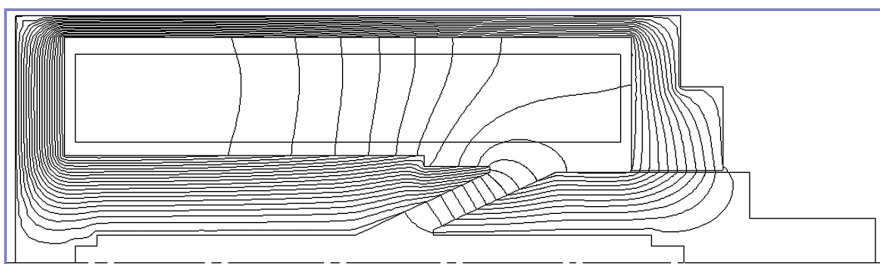


Рис. 2. Картина магнитного поля электромагнита

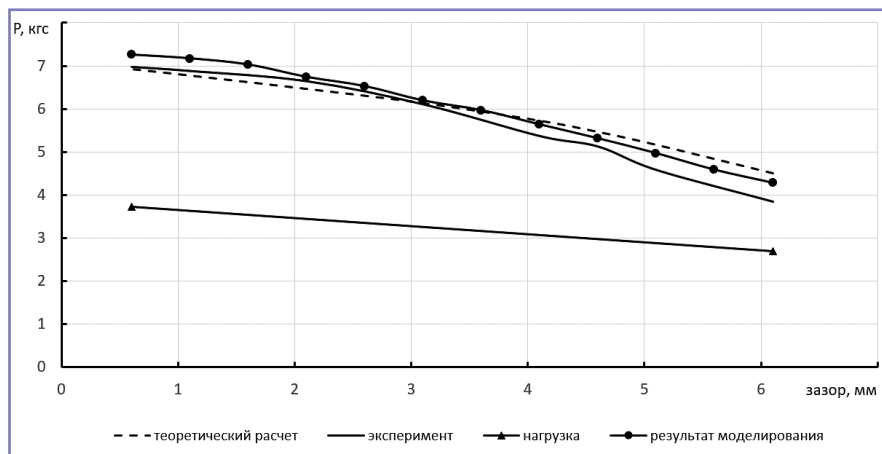


Рис. 4. Тяговые характеристики макетного образца электромагнита

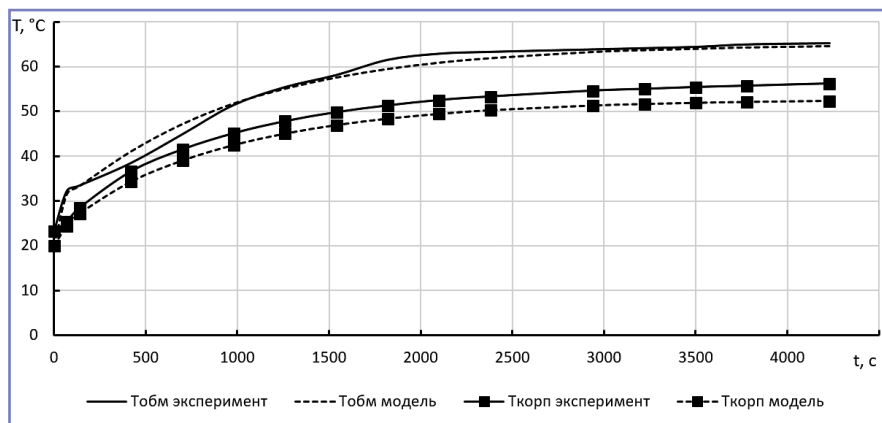


Рис. 5. Зависимость температуры нагрева макетного образца электромагнита от времени

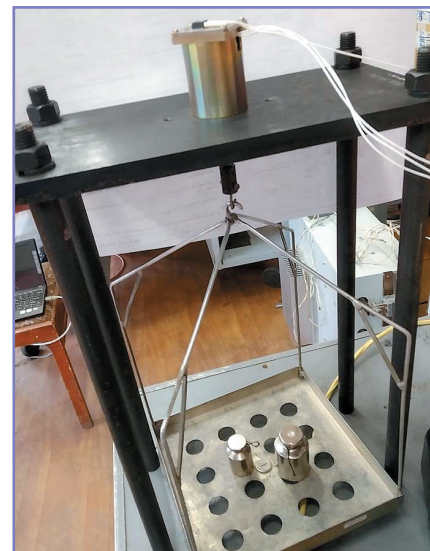


Рис. 3. Внешний вид макетного образца электромагнита

обмоточные данные, применив вместо провода ПЭТ-155 0,4 провод ПЭТ-имид 0,38. Это позволяет снизить объем катушки и дополнительно снизить массу магнитопровода. Однако при уменьшении сечения провода снижается МДС катушки, что приводит к снижению тягового усилия электромагнита.

Для увеличения тягового усилия в начале хода штока необходимо уменьшить угол конуса [5], что приведет к снижению тягового усилия в конце хода штока и, соответственно, к уменьшению усилия в режиме удержания. С целью увеличения тягового усилия в начале хода штока и обеспечения необходимого усилия удержания была изменена конфигурация воздушного зазора с конусной на усеченно-конусную (рис. 6).

Сравнительный анализ характеристик макетного образца электромагнита, полученных расчетным и экспериментальным путем (рис. 4, 5), позволяет сделать вывод о корректности методики расчета и метода моделирования, что дает возможность при выборе окончательной конфигурации электромагнита сократить расходы на изготовление макета.

Таким образом, определение окончательной конфигурации рабочего воздушного зазора электромагнита проводилось с помощью моделирования методом конечных элементов в программе Elcut. Окончательная конфигурация магнитной системы и картина магнитного поля электромагнита показана на рис. 7. Результаты моделирования электромагнита показаны на рис. 8 и 9.

Окончательные характеристики опытного образца электроблокиратора, полученные методом математического моделирования, и их сравнение с характеристиками макетного образца приведены в таблице 1.

В ходе работы по созданию электроблокиратора дверей фюзеляжа самолета с целью импортозамещения был разработан

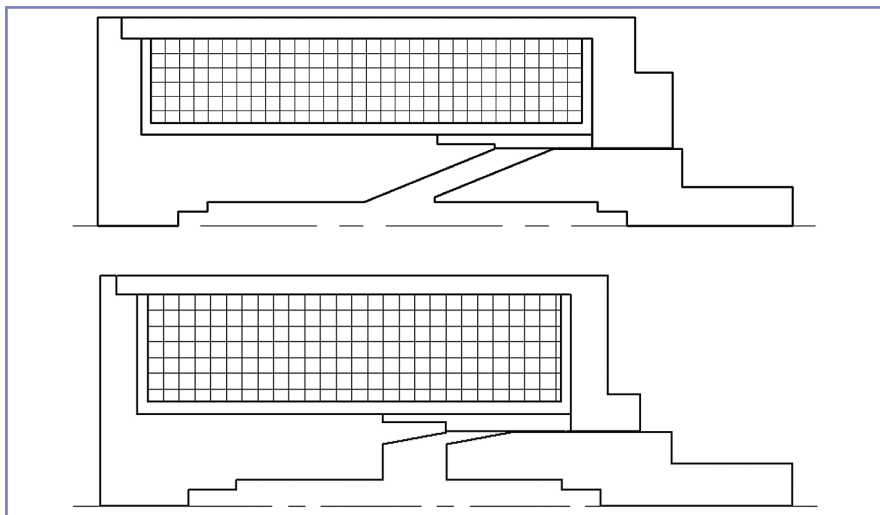


Рис. 6. Переход с конусной конфигурации воздушного зазора на усеченно-конусную

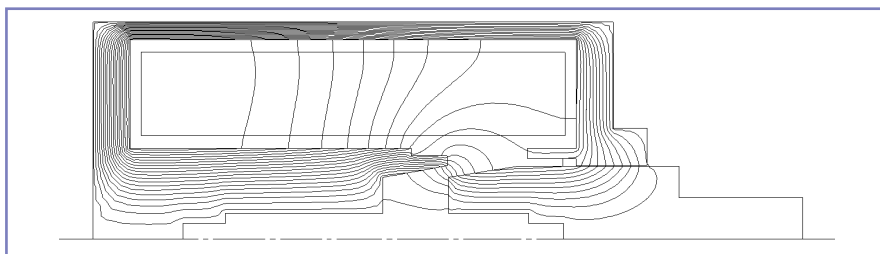


Рис. 7. Картина магнитного поля электромагнита

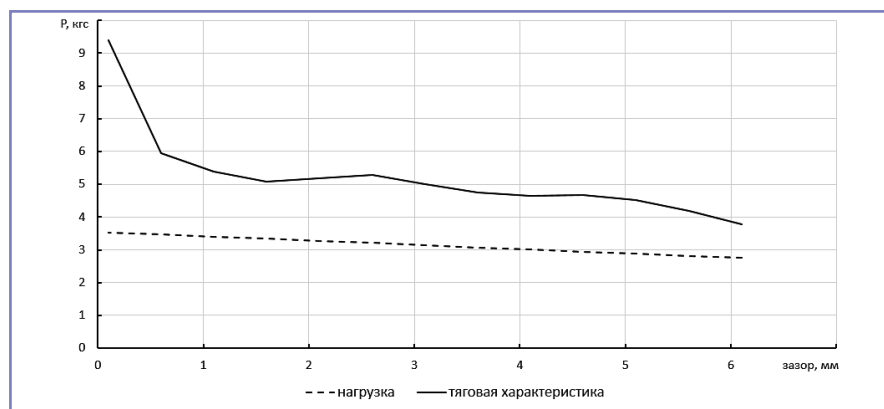


Рис. 8. Тяговые характеристики электромагнита

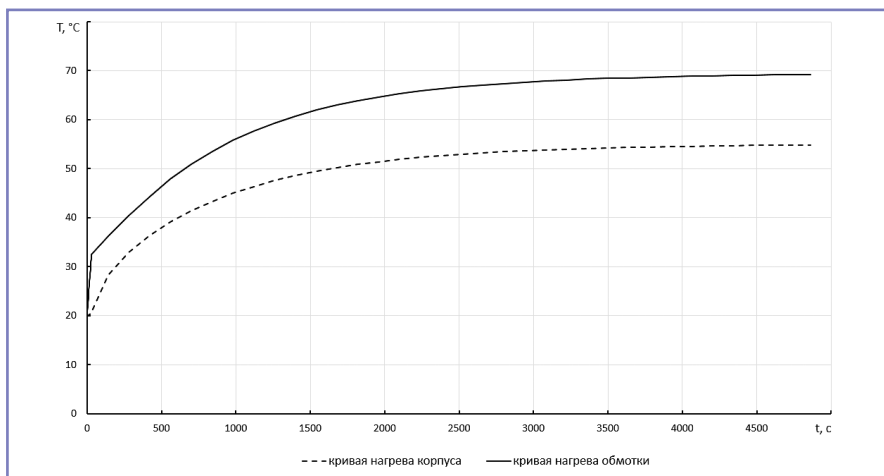


Рис. 9. Зависимость температуры нагрева опытного образца электромагнита от времени

макетный образец электромагнита и проведены его исследования, в результате была зафиксирована масса изделия, превышающая допустимое значение. Изменение конфигурации воздушного зазора электромагнита, входящего в состав электроблокиратора, позволило снизить массу, обеспечив требуемое тяговое усилие.

Таким образом, было разработано изделие с требуемыми техническими и массогабаритными показателями.

Литература

1. Сапиро Д. Н. Авиационные аппараты и механизмы. – М.: Оборонгиз, 1962. – 360 с.
2. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. – Госэнергоиздат, 1960. – 447 с.
3. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
4. Рубцова Л. А., Волокитина Е. В., Печенкина Н. А., Опалев Ю. Г. Слаботочный электромагнит для управления заслонкой в составе воздушного стартера авиадвигателя // Электроника и электрооборудование транспорта, 2007, № 3, с. 11–13.
5. Рубцова Л. А., Малюгин А. А., Печенкина Н. А., Киселев Р. В. Особенности разработки малогабаритного слаботочного электромагнита с повышенным быстродействием для замка реверсивного устройства // Электроника и электрооборудование транспорта, 2015, № 3, с. 25–27.

Рубцова Людмила Александровна

Родилась в 1952 году. В 1975 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». Опыт работы в области разработки систем и блоков управления запуском авиадвигателей, следящих электроприводов, электромагнитов – 44 года. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Заслуженный конструктор Российской Федерации, имеет 5 научных публикаций.

Малюгин Антон Александрович

Родился в 1985 году. В 2008 году окончил ВятГУ по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 12 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории АО «Электропривод». Имеет 3 научные публикации.

Киселев Роман Владимирович

Родился в 1987 году. В 2011 году окончил ВятГУ по специальности «Электрические станции». Опыт работы в области электрических машин – 13 лет. В настоящее время работает инженером I категории экспериментально-исследовательского отдела АО «Электропривод».

Печенкина Надежда Андреевна

Родилась в 1953 году. В 1976 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электрические машины

Таблица 1. Сравнительные характеристики электроблокиратора

Наименование параметра	Значение параметра		
	Технические требования	Макетный образец	Опытный образец
Номинальное напряжение питания, В	28	28	
Минимальное напряжение питания, В	20,5	20,5	
Ход штока, мм	6 + 0,6	6,12	6,1
Потребляемый ток в режиме включения, А	не более 1,2	1,13	1,17
Потребляемый ток в режиме удержания, А	не более 0,65	0,49	0,48
Усилие, создаваемое электроблокиратором в начале хода штока, кгс	не менее 2,55	3,7	3,77
Усилие, создаваемое электроблокиратором при аварийном напряжении питания и температуре окружающей среды 70°C в начале хода штока, Н (кгс)	не менее 1,22	2,1	2,21
Масса электроблокиратора, кг	не более 0,7	0,69*	не более 0,66

* масса указана без электрического соединителя

и аппараты». Опыт работы в области проектирования электродвигателей постоянного и переменного тока – 43 года. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории конструкторского отдела АО «Электропривод». Заслуженный конструктор Российской Федерации, имеет 1 патент на промышленный образец.

Rubtsova Lyudmila

Was born in 1952. In 1975 he graduated from the Kirov Polytechnic Institute, specializing in "Automation and Remote Control". 44 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". Honored designer of the Russian Federation, has 5 scientific publications.

Malyugin Anton

Was born in 1985. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in "Electromechanics". He has 12 years of experience in the area of aircraft electrical machines. Currently he works as a design engineer of the 1 grade in JSC "Electroprivod". He has 3 scientific works.

Pechenkina Nadezhda

Was born in 1953. In 1976 she graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specializa-

tion in "Electrical machines and devices". She has 44-year work experience in the area of double-current electric motors' designing. At present she works as 1 degree design-engineer at the design department of JSC "Electroprivod". Honored designer of the Russian Federation, has 1 patent for a design invention.

Kisilyev Roman

Was born in 1987. In 2011 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) with specialization in "Electrical stations". His work experience in the area of electrical cars is 13 years. At present he works as 1 degree engineer at the research department of JSC "Electroprivod".

Результаты исследований по созданию электрического транспорта

// Results of the student team's work on creating electric transport //

Губин И. В., Фоминых А. А., к.т.н.,
Вятский государственный университет, Киров

Шешин А. Д.,
АО «Лепсе»

Опалев Ю. Г.,
АО «Электропривод», Киров

Проблемы современного автотранспорта поднимаются все чаще и чаще. Становится понятно, что вопрос о его замене как никогда актуален в России и в мире. В данной статье описаны методы, которые уже реализуются в нашей стране и будут реализованы в будущем, а именно переход к электротранспорту. На примере проектной деятельности студентов Вятского государственного университета (ВятГУ) были рассмотрены перспективы развития электротранспорта в России. По результатам исследования, проведенного студентами ВятГУ при поддержке ОАО «Электропривод», был создан прототип универсального модуля, который при креплении к раме самоката дает ему электротягу, и сделан вывод о целесообразности использования электротранспорта – как крупногабаритного (трамваи, электропоезда, электроавтомобили), так и малогабаритного (трициклы, электросамокаты и электровелосипеды).

Ключевые слова: электросамокат, мотор-колесо, вентильный электродвигатель постоянного тока.

Из года в год машин становится все больше, тогда как количество и качество дорог не изменяется. Это, как правило, приводит к тому, что даже незначительная по европейским меркам часть автотранспорта может передвигаться без пробок только в ночное время [1].

Стоит отметить и плохое дорожное покрытие. Тут вина не только низкого качества строительных материалов и нарушение технологии, но и самого автотранспорта. Разрушающее воздействие оказывает чрезмерно высокая осевая нагрузка: чем

Problems of modern motor transport are being raised more and more often. It becomes clear that the issue of its replacement is more relevant than ever in Russia and other countries. This article describes methods that are already being implemented in our country and will be implemented in the future. Namely, the transition to electric transport. On the example of project activities of students of Vyatka State University (VyatSU), the prospects for the development of electric transport in Russia were considered. According to the results of a study conducted by students VyatSU with the support of JSC "Elektroprivod", was created a proto-type of a universal module that, when mounting to the frame of the scooter gives him a electric range and made the conclusion about expediency of use of electric transport of large vehicles (trams, electric trains, electric cars) and small (tricycles, segways and e-bikes).

Keywords: electric scooter, motor wheel, brushless DC (BLDC).

она больше, тем быстрее разрушается дорожное полотно.

Нельзя не учитывать влияния автотранспорта на окружающую среду (рис. 1). Плохое техническое состояние машин, выбросы выхлопных газов, низкое качество топлива и даже его испарение – это только часть источников загрязнения окружающей среды, исходящих от автотранспорта. В связи с широким использованием автомобилей именно транспортная среда является крупнейшим источником глобального потепления [2].

В связи с этим поднимается тема о перспективах развития электротранспорта в России. В частности, ведется работа над всероссийской программой развития инфраструктуры для электротранспорта [3], предусматривающей создание необходимых условий для широкомасштабного внедрения всех видов электротранспорта на территории РФ. Программа включает в себя три этапа. На первом (2013–2014 гг.) при использовании научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) был проведен поиск технологических решений и разработана нормативно-правовая база. Второй этап (2014–2015 гг.) включал в себя развертывание зарядной инфраструктуры и внедрение электротранспорта в ключевых районах. Третий этап (2015–2020 гг.) предусматривает его распространение в масштабах всей России.

В настоящее время существует большое разнообразие электрического транспорта, в частности, широко используемые в повседневной жизни трамваи,



Рис. 1. Влияние автотранспорта на окружающую среду

троллейбусы, электропоезда. Более того, все крупные автопроизводители работают над созданием и совершенствованием электрокаров. Однако не стоит уделять внимание малые средства передвижения, а именно электросамокаты и электровелосипеды. Их преимущества очевидны: они не загружают дорожную сеть, не наносят ущерба окружающей среде и доступны по цене.

Основными поставщиками малогабаритного электротранспорта на рынке являются азиатские страны. Анализ, проведенный студенческой междисциплинарной командой в рамках проектной деятельности политехнического института ВятГУ по тематике «Расчет, конструирование и исследование привода электросамоката на базе вентильного двигателя» [4], показывает, что на территории Кировской области есть весь конгломерат предприятий, которые могут составить конкуренцию предприятиям Азии и выпускать конкурентоспособные продукты данной линейки (трициклы, электросамокаты, электровелосипеды и т.д.).

Цель студенческого проекта заключается в проработке возможностей расчета, конструирования и исследования приво-

Таблица 1. Сопоставление результатов (примерный вес человека – 65 кг)

Прототип	Критерий	Xiaomi Mijia 365
8	Запас хода, км	5
100	Максимальная нагрузка, кг	96
15	Максимальная скорость, км/ч	10–25
15 000	Стоимость, руб.	от 20 000

- контроллер;
- мотор-колесо на базе вентильного электродвигателя постоянного тока мощностью 350 Ватт;
- литий-ионная аккумуляторная батарея емкостью 4,4 А·ч.

Впоследствии прототип был оснащен дополнительным съемным аккумулятором. Все компоненты были занесены в корпус, защищающий от пыли и влаги.

Работы по созданию прототипа ведутся при участии АО «Электропривод». Разработанное специалистами предприятия мотор-колесо на базе вентильного электродвигателя постоянного тока соответствует всем заявленным студентами требованиям.

Были проведены испытания электросамокатов и проведено их сопоставление по основным характеристикам с аналогами конкурентов, а именно с электросамокатом Xiaomi Mijia 365. Их сравнение представлено в таблице 1.

Проведя анализ результатов, можно сделать вывод, что прототип, разработанный студентами в ходе проектной деятельности, схож по характеристикам с конкурентами, но имеет более низкую стоимость. К достоинствам также стоит отнести универсальность модуля, так как его можно установить на любую раму самоката. В настоящее время команда проекта работает над созданием зимнего варианта модуля, позволяющего превратить самокат в снегокат.

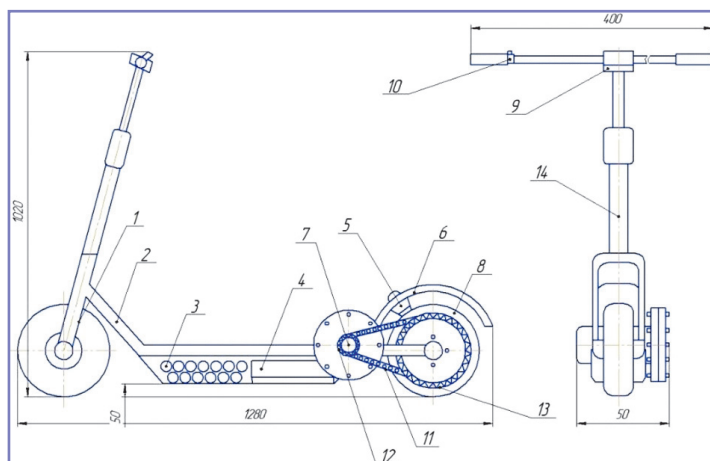


Рис. 2. Первый вариант развития проекта

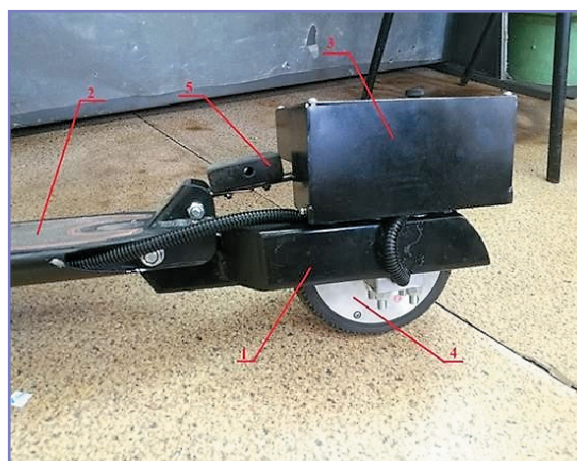


Рис. 3. Второй вариант развития проекта

да электросамоката на базе вентильного двигателя, а также создание действующего прототипа. Было выбрано два пути развития проекта. Первый заключался в использовании цепной/ременной передачи, двигатель и аккумулятор, в свою очередь, располагались на раме самоката (рис. 2). Второй путь развития подразумевал использование мотор-колеса без редуктора (рис. 3). Все компоненты устанавливались в специальный корпус, который мог крепиться к любой раме самоката. За основу был выбран второй вариант ввиду отсутствия переходных механизмов, что увеличивало надежность конструкции.

В процессе работы студентами был создан прототип универсального модуля, установленного на раму самоката (рис. 4). Он состоял из трех основных элементов:



Рис. 4. Прототип универсального модуля

Литература

1. Смирнов С. 8 способов победить пробки // За рулем, 2017. URL: <https://www.zr.ru/content/articles/907199-8-sposobov-pobedit-dorozhnye-z/>(11.03.2020).
2. Сердюкова А.Ф., Барабанщиков Д.А. Влияние автотранспорта на окружающую среду // Молодой ученый, 2018, № 25, с. 31–33.
3. Всероссийская Программа развития инфраструктуры для электротранспорта [Электронный ресурс] / Роман Бердников. Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы, 2013. Режим доступа: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/brn_09042013.pdf (11.03.2020).
4. Шешин А.Д. Расчет, конструирование и исследование привода электросамоката на базе вентильного двигателя: ВКР... магистр: 2019. 69 с.

Губин Илья Вячеславович

Родился в 1995 году. В 2019 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электрические машины и аппараты». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает инженером в Вятском государственном университете.

Шешин Антон Дмитриевич

Родился в 1995 году. В 2019 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электрические машины и аппараты». Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает инженером-конструктором в АО «Лепсе».

Фоминых Антон Анатольевич

Родился в 1995 году. В 2019 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электрические машины и аппараты». Кандидат технических наук. Защитил диссертацию по теме «Улучшение трибохарактеристик узлов скользящего токосъема». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрические машины и аппараты» ВятГУ. Имеет 40 научных публикаций.

Опалев Юрий Геннадьевич

Родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 16 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод», доцентом кафедры «Электрические машины и аппараты» ВятГУ. Имеет 24 научные публикации.

Gubin Ilya

Was born in 1995. In 2019 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electrical Machines and Devices". Work experience is 3 years. At present he works as an engineer at Vyatka State University.

Sheshin Anton

Was born in 1995. In 2019 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electrical Machines and Devices". Work experience is 3 years. At present he works as a design engineer at JSC "Lepse".

Fominykh Anton

Was born in 1995. In 2019 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electrical Machines and Devices". Candidate of Technical Sciences. He defended his thesis on the topic "Improving the tribo-characteristics of sliding current collection units". Work experience is 10. At present he works as the head of the department "Electric machines and devices" of Vyatka State University. He has 40 scientific publications.

Opalev Yuriy

Was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electromechanics". Candidate of Technical Sciences. In 2011 he defended his thesis on the topic "Valve motors for precision high-speed drives of mechatronic process modules." Work experience in the field of aircraft electrical machines is 16 years. At present he works as a leading designer and project manager of JSC "Electric Drive", associate professor of the department "Electric machines and devices" of Vyatka State University. He has 24 scientific publications.

Особенности построения регулятора положения с переменной структурой для автоматизированных приводов систем механизации крыла

// Special aspects of configuration of variable structure position regulator intended for high-lift device's fully automatic electric drive //

Москвин Е. В., Власов А. И., к. т. н.,
АО «Электропривод», Киров

В статье рассматривается синтез регулятора положения с переменной структурой для достижения оптимальных по времени и точности характеристик электропривода для систем механизации крыла.

Ключевые слова: авиационный электропривод, регулятор положения, переменная структура, механизация крыла.

Электрическая энергия используется на летательных аппаратах с момента зарождения авиации. Первым этапом в развитии электрического привода явилось создание в СССР в 1939 году пикирующего бомбардировщика Пе-2, на котором впервые в истории авиации были широко применены дистанционно управляемые силовые электромеханизмы для привода почти всех ответственных органов самолета. Однако техника электрического привода того времени имела существенные недостатки, выражавшиеся в плохой динамичности привода, значительном энергопотреблении, большой массе и низкой надежности. Поэтому в настоящее время в качестве привода почти всех самолетов преимущественно применяется гидравлический привод с электродистанционной системой управления, имеющий высокое быстродействие и хорошие массогабаритные показатели.

Стремление к унификации бортовых источников энергии, снижению массы установленного оборудования, повышению быстродействия и уровня автоматизации систем управления с 70-х годов XX века возродило интерес к силовым электромеханическим приводам. Этому способствовал существенный прогресс в области разработок высокомоментных бесконтактных двигателей постоянного тока с самарий-кобальтовыми магнитами, силовой полупроводниковой техники и цифровой микроэлектроники.

Переход на использование электроприводов для систем управления полетом летательных аппаратов связан с разработкой двух типов автономных приводов с электрическим силовым питанием:

- высокочастотных приводов с большой полосой пропускания (высокой частотой среза, малым фазовым запаздыванием

The article presents synthesis process of the variable structure position regulator, undertaken with the aim to achieving optimal time-domain and accuracy characteristics of high-lift devices electric drive.

Keywords: airborne electric drive, position regulator, variable structure, high-lift devices.

в полосе пропускаемых частот: до 4–5 Гц – для пассажирских самолетов и выше – для боевых маневренных), большой скоростью переключки и малыми нелинейными искажениями при малых амплитудах входного сигнала. Такие приводы используются для отклонения руля высоты, элеронов, руля направления, т.е. для органов управления т.н. первичной системы управления полетом;

- приводов, требования к динамическим характеристикам которых практически незначительны. Такие приводы используются для перемещения предкрылков и/или закрылков, выпуска/уборки шасси и т.п. (для органов вторичной системы управления полетом).

АО «Электропривод» в 80-х годах XX века начало проводить научно-исследовательские работы по созданию автоматизированных авиационных электроприводов с бесконтактными двигателями постоянного тока. При проектировании электроприводов встала задача разработки оптимальных алгоритмов управления, обеспечивающих минимальное потребление энергии, максимальное быстродействие и уменьшающих электрические потери. Одной из задач,

решаемых при проектировании электроприводов, является обеспечение точности позиционирования выходного звена, за которое отвечает регулятор положения.

При синтезе регулятора положения требовалось достижение оптимума времени, необходимого для отработки перемещения и минимума статистической ошибки.

Укрупненная структурная схема контура положения показана на рис. 1.

При рассмотрении контура положения различают:

- малые перемещения, при которых ни один из регуляторов не ограничивается и система работает как линейная;

- средние перемещения, при которых отработка происходит при ограничении выхода регулятора скорости, то есть наступает ограничение на задание тока электродвигателя, но участок работы с постоянной скоростью отсутствует;

- большие перемещения, при отработке которых в течение определенного времени электродвигатель работает на установившейся скорости, определенной ограничителем регулятора положения.

Оптимум времени для отработки средних и малых перемещений обеспечивает такой процесс, при котором скорость меняется по треугольному закону [1]. Это позволяет в полной мере использовать перегрузочную способность электродвигателя (максимальный пусковой ток, ускорение) и исключает перерегулирование по положению. Для обеспечения такого характера отработки требуется формирование переменного коэффициента регулятора положения.

Техническая реализация оптимального по быстродействию управления осуществляется путем придания регулятору положения нелинейных свойств [1].

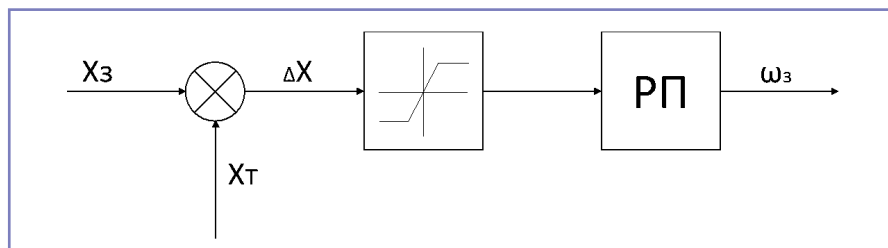


Рис. 1. Структурная схема контура положения:

X_z – заданное значение положения; X_T – текущее значение положения; ΔX – ошибка по положению; ω_z – заданное значение скорости с выхода регулятора положения (РП)

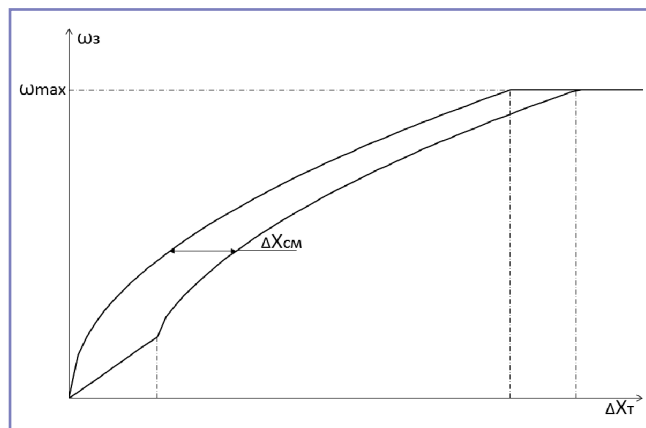
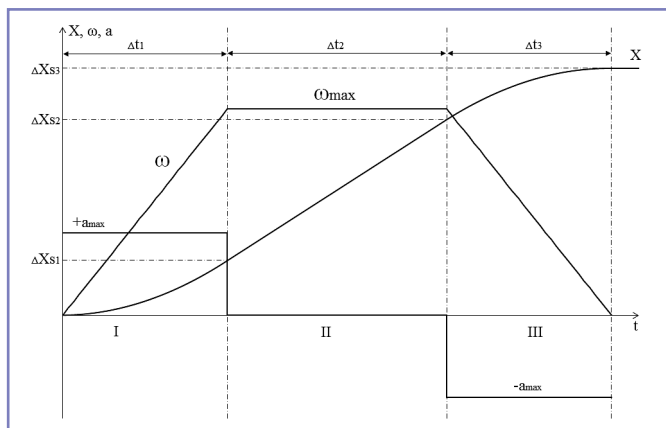


Рис. 2. Характер изменения положения, скорости и ускорения (тока)

Рис. 3. Зависимость частоты вращения от рассогласования

На рис. 2 показан характер изменения положения, скорости и ускорения (тока) при отработке большого перемещения.

Процесс отработки заданного перемещения выходного звена при введении ограничений на скорость ω_{max} и ускорение a_{max} (ограничение тока) при использовании нелинейного регулятора положения разделяется на три этапа.

На первом этапе процесса движения электропривод разгоняется из неподвижного состояния с максимальным ускорением a_{max} до максимальной скорости ω_{max} , при этом текущая скорость и пройденный путь меняются следующим образом:

$$a_1 = a_{max} = const; \quad (1)$$

$$\omega_1 = C_1 \cdot a_{max} \cdot t; \quad (2)$$

$$\Delta X_{S1} = C_1 \cdot C_2 \frac{a_{max} \cdot t^2}{2}, \quad (3)$$

где C_1 – коэффициент передачи электропривода,

C_2 – коэффициент передачи редуктора.

На втором этапе Δt_2 электропривод работает с максимальной угловой скоростью ω_{max} , при этом:

$$a_2 = 0; \quad (4)$$

$$\omega_2 = \omega_{max} = const; \quad (5)$$

$$\Delta X_{S2} = C_2 \cdot \omega_{max} \cdot \Delta t_2. \quad (6)$$

Второй этап регулирования должен закончиться, когда ошибка регулирования положения ΔX_s достигнет величины ΔX_3 , при которой начинается торможение электропривода.

На третьем этапе электропривод с максимальным замедлением устанавливается в положения, соответствующие сигналу управления:

$$a_3 = -a_{max} = const; \quad (7)$$

$$\omega_3 = \omega_{max} - C_1 \cdot a_{max} \cdot t; \quad (8)$$

$$\Delta X_{S3} = C_2 \cdot \omega_{max} \cdot t - C_1 \cdot C_2 \frac{a_{max} \cdot t^2}{2}. \quad (9)$$

Этот этап закончится, когда ошибки по положению и скорости станут равны нулю.

Описанный процесс обработки перемещения является оптимальным по времени [1].

Если на первом и втором этапах желаемый процесс управления – разгон

с максимальным ускорением и перемещение с ω_{max} – реализуются при наличии ограниченной путем введения большого коэффициента усиления в контур положения, то для третьего этапа этого недостаточно, здесь необходимо менять коэффициент регулятора в функции ΔX_3 для обеспечения постоянства замедления a_{max} .

Время, затрачиваемое на третьем этапе,

$$t_3 = \frac{\omega_{max}}{C_1 \cdot a_{max}}, \quad (10)$$

а пройденный путь после исключения времени из уравнения (9)

$$\Delta X_{S3} = \frac{C_2 \cdot \omega_3^2}{2 \cdot C_1 \cdot a_{max}}. \quad (11)$$

Из выражения (11) получается требуемый закон изменения скорости на третьем этапе в функции текущей ошибки положения

$$\omega_3 = \sqrt{2 \cdot \frac{C_1}{C_2} \cdot a_{max} \cdot \Delta X_{S3}}. \quad (12)$$

Для реализации описанного выше регулятора положения с нелинейной характеристикой используется следующий подход.

1. Составляется упрощенная структурная схема электромеханического преобразователя системы и определяются основные коэффициенты передачи.

2. Определяются характеристики разгона и торможения электродвигателя, и по

характеристике торможения – реальное ускорение на участке торможения.

Таким образом, определяются основные исходные величины для реализации регулятора положения в соответствии с выражением (12).

Нелинейная характеристика регулятора положения, построенная в соответствии с выражением (12), показана на рис. 3.

Как видно из выражения (12) и рис. 3, коэффициент регулятора положения при малой величине ΔX становится бесконечно большим, что неизбежно приведет к неустойчивой работе системы.

Для избежания неустойчивой работы начальный участок рабочего графика делается линейным и вводится смещение $\Delta X_{см}$ кривой, то есть торможение начинается раньше и заканчивается, когда регулятор положения линеен.

Его характеристика имеет вид:

$$\omega_3 = K_{РП} \cdot \Delta X_T. \quad (13)$$

Величина смещения подбирается экспериментально.

Таким образом, при принятом подходе получен регулятор положения с переменной структурой, выход которого определен как

$$\begin{cases} \omega_3 = K_{РП} \cdot \Delta X_T & \text{при } \Delta X_T \leq X_1 \\ \omega_3 = K \sqrt{\Delta X_T} & \text{при } X_1 < \Delta X_T \leq X_2. \\ \omega_3 = \omega_{max} & \text{при } X_2 < \Delta X_T \end{cases} \quad (14)$$

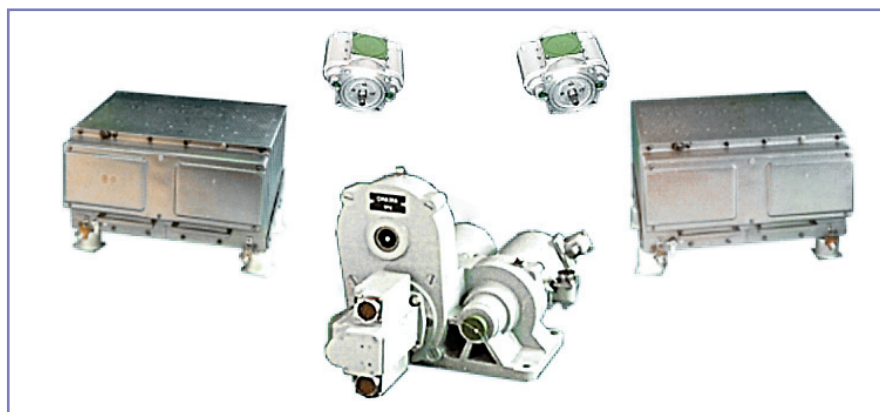


Рис. 4. Электропривод ЭП3-77

Полученный соответствующий функции (14) регулятор положения с переменной структурой лег в основу разработки автоматизированного электропривода ЭПЗ-77 (рис. 4), спроектированного АО «Электропривод» для системы управления механизацией крыла самолета Ан-70. Полученные практические результаты испытаний электропривода ЭПЗ-77 представлены на рис. 5.

Основные технические характеристики ряда автоматизированных приводов для систем механизации крыла отечественных самолетов, разработанных АО «Электропривод» [2], представлены в таблице 1.

Таким образом, по результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- разработан регулятор положения электропривода, обеспечивающий требования по динамическим и позиционным свойствам, предъявляемым к приводам системы управления механизацией крыла;
- разработанный регулятор положения электропривода обеспечивает минимальную статическую ошибку позиционирования;

Таблица 1. Основные технические характеристики автоматизированных приводов для систем механизации крыла

Технические характеристики	ЭПЗ-77 (Ан-70)	ЭПЗ-324 (Ту-324)	ЭППЗ-334 (Ту-334)	ЭППЗ-204 (Ту-204СМ)	СЭПЗ-112 (Ил-112)
Выходная мощность, кВт	8	2,2	2,35	6,4	2,4
Частота вращения, об/мин: – при противодействующей нагрузке; – при помогающей нагрузке	250 250	760 560	610 800	450 780	500 500
Напряжение питания, В: – 3-фазное переменное; – постоянное	115/200, 400 Гц 27	115/200, 400 Гц 27	115/200, 400 Гц 27	115/200, 400 Гц 27	115/200, 360–800 Гц 27
Масса, кг: – суммарная; – электромеханизма; – системы управления	70 26 44	38 9 29	73 16 41	96 20,5 55	37,5 17 20,5

- результаты теоретических исследований подтверждены практической реализацией регулятора положения в составе разработанных и изготовленных АО «Электропривод» автоматизированных приводов для систем механизации крыла на многих типах самолетов.

Литература

1. Лакота Н.А. Основы проектирования следящих систем. – М.: Машиностроение, 1978.– 391 с.
2. Москвин Е.В. Автоматизированные электроприводы для систем управления полетом летательных аппаратов / Е.В. Москвин, А.И. Власов, С.А. Шабалин // Научно-технический семинар «Электропривод: теория, технология, практика и перспективы», Киров, 25 апреля 2018 г. Сборник тезисов докладов.– Киров: АО «Электропривод», 2018. – 117 с.

Москвин Евгений Владимирович

Родился в 1983 году. В 2006 году окончил ВятГУ по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационного электропривода – 14 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора – техническим директором АО «Электропривод».

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил ВятГУ по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Moskvin Evgeny

Was born in 1983. In 2006 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electromechanics". Work experience in the field of aviation electric drive is 14 years. At present he works as deputy general director and technical director of JSC "Electroprivod".

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in "Electric engineering". He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic "Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft". Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director – chief designer of JSC "Electroprivod". He has 41 scientific publications.

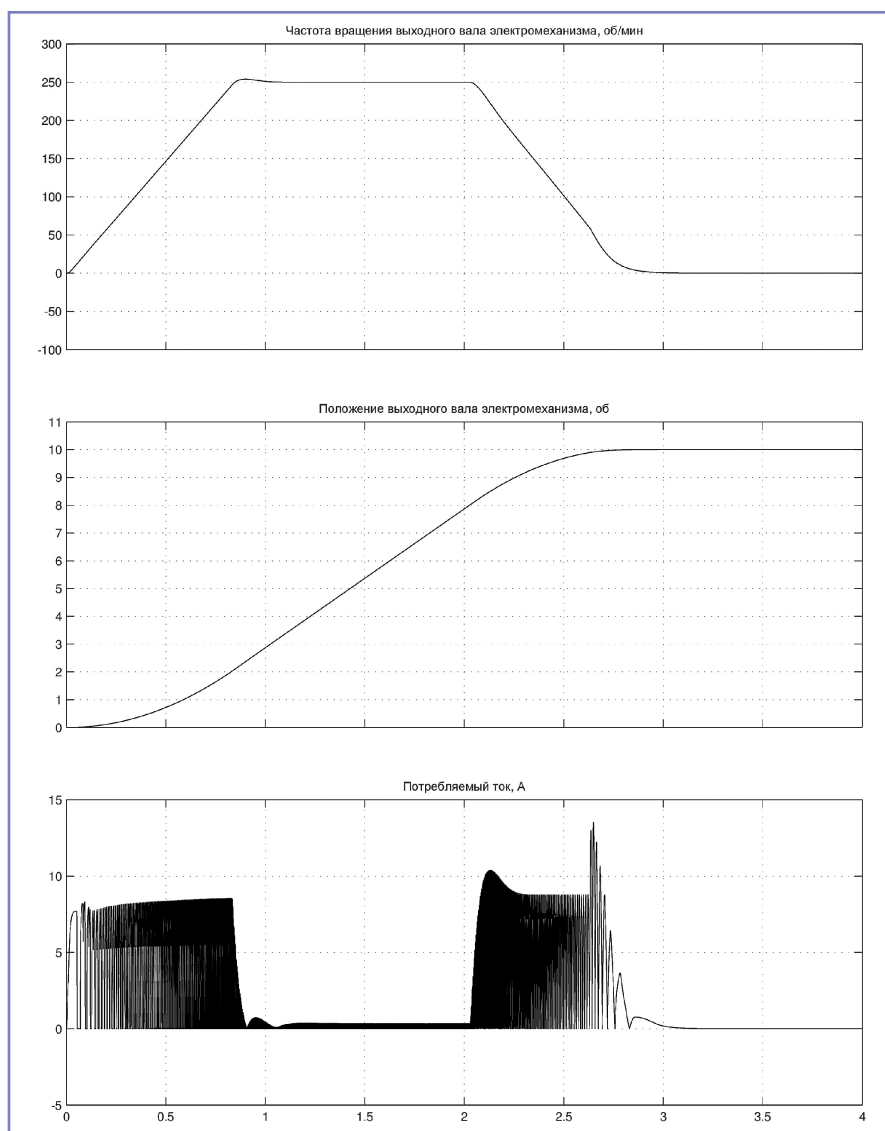


Рис. 5. Обработка заданного положения электроприводом ЭПЗ-77

Отказоустойчивый электрический двигатель для топливных насосов летательных аппаратов

// Fault-tolerant electric motor for aircraft fuel pumps //

Исмагилов Ф. Р., д.т.н., профессор, Вавилов В. Е., к.т.н., доцент,
Каримов Р. Д., к.т.н., Айгузина В. В.,
УГАТУ, Уфа

Власов А. И., к.т.н.,
АО «Электропривод», Киров

В данной работе представлена методика проектирования, которая может быть использована при проектировании отказоустойчивых электрических двигателей. Согласно предложенному алгоритму был рассчитан электродвигатель с постоянными магнитами для топливных насосов летательных аппаратов.

Ключевые слова: отказоустойчивость, электрический двигатель, летательный аппарат.

Ужесточение норм ИКАО по экологическим выбросам летательных аппаратов (ЛА) в окружающую среду и создаваемому шуму, борьба производителей ЛА в условиях жесткой конкуренции за рынок авиаперевозчиков (перед авиапроизводителями ставятся задачи минимизации затрат на эксплуатацию и повышения топливной эффективности ЛА, что обеспечивает авиапроизводителям первенство на авиационном рынке) заставляют авиапроизводителей постепенно отказываться от традиционных технологий при создании ЛА и переходить к реализации концепций более электрического самолета (БЭС) и электрифицированного авиационного двигателя (ЭАД).

Реализация на практике данных концепций невозможна без создания новых электродвигателей (ЭД) с повышенным коэффициентом полезного действия, повышенной мощностью, минимальными массогабаритными показателями, а также с повышенной отказоустойчивостью. Это обусловлено тем, что ЭД в концепции БЭС и ЭАД являются основными элементами, обеспечивающими функционирование всех систем ЛА, в том числе топливных и масляных систем, системы кондиционирования воздуха, а в перспективе ЭД должны обеспечивать привод вентилятора авиационного двигателя [1–3]. Именно подобное использование ЭД уже рассматривается в концепциях E-Fan и E-Thrust [4].

Особенно важным при реализации концепции БЭС и ЭАД является разработка и внедрение ЭД для насосов-дозаторов

This paper presents a design methodology that can be used in the design of fault-tolerant electric motors. According to the proposed algorithm, a permanent-magnet electric motor for aircraft fuel pumps was calculated.

Keywords: fault tolerance, electric motor, aircraft.

(НД) авиационного двигателя. Это позволяет значительно упростить систему управления авиационным двигателем, обеспечить эффективное управление топливоподачей и дозирования топлива в камеру сгорания авиационного двигателя, что обеспечивает значительное повышение топливной эффективности ЛА. В частности, использование ЭД в качестве привода насосов топливных агрегатов в совокупности с другими техническими решениями позволило двигателю UltraFan разработки Rolls-Royce сократить на 75% выбросы CO₂, на 90% выбросы NO_x, на 65% шум авиационного двигателя и на 30% расход топлива.

Основной особенностью для НД ЛА, помимо вышеуказанных, является требование высокой отказоустойчивости используемых для их привода ЭД. Это вызвано тем, что данные насосы являются основным элементом топливоснабжения двигателя, и технический отказ ЭД может привести к серьезным аварийным ситуациям в ЛА. Поэтому к ЭД топливных насосов авиационного двигателя предъявляются особые требования по отказоустойчивости (продолжение эксплуатации ЭД без снижения энергетических характеристик при одном любом отказе и снижение до 20% энергетических характеристик при втором любом отказе).

Исследованиям и разработкам отказоустойчивых ЭД для топливной системы БЭС и ЭАД посвящено множество различных работ. Так, в работе [5] представлен четырехфазный отказоустойчивый ЭД с постоянными

магнитами (ПМ) мощностью 100 кВт для топливного насоса авиационного двигателя, описаны особенности его создания. В [6] решена задача оптимизации потерь для ЭД с ПМ для топливного насоса. В [7] описаны особенности применения индукторного ЭД в топливных насосах ЛА и кратко описаны характеристики используемого ЭД. Важно отметить, что ЭД для топливной системы выполняются обычно топливозаполненными, так как это удобно для технологического монтажа насоса, а также позволяет значительно повысить эффективность отвода потерь от ЭД. Использование индукторного ЭД при заполнении его полостей топливом приведет к значительному увеличению гидравлических потерь, что снижает эффективность топливного насоса.

В данной статье описывается процесс проектирования шестифазного отказоустойчивого ЭД с ПМ и зубцовой обмоткой для НД для концепции ЭАД. Основной акцент в работе сделан на проектирование ЭД для НД, в том числе особенности учета гидравлических потерь, расчета тепловых режимов, при применении топливного охлаждения.

Входными параметрами в предлагаемом многодисциплинарном алгоритме является матрица технических и экономических значений, которая определяет границы проектирования для ЭД и его системы управления. В отличие от известных, в предлагаемом алгоритме проектирование ЭД с ПМ для топливных насосов предлагается выполнять при заданных температурных режимах работы, габаритных размерах и стоимости. Важно отметить, что для определения стоимости ЭД с ПМ необходимо также вводить первоначальную программу выпуска изделий – это позволит уже на стадии проектирования выбрать не только оптимальные геометрические размеры, но и оптимальную технологию изготовления ЭД с ПМ. То есть в предлагаемом алгоритме ЭД проектируется с известным коэффициентом полезного действия и плотностью тока, а также при известной частоте вращения ротора, напряжении питания и заданной стоимостью изделия. Подобный подход позволяет при заданной величине потерь уже на первых этапах проектирования ЭД определять температуру в его элементах. Подобную возможность обеспечивает тот факт, что ЭД выполнен топливозаполненным,

следовательно, система его охлаждения определена и практически не меняется при проектировании и оптимизации. В данной постановке задача проектирования ЭД с ПМ превращается в задачу электромагнитных, механических, гидравлических, экономических и поверочных тепловых расчетов с наложением ограничений на уровень потерь и стоимость элементов.

При вводе основных ограничений при проектировании ЭД необходимо определить степень его отказоустойчивости. Отказоустойчивость достигается введением избыточных элементов в инверторе и в ЭД. Это приводит к удорожанию системы и к увеличению ее массогабаритных размеров. Наиболее эффективным способом обеспечения отказоустойчивости является использование многофазных ЭД.

Первоначальным этапом является ввод исходных данных и ограничений. Шаг 1 – это начальное определение диапазона размеров активной части ЭД с ПМ и выбор материала в условиях поставленных ограничений. На шаге 2 выбираются подшипники. Затем рассчитываются гидравлические потери в полостях ЭД от движения жидкости и анализируется эффективность ЭД (шаг 3). Также на шаге 3 при известной системе охлаждения, плотности тока и геометрических размерах выполняются предварительные тепловые расчеты ЭД с ПМ. В том случае, если гидравлические потери превышают заданные ограничения, то выбранные геометрические размеры должны быть изменены. Если по результатам тепловых расчетов температура узлов ЭД превышает заданные пределы для материалов, то требуется либо корректировка исходных данных, либо выбор новых материалов. При этом необходимо учитывать, что увеличение температурного режима материала приводит к увеличению его стоимости, а в предлагаемом алгоритме стоимость является одним из ограничений при проектировании. Шаг 4 – расчет механической прочности ротора. Этот анализ выполняется с использованием метода конечных элементов. Следующим шагом является электромагнитный расчет, который включает расчет магнитного поля в активных элементах и поверочный расчет электромагнитных потерь. Если полученные потери превышают заданные, необходимо провести корректировку геометрических размеров, свойств материалов и принятых конструктивных решений. Если потери много меньше заданных, необходимо произвести корректировку геометрических размеров и повторно выполнить тепловые расчеты. Электромагнитные расчеты выполняются при условии заданной плотности и величины тока. Ввиду известной плотности тока и геометрических размеров ЭД электромагнитные расчеты сводятся к определению числа витков и индуктивностей обмоток ЭД. Также на стадии электромагнитных расчетов проводится выбор и расчеты топологии инвертора ЭД. Расчеты

Таблица 1. Характеристики шестифазного ЭД с ПМ

Параметры	Значения
Мощность, Вт	15
Скорость вращения, об/мин	6000
Фазное напряжение, В	400
Фазный ток, А	31
Плотность тока, А/мм ²	18,7
Тип постоянных магнитов	Sm_2Co_{17} , $H = 850$ кА/м, $Br = 1.08$ Тл
Материал магнитопровода статора	49К2ФА
Число витков	100
Диаметр провода, мм	1,45
Фазное сопротивление, Ом	0,12643
Число пазов статора	12
Внешний диаметр статора, мм	139
Внутренний диаметр статора, мм	68
Число полюсов ротора	12
Диаметр ротора, мм	65
Активная длина, мм	40
Вес, кг	3,3

инвертора осуществляются при условии ограничений на стоимость изделия. После этого оценивается динамика ротора и стоимость полученного изделия. В результате на данном этапе проектирования определяется матрица первоначальных параметров ЭД с ПМ. По матрице полученных размеров создается 3D-модель ЭД, оценивается его эргономичность и формируется компоновка ЭД совместно с инвертором.

Для апробации предложенной методики был разработан проект шестифазного отказоустойчивого ЭД для НД. Характеристики проектируемого электродвигателя, полученные аналитическим путем [8], представлены в таблице 1.

Отличительная особенность отказоустойчивых ЭД состоит в том, что изначально данные ЭД проектируются на избыточную мощность и при выходе из строя одной или нескольких фаз обеспечивают необходимые выходные параметры. Для реализации описанного ниже шестифазного отказоустойчивого ЭД с ПМ используется известная схема

отказоустойчивых электрических машин, приведенная на рис. 1.

Расчет гидравлических потерь производился с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. На рис. 2 представлена картина распределения скоростей в полости ЭД с ПМ. На рис. 3 приведена система охлаждения ЭД с ПМ. Красным цветом отмечены места протекания хладагента по элементам ЭД с ПМ. При этом ЭД выполнен герметичным.

Из проведенного анализа следует, что разность давлений хладагента на входе и выходе ЭД с ПМ составляет 326 Па, и скорость течения не превышает 0,697 м/с. При этом гидравлические потери составляют 106 Вт. Полученная величина потерь является удовлетворительной, что позволяет перейти к следующему шагу.

Для подтверждения эффективности системы охлаждения и работоспособности ЭД с ПМ в продолжительном рабочем режиме был проведен тепловой расчет. Для этого

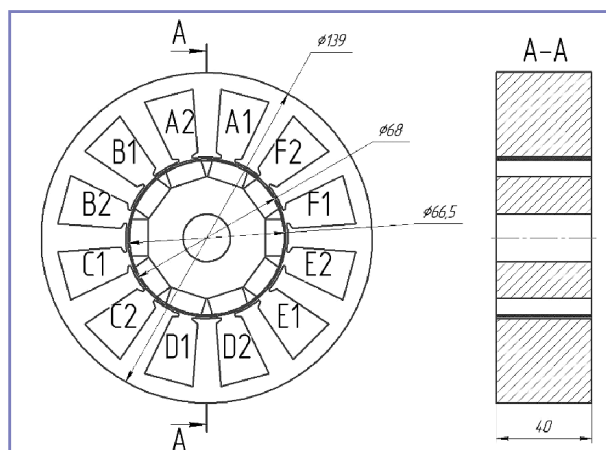


Рис. 1. Конструктивная схема шестифазного отказоустойчивого ЭД с ПМ

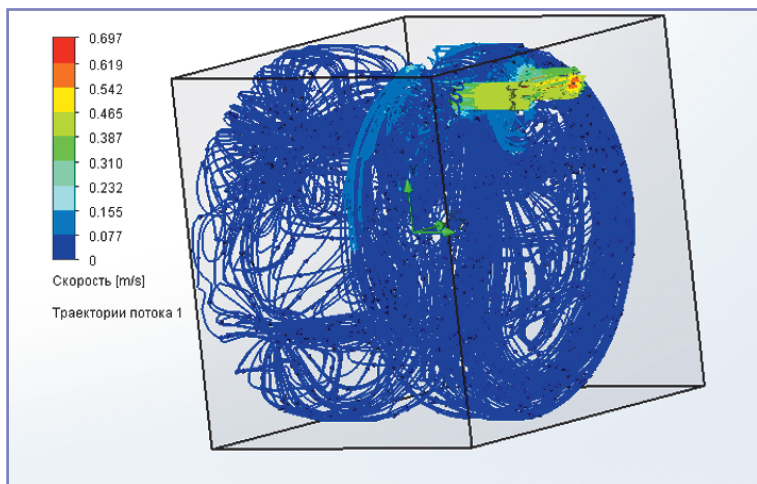


Рис. 2. Результаты гидравлического расчета

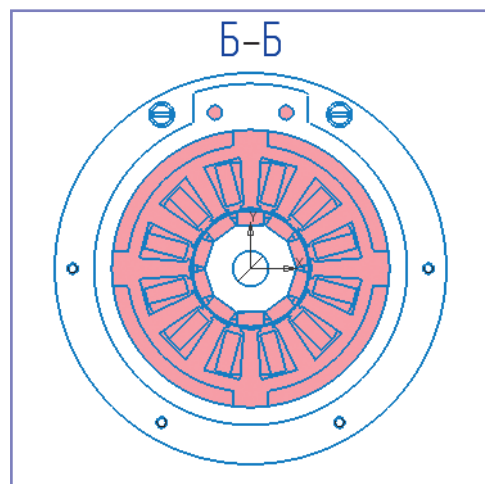


Рис. 3. Система охлаждения ЭД с ПМ

была разработана компьютерная модель ЭД с ПМ. Все элементы модели имеют физико-химические свойства, соответствующие материалам, используемым при проектировании. При моделировании предполагалось, что температура окружающего воздуха –50°C, температура хладагента (керосин) на входе в ЭД с ПМ составляет 70°C, массовый расход хладагента – 0,00005 м³/с.

Результаты моделирования показали высокую эффективность системы охлаждения за счет того, что внутри машины протекает хладагент. Это обеспечивает максимальный теплоотвод от всех активных элементов, которые выделяют тепло. В результате температура ЭД с ПМ составила не более 111,8°C в самой нагретой зоне (рис. 4). Температура ПМ – 75,7°C (рис. 4). Так как используются ПМ из сплава Sm₂Co₁₇ с рабочей температурой до 300°C, то данный перегрев никак не отразится на выходных характеристиках ЭД с ПМ.

Следующим этапом было выполнение механических расчетов ротора. При этом первоначальной задачей является определение толщины бандажной оболочки ротора. Расчеты проводятся на частоту вращения ротора, превышающую допустимую на 30%, что составляет 8000 об/мин. Бандажная оболочка ротора выполняется из нержавеющей стали (марка 12 X18H91) с пределом прочности на текучесть 200 МПа. Коэффициент

запаса принимается равным 1,22. Исходя из проведенных предварительных электромагнитных расчетов, максимальный допустимый немагнитный зазор в ЭД с ПМ может составлять не более 2 мм.

Первым этапом является проверка механической прочности ротора при максимально возможной толщине бандажной оболочки:

$$b = \frac{\Omega^2 \rho (r_1 + r_2) (D_4^2 - D_3^2)}{16 \sigma_m} k_3 = \frac{795,51^2 \cdot 8200 \cdot (0,01 + 0,0325) \cdot (0,065^2 - 0,0245^2)}{16 \cdot 200000000} \cdot 1,22 = 0,00033 \text{ м} = 0,33 \text{ мм}, \quad (1)$$

где Ω – скорость вращения ротора (рад/с); ρ – плотность ПМ (кг/м³); σ – предел текучести бандажной оболочки (Па); k_3 – коэффициент запаса; r_1 – радиус вала (м); r_2 – внешний радиус ПМ (м); D_3 – внутренний диаметр ПМ (м); D_4 – внешний диаметр ПМ (м).

Толщину бандажной оболочки округляем в большую сторону – до 1 мм. Таким образом, бандаж ротора из нержавеющей стали обеспечивает механическую прочность ротора при частоте вращения 8000 об/мин с коэффициентом запаса 1,22.

Далее выполняются поверочные расчеты механической прочности ротора.

При толщине бандажной оболочки 1 мм и с учетом массы ПМ (0,4 кг) были рассчитаны

центробежные силы, воздействующие на бандаж ротора с учетом повышенной частоты (8000 об/мин) с коэффициентом запаса по механической прочности 1,22:

$$F = \Omega^2 R m_{\text{мар}} = 837,33^2 \cdot 0,0325 \cdot 0,4 = 9114,5 \text{ Н}, \quad (2)$$

где R – радиус ротора (определяется исходя из электромагнитных расчетов); $m_{\text{мар}}$ – масса ПМ.

С учетом геометрических параметров, а также полученной величины центробежных усилий в программном комплексе SolidWorks была разработана конечная элементная модель и проведены расчеты напряжений в бандаже ротора, выполненного из нержавеющей стали. Результаты представлены на рис. 5.

Из представленных расчетов видно, что напряжение в бандажной оболочке ротора (при ее толщине 1 мм) составляет 41,6 МПа. Кроме напряжения был проведен анализ запаса прочности материала бандажной оболочки. Результат анализа показал, что минимальный запас прочности бандажа под действием приложенных сил составил не менее 4,1 – это говорит о значительном резерве по прочности бандажа.

Для конечного формирования проекта ЭД с ПМ была разработана конечная элементная модель в программном комплексе

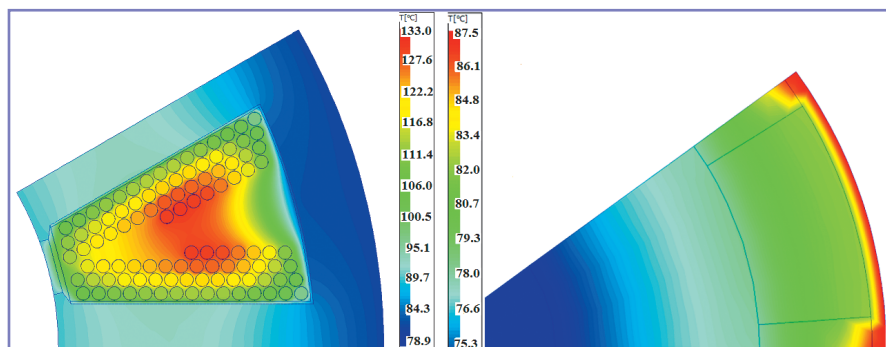


Рис. 4. Распределение температур в ПМ и обмотке ЭД

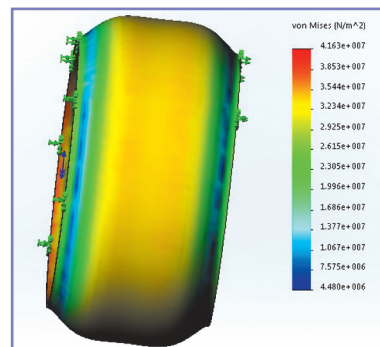


Рис. 5. Расчеты, проведенные в программном комплексе SolidWorks (напряжение в бандажной оболочке ротора)

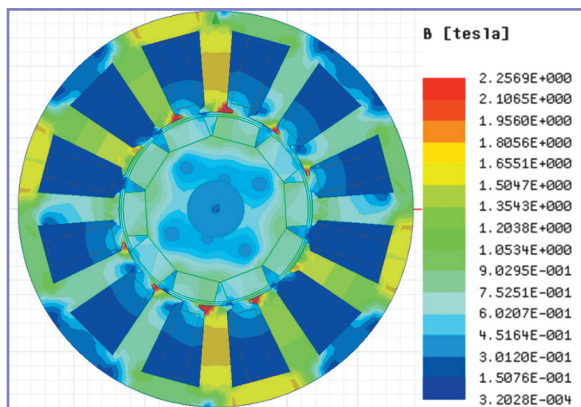


Рис. 6. Распределение индукции в статоре

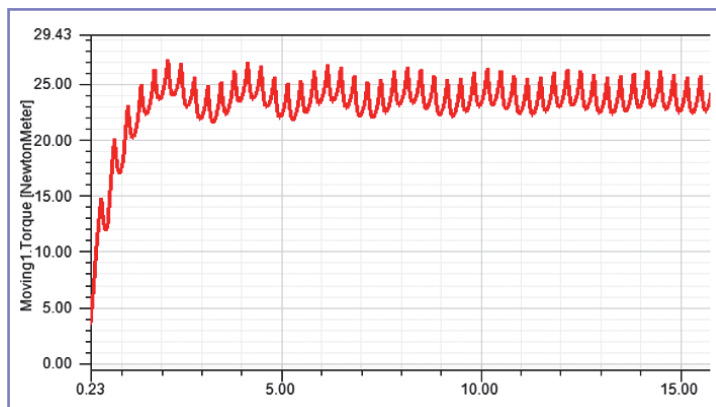


Рис. 7. Моментная характеристика

ANSYS Maxwell, согласно которой параметры данного ЭД с ПМ соответствуют рассчитанным по аналитическим методикам.

Оценка выходной мощности двигателя проводилась по выходному моменту на валу двигателя. Результаты моделирования показали, что при частоте вращения ЭД с ПМ 6000 об/мин величина момента составляет 24,9 Нм, что соответствует расчетным параметрам. Результаты анализа представлены на рис. 6 и 7.

Анализ токов подтвердил, что проектируемый ЭД с ПМ удовлетворяет требованиям по величине плотности тока, что позволит эффективно использовать систему охлаждения. Плотность тока не превышает 18,5 А/мм² при диаметре проводника 1,45 мм. Результаты анализа приведены на рис. 8.

Для уменьшения потерь ПМ были выполнены из отдельных сегментов с осевой длиной 5 мм. В результате использования такой технологии потери уменьшаются более чем в 4 раза, результаты проведенных расчетов были исследованы и подтверждены в программном комплексе ANSYS Electromagnetic Suite. Оценка потерь проводилась по величине наведенных токов в ПМ. На рис. 9а представлено распределение плотностей тока в ПМ, выполненного из сегментов длиной 5 мм. На рис. 9б – распределение плотностей токов для цельного ПМ. Оценка потерь проходила по средней величине тока в ПМ. Для этого были взяты значения плотностей тока в сечении

с шагом 0,2 мм. Средняя величина вихревых токов в сегменте более чем в 2 раза меньше, чем в цельном ПМ. В результате суммарные потери в сегментированных ПМ равны 64 Вт.

Таким образом, в данной статье представлена методика проектирования ЭД с ПМ, которая может быть использована при проектировании шестифазных отказоустойчивых электроприводов для топливных насосов летательного аппарата. На основе данной методики был рассчитан ЭД с ПМ мощностью 15 кВт и частотой вращения 6000 об/мин и весом 3,3 кг. На основе проведенных аналитических расчетов была создана трехмерная компьютерная модель, показавшая высокую степень сходимости с результатами аналитических расчетов. Проведенные электромагнитные расчеты показали высокую индукцию в магнитопроводе статора, в результате чего была выбрана сталь марки 49K2ФА, потери ПМ удалось минимизировать более чем в 4 раза при применении сегментирования в осевом направлении. Проведенный механический расчет прочности показал, что при частоте вращения, превышающей номинальную на 30%, коэффициент прочности составляет 4,1, что говорит о высокой надежности конструкции. Результаты гидравлического расчета позволили определить скорость и давление течения жидкости в полости ЭД с ПМ, на основе полученных данных был проведен тепловой анализ.

Литература

1. Cao W., Mecrow B.C., Atkinson G.J., Bennett J.W., Atkinson D.J. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA) // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 59, no. 9, pp. 3523–3531, 2012.
2. Ganev E. High-performance electric drives for aerospace more electric architectures. Part I. Electric machines // IEEE Power engineering society general meeting 2007, pp. 1–8, 2007.
3. Boglietti A., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S. The safety critical electric machines and drives in the more electric aircraft: A survey // 35th Annual conference of IEEE industrial electronics 2009, IECON'09, pp. 2587–2594, 2009.
4. Bojoi R., Cavagnino A., Tenconi A., Vaschetto S. Control of shaftline-embedded multiphase starter/generator for aero-engine // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 63, no. 1, pp. 641–652, 2016.
5. Pantea A., Yazidi A., Betin F., Taherzadeh M., Carriere S., Henaou H., Capolino G.-A., Six-phase induction machine model for electrical fault simulation using the circuit-oriented method // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 63, no. 1, pp. 494–503, 2016.
6. Mecrow B.C., Jack A.G., Atkinson D.J., Green S., Atkinson G.J., King A., Green B. Design and testing of a 4 phase fault tolerant permanent magnet machine for an engine fuel pump // IEEE Trans. energy convers., vol. 19, no. 4, pp. 671–678, 2004.
7. Atkinson G.J., Mecrow B.C., Jack A.G., Atkinson D.J., Sangha P., Benarous M. The analysis of

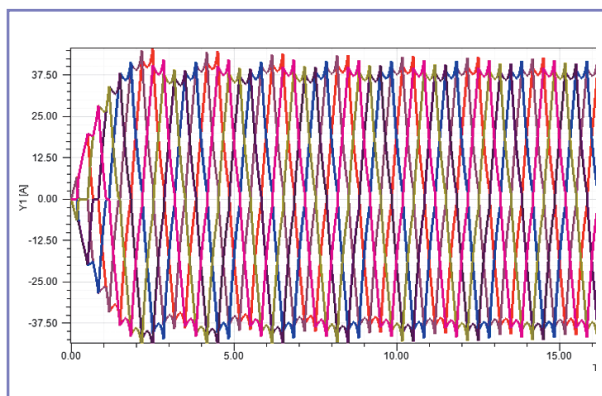


Рис. 8. Токи в обмотках статора ЭД с ПМ

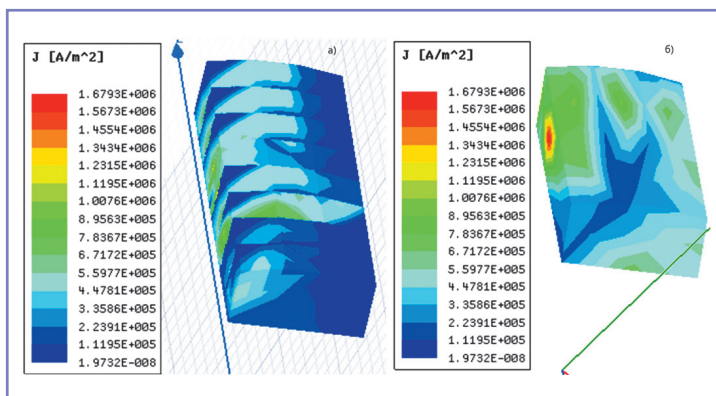


Рис. 9. Распределение токов в ПМ из сегментов по 5 мм

losses in high-power fault-tolerant machines for aerospace applications // IEEE Transactions on industry applications, vol. 42, no. 5, pp. 1162–1170, 2006.

8. Xiaoyuan C., Zhiqian D., Jingjing P., Xiangsheng L. Comparison of two different fault-tolerant switched reluctance machines for fuel pump drive in aircraft // IEEE-IPEMС, pp. 2086–2090, 2009.

Исмагилов Флюр Рашитович

Родился в 1944 году. Окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Электрические машины и аппараты». Доктор технических наук, профессор. В 1998 году защитил диссертацию по теме «Электрохимические элементы систем управления со сложной геометрией подвижной части». Опыт работы – более 40 лет в проектировании ЭМПЭ. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрохимика» УГАТУ. Имеет более 300 научных трудов, более 150 патентов. Заслуженный работник высшей школы РФ, заслуженный изобретатель РБ, заслуженный создатель космической техники.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич

Родился в 1988 году. В 2010 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Электрохимика». Кандидат технических наук, доцент. В 2013 году защитил диссертацию по теме «Гибридные магнитные подшипники и их системы управления (исследования и разработка)». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником кафедры «Электрохимика» УГАТУ. Имеет более 250 научных трудов, более 150 патентов.

Каримов Руслан Динарович

Родился в 1988 году. Окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Электрические машины и аппараты». Кандидат технических наук. В 2018 году защитил диссертацию по теме «Система намагничивания постоянных магнитов на основе высокоско-

ростного магнитоэлектрического генератора». Опыт работы – 10 лет в проектировании ЭМПЭ. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры «Электрохимика» УГАТУ. Имеет более 60 научных трудов, более 30 патентов РФ.

Айгузина Валентина Владимировна

Родилась в 1994 году. В 2016 году окончила Уфимский авиационный институт по специальности «Специальные электрохимические системы». Опыт работы – 2 года. В настоящее время работает младшим научным сотрудником кафедры «Электрохимика» УГАТУ. Имеет более 60 научных трудов, 15 патентов РФ.

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электрохимика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Ismagilov Flur

Was born in 1944. He graduated from Ufa State Aviation Technical University with degree in “Electrical machines and devices”. He is doctor of technical sciences, professor. In 1988 he defended a dissertation by the theme “Electromechanical control systems with complex geometry of movable part”. He has 40 years of work experience. At present he works as Head of electro mechanics department of Ufa State Aviation Technical University. He has more than 300 scientific papers and more than 150 patents of Russian Federation. He is honorary figure of Russian higher education, honored inventor of the Republic of Belarus, honored creator of space systems.

Vavilov Vyacheslav

Was born in 1988. In 2010 he graduated from the Ufa Aviation Institute with a degree in “Electromechanics”. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2013 he defended his thesis on the topic “Hybrid magnetic bearings and their control systems (research and development)”. Work experience is 10 years. At present he works as a senior researcher, associate professor of the Department of Electromechanics of USATU. He has more than 250 scientific papers, more than 150 patents.

Karimov Ruslan

Was born in 1988. He graduated from the Ufa Aviation Institute with a degree in Electrical Machines and Devices. Candidate of technical sciences. In 1918 he defended his thesis on the topic “Permanent Magnet Magnetization System Based on a High-Speed Magnetolectric Generator”. Work experience is 10 years in the design of electromechanical energy converters. At present he works as a senior lecturer at the Department of Electromechanics of USATU. He has more than 60 scientific papers, more than 30 patents of the Russian Federation.

Aiguzina Valentina

She was born in 1994. In 2016 she graduated from the Ufa State Aviation Technical University with a degree in “Special electromechanical systems”. She has 2 years of work experience. At present she works as a junior researcher at the Department of Electromechanics of USATU. She has more than 60 scientific papers, more than 15 patents of the Russian Federation.

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in “Electric engineering”. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic “Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft”. Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director – chief designer of Electroprivod OJSC. He has 41 scientific publications.

Об опыте разработки систем электрозапуска газотурбинных двигателей в АО «Электропривод»

// About experience of developing electric start systems for gas turbine engines in JSC «Electroprivoд» //

Грязев К. Д., Новоселова А. В.,
АО «Электропривод», Киров

В статье приведен опыт по разработке взрывобезопасных электростартеров для запуска газотурбинных установок перекачивающих агрегатов и электростанций.

Ключевые слова: электрозапуск газотурбинного двигателя, асинхронные электродвигатель, векторное управление.

The article describes the experience in developing explosion-proof electric starters for starting gas-turbine units of pumping units and power plants.

Keywords: electric start of a gas turbine engine, asynchronous electric motor, vector control.

АО «Электропривод», являясь ведущим предприятием по разработке и изготовлению авиационного автоматизированного электропривода и его составных агрегатов, ежегодно формирует оптимальный портфель инвестиционных проектов, направленных на расширение и диверсификацию бизнеса. Предприятие разрабатывает, изготавливает и серийно поставяет комплексные системы электрозапуска газотурбинных двигателей газоперекачивающих

агрегатов (ГПА) и электростанций (ГТЭС). Выручка предприятия от реализации систем электрозапуска ежегодно составляет более 30%. Применение электрозапуска взамен турбодетандерного позволяет обеспечить повышенные требования по экологической безопасности и взрывобезопасности при эксплуатации ГПА и ГТЭС. Электрозапуск уменьшает время обслуживания, увеличивает ресурс и срок службы систем запуска.

В состав системы электрозапуска входят электрический стартер, блок управления электростартером (БУС) и соединительные кабели.

В настоящее время разработанные и изготавливаемые АО «Электропривод» системы электрозапуска (рис. 1) применяются в составе наземных установок на базе газотурбинных двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ, НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ, Д-30ЭУ, ПС-90ГП, АЛ-31СТ, газотурбинных двигателей в составе газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р и ГПА-16 «Ладога», ГТУ типа НК-361 газотурбобоза ГТ1h. Основные технические характеристики систем приведены в таблице 1.

Основа электростартера – трехфазный асинхронный электродвигатель с повышенной частотой вращения 12000 об/мин, имеющий взрывозащищенное исполнение с маркировкой 1ExdIIВТЗ. При его проектировании и изготовлении применены технические решения, используемые при создании и производстве авиационной техники, что позволило обеспечить требуемые характеристики, малогабаритность электродвигателя, высокую надежность и ресурс системы в целом.

Для эффективного управления электростартером в составе БУС применен серийный частотный преобразователь типа неуправляемый выпрямитель – транзисторный инвертор с микропроцессорной системой управления, реализующей алгоритм векторного управления моментом. При этом преобразователь частоты обеспечивает плавное увеличение крутящего момента и безударное зацепление кулачковой муфты при включении электростартера. Необходимые для безопасной эксплуатации средства защиты реализованы на базе встроенных функций частотного преобразователя, при этом контролируются потребляемый электродвигателем ток, напряжение в звене постоянного тока, температура БУС и электродвигателя.

Первые системы электрозапуска двигателей Д-30ЭУ-1, Д-30ЭУ-2, Д-30ЭУ-6 мощностью от 2,5 до 6 МВт, применяемые в составе ГТЭС, на базе электростартера СТВД-25Д-9000 с блоком управления БУС-120Т были запущены в серийное производство в 2006 году [1].

Для ряда ГТУ-10П/12П/16П/25П была выпущена модификация системы электрозапуска на базе электростартера СТВД25Д9000 – СТВД30Д11Т (рис. 2) с блоком управления БУС-160Т, отличающаяся увеличенными

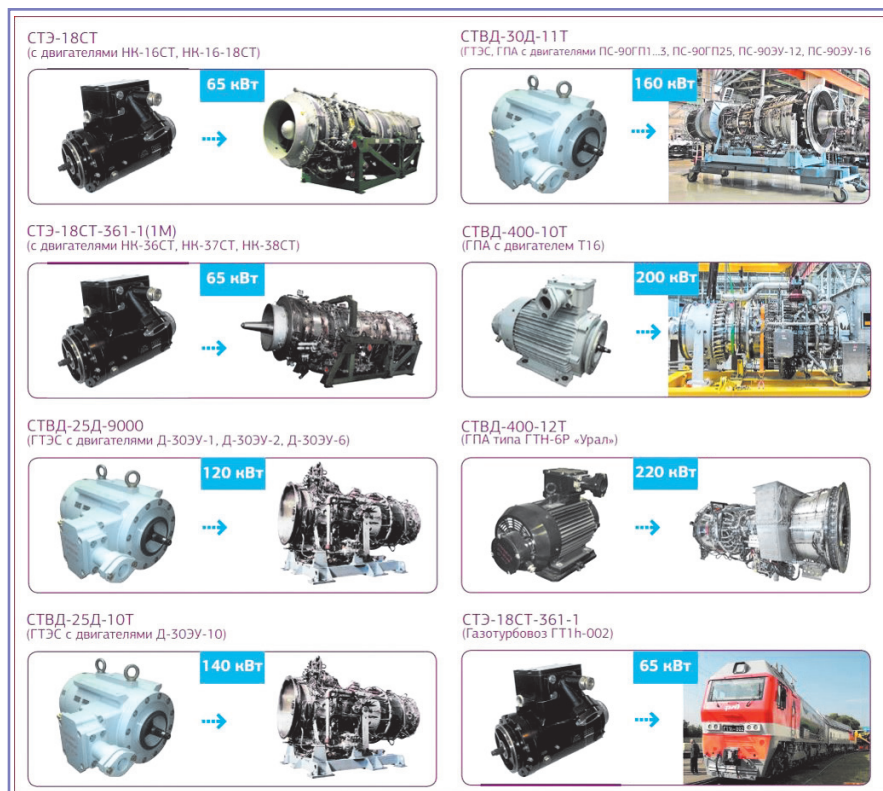


Рис. 1. Ряд электростартеров

Таблица 1. Основные технические характеристики систем запуска

Система	Тип электростартера (электродвигателя)	Блок управления	Мощность электростартера, кВт	Частота вращения выходного вала, об/мин, не менее	Масса электростартера (электродвигателя), кг, не более
СТВД-25Д-9000	(ДАТВ300–120Т-9000)	БУС-120Т	120	9000	135,5
–	СТЭ-18СТ-АЛ	БУС-18СТ-АЛ, БУС-120Т-АЛ	65	4900	(57)
СТВД-25Д-10Т	(ДАТВ300–140Т-10)	БУС-140Т	140	10 000	(140)
СТВД-30Д-11Т	(ДАТВ300–160Т-11)	БУС-160Т	220	11 000	(140)
СТВД-400–10Т	(ДАТВ400–200Т-10)	БУС-220Т	200	10 200	300
СТВД-400–12Т	(ДАТВ400–200Т-12)	БУС-220Т-12	220	11 900	300
–	СТЭ-18СТ	БУС-18СТ	65	2600	(57)
–	СТЭ-18СТ-361–1,1М	БУС-18СТ-361–1,1М	65	2200	(57)

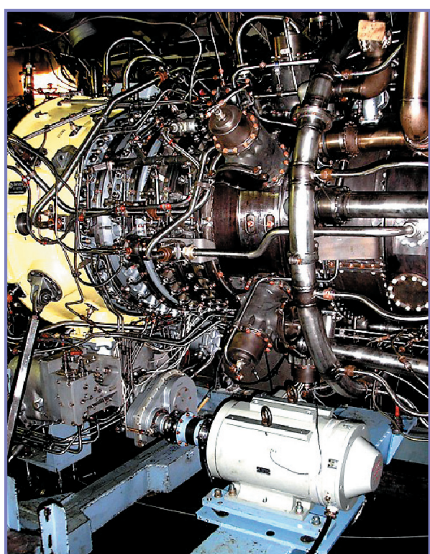


Рис. 2. Размещение электродвигателя ДАТВ300–30Д-11Т на объекте

значениями развиваемого момента на валу и мощности электростартера.

Для обеспечения запуска ГТД типа НК-16СТ, НК-16–18СТ, НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ был разработан электростартер СТЭ-18СТ с блоком управления БУС-18СТ, а также его модификация – СТЭ-18СТ-361–1 с блоком управления БУС-18СТ-361–1. Его серийное производство началось в АО «Электропривод» в 2007 году. Конструктивная особенность электростартера – размещение в одном корпусе электродвигателя, редуктора, муфты сцепления и выходного вала. По посадочным и присоединительным размерам на объекте конструкция электростартера полностью взаимозаменяема с пневмостартером.

Область применения электростартеров со стационарных газоперекачивающих агрегатов и газотурбинных электростанций распространилась и на железнодорожный транспорт. Для применения в качестве системы запуска газотурбинного двигателя НК-361 газотурбовозов ГТ1н с электрической передачей, предназначенных для эксплуатации на неэлектрифицированных участках железных дорог общего пользования в районах

Сибири и Крайнего Севера, разработана и изготовлена модификация электростартера СТЭ-18СТ – СТЭ-18СТ-361 с блоком управления БУС-18СТ-361.

В дополнение к ряду серийно выпускаемых систем электрозапуска для конвертированных авиационных ГТД мощностью от 2,5 до 25 МВт разработаны электростартеры и для газотурбинных установок, не имеющих авиационных корней: СТВД-400–10Т, обеспечивающий запуск ГПА-16 «Ладога», и СТВД-400–12Т для запуска газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р на Медвеьем нефтегазоконденсатном месторождении (НГКМ).

Электростартер СТВД-400–12Т успешно прошел испытания в составе газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р. Первые опытные системы электрозапуска были поставлены в 2016 году в рамках проекта реконструкции одного из старейших месторождений Западной Сибири – Медвежьего НГКМ, реализуемой с целью максимального продления его сроков службы. В настоящий момент в эксплуатацию введены 9 систем СТВД-400–12Т.

Электростартеры СТВД-400–10Т и СТВД-400–12Т обеспечивают запуск ГТУ на базе промышленных ГТД, отличающихся от конвертированных авиационных повышенной длительностью горячего запуска и технологической прокрутки (рис. 3). Так, для ГПА-16 «Ладога» запуск происходит в течение 440 с, продолжительность холодной прокрутки – 4 ч, при этом момент страгивания

составляет 550 Н·м; для ГТН-6Р запуск происходит в течение 660 с, продолжительность холодной прокрутки – 1 ч, момент страгивания – 700 Н·м. Предварительные испытания данных систем электрозапуска проводились с применением метода взаимной нагрузки, что позволило в сжатые сроки подготовить испытательную базу, снять моментные характеристики электростартеров во всем диапазоне рабочих оборотов [2].

Объекты применения систем электрозапуска производства АО «Электропривод» насчитывают более 500 агрегатов ГПА и ГТЭС. Суммарная наработка превысила 5 миллионов часов. Системы крайне успешно зарекомендовали себя в процессе эксплуатации, результатом этого становится заключение новых контрактов.

Технический уровень систем электрозапуска, разработанных и серийно выпускаемых АО «Электропривод», подтвержден патентами на изобретение и промышленный образец (№ 2362031, № 65009).

Предприятие оказывает сервисные услуги для эксплуатируемых систем и при необходимости организует обучение обслуживающего персонала. Положительный опыт внедрения систем электрозапуска на объектах, а также команда высококвалифицированных специалистов предприятия служат залогом успеха при разработке и внедрении экологически безопасных и надежных систем электрозапуска ГТД различных назначений и исполнений.

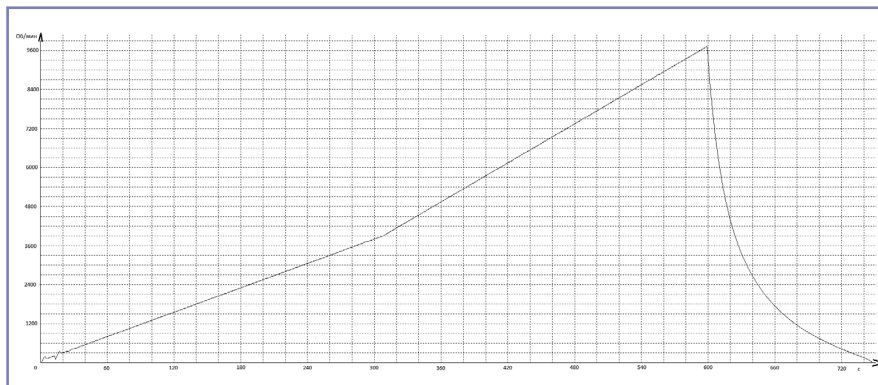


Рис. 3. Осциллограмма запуска ГПА ГТН-6Р, частота вращения выходного вала электростартера

Литература

1. Миронов В.А., Новоселова А.В., Шалагинов В.Ф. Электрозапуск ГТД ОАО «Электропривод» // Газотурбинные технологии, 2012, № 4.
2. Грязев К.Д. Частотно-управляемые электростартеры для запуска газотурбинных установок / К.Д. Грязев, А.В. Новоселова, В.Ф. Шалагинов // Научно-технический семинар «Электропривод: теория, технология, практика и перспективы», Киров, 25 апреля 2018 г. Сборник тезисов докладов. Киров, АО «Электропривод», 2018. 117 с.

Грязев Константин Дмитриевич

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Вятский государственный университет по специ-

альности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы в области разработки авиационных электроприводов – 10 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод».

Новоселова Алла Владимировна

Родилась в 1978 году. В 2002 году окончила Вятский государственный университет по специальности «Электропривод». Опыт работы в области авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает начальником отдела маркетинга АО «Электропривод».

Gryazev Konstantin

Was born in 1986. In 2009 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes". Work experience in the field of development of aviation electric drives is 10 years. At present he works as a leading designer and project manager of JSC "Electroprivod".

Novoselova Alla

Was born in 1978. In 2002 graduated from Vyatka State University majoring in "Electric motor drive". Experience in the field of aviation electric drive – 17 years. At present she works as Head of marketing department of JSC "Electroprivod".

Опыт применения аддитивных технологий при производстве сложных корпусных деталей

// Experience with utilizing of additive technologies for complex housing parts production //

Филиппов М. А., Власов А. И., к.т.н., Садаков Н. А.,
АО «Электропривод», Киров

В статье приведен обзор применяемых технологий аддитивного производства, перспективы и опыт применения 3D-печати металлических деталей на предприятиях авиационной отрасли. Дана сравнительная характеристика классических и аддитивных технологий при изготовлении сложных корпусных деталей на АО «Электропривод». Ключевые слова: аддитивные технологии, корпусная деталь, металлические порошки, время построения изделия.

The article presents review of used additive manufacturing technologies. Experience with utilizing of additive technologies for production of metallic parts in aviation industry enterprises and its future are described. The article contains comparative analysis of using conventional and additive technologies for production of complex housing parts at the JSC "Electroprivod". Keywords: additive manufacturing technologies, housing part, metal powder, part production time.

Современные темпы развития аэрокосмической и авиастроительной промышленности требуют выбора технологий производства, выполняемых в кратчайшие сроки и с наименьшими затратами. Наряду с новыми и передовыми технологиями можно отметить стремительный рост внедрения так называемых аддитивных технологий.

Существует огромное количество определений, так или иначе характеризующих аддитивные технологии. Под аддитивными технологиями (AM – Additive Manufacturing, AF – Additive Fabrication) понимают технологии, которые позволяют изготавливать изделия за счет послойного синтеза или послойного выращивания изделий по цифровой 3D-модели методом 3D-печати [1].

Мировыми лидерами в области аддитивных технологий на сегодняшний день являются США, открывшие у себя более 15 институтов специального назначения и занимающие более 50% рынка. С многократным отставанием идут Япония, Германия и Китай. Россия же находится в этой нише на 11-м месте и только начинает развиваться в этом направлении. По статистике 2015 года, российские ученые подали заявку на 131 патент в данной отрасли, и это только 0,14% всех патентов [1].

Компания Allied Market Research оценила глобальный рынок 3D-печати к 2020 году в 8,6 млрд долларов (при общем темпе роста инвестиций 21% в среднем за год в период 2015–2020 гг.).

Сферы применения 3D-печати весьма обширны: военная отрасль, медицина, строительство, автомобилестроение, образование, развлекательная индустрия, производство изделий для бытового использования и т.д. [2].

Расширение рынка 3D-печати идет стремительными темпами и уже сейчас может осуществляться разными способами с использованием самых разнообразных материалов. В таблице 1 представлены основные виды технологии аддитивного производства.

В аэрокосмической и авиастроительной промышленности особый интерес вызывает печать деталей металлическими порошками.

Согласно данным Министерства промышленности и торговли РФ, авиакосмическая отрасль занимает около 30% от

общего объема применения аддитивных технологий в России (рис. 1) [3].

В соответствии с поручениями правительства и Министерства промышленности и торговли при непосредственном участии и координирующей роли ФГУП «ВИАМ» был разработан «Комплексный план мероприятий по развитию и внедрению аддитивных технологий в Российской Федерации на период 2018–2025 гг.», который позволит консолидировать усилия российских ученых и разработчиков средств аддитивного производства. В разработке плана принимали участие более 30 организаций, входящих в состав ГК «Росатом», «Роскосмос», «Ростех» и их интегрированных структур (ПАО «ОАК», АО «Вертолеты России», АО «ОДК», АО «КРЭТ» и др.), ведущие вузы страны, Фонд фундаментальных исследований [3].

В России 3D-печать применяется и адаптируется под многие ведущие предприятия, например, в новом российском авиационном двигателе используются 3D-напечатанные детали. В рамках совместного проекта Фонда перспективных исследований и ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова» разработан перспективный авиационный односекционный турбированный роторно-поршневого двигателя (рис. 2а), в котором были применены

Таблица 1. Основные виды технологии аддитивного производства

Наиболее распространенные технологии аддитивного производства
FDM (Fused deposition metotin) – послойное построение изделия из расплавленной пластиковой нити. Это самый распространенный способ 3D-печати в мире, на основе которого работают миллионы 3D-принтеров, от самых дешевых до промышленных систем трехмерной печати. FDM-принтеры работают с различными типами пластиков, самым популярным и доступным из которых является ABS. Изделия из пластика отличаются высокой прочностью, гибкостью. Прекрасно подходят для тестирования продукции, прототипирования, а также для изготовления готовых к эксплуатации объектов.
SLM (Selective laser meltin) – селективное лазерное сплавление металлических порошков. Самый распространенный метод 3D-печати металлом. С помощью этой технологии можно быстро изготавливать сложные по геометрии металлические изделия, которые по своим качествам превосходят литейные и прокатное производство.
SLS (Selective laser sintering) – селективное лазерное спекание полимерных порошков. С помощью этой технологии можно получать большие изделия с различными физическими свойствами (повышенная прочность, гибкость, термостойкость и др.).
SLA (Stereolithography) – лазерная стереолитография. отверждение жидкого фотополимерного материала под действием лазера. Эта технология аддитивного цифрового производства ориентирована на изготовление высокоточных изделий с различными свойствами.
DMD (Direct metal deposition) – прямое или непосредственное осаждение материала, т.е. непосредственно в точку, куда подводится энергия и где происходит в данный момент построение фрагмента детали. С помощью данной технологии можно создавать крупные изделия сразу из нескольких видов сплавов, а также производить ремонт таких дорогостоящих компонентов, как лопатки турбин.

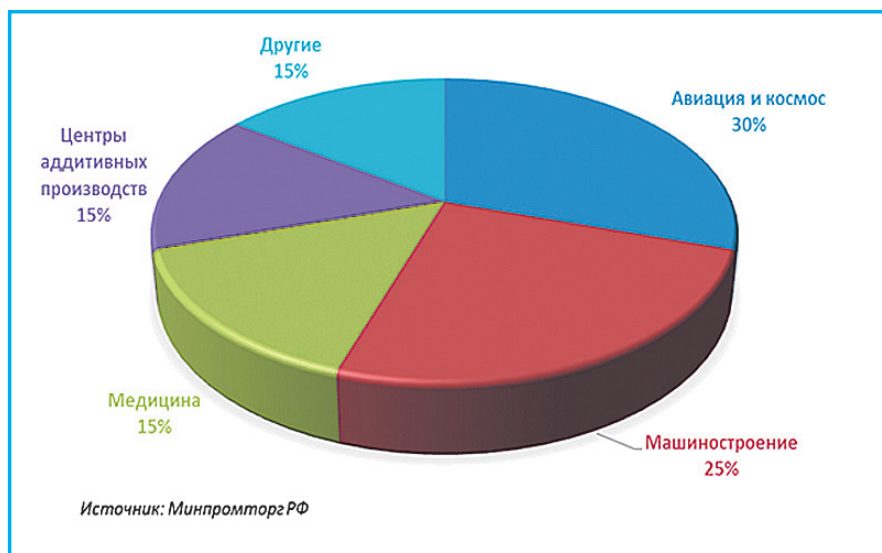


Рис. 1. Отраслевая структура российского рынка технологий аддитивного производства

композиционные металлокерамические материалы нового поколения с высокими физико-механическими характеристиками.

В двигателе использована специально разработанная уникальная система турбонаддува, часть ее элементов изготовлена с помощью аддитивных технологий с использованием отечественного сырья. Правильность выбора данных конструкторских и технологических решений подтверждена в ходе полного комплекса стендовых испытаний [4].

На базе АО «Научно-производственное объединение «Опытно-конструкторское бюро им. М. П. Симонова» (г. Казань) прошли стендовые испытания малоразмерного газотурбинного двигателя, изготовленного по аддитивным технологиям (рис. 2б). Технология производства силовой установки разработана в рамках совместного проекта Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов и Фонда перспективных исследований. Создана технология изготовления деталей газотурбинной установки методом послойного лазерного синтеза с использованием

металлопорошковых композиций жаропрочных и алюминиевых сплавов. Ряд разработанных сплавов по прочностным характеристикам превосходит зарубежные аналоги более чем на 20%. Благодаря новой технологии время изготовления основных элементов двигателей удалось сократить в 20–30 раз при более чем двукратном снижении стоимости их производства [5].

Согласно каталогу отечественной продукции в области аддитивного производства, утвержденному Министерством промышленности и торговли РФ, основными поставщиками материалов для 3D-печати металлическими порошками в России являются такие предприятия, как ФГУП «ВИАМ», ОАО «ВИЛС», АО «Полема», АО «РУСАЛ», АО «Композит», ООО «СфераМ». Данные предприятия предоставляют широкий выбор сырья (вольфрам, молибден, хром, бронза, алюминий, титан и др.) с уровнем локализации комплектующих до 100% [6]. Перспективными являются порошки из жаропрочных сплавов, например, инконеля, титановых сплавов ввиду трудной обрабатываемости их

альтернативных заготовок традиционными методами и сложности получения заготовок классическим способом литья.

Как видно из приведенной выше информации, аддитивные технологии особенно востребованы в производстве авиационно-космической техники, а также могут быть использованы в условиях единичного или мелкосерийного типов производства.

Аддитивные технологии позволяют существенно сократить длительность технологической подготовки производства новых, достаточно сложных по форме изделий, использовать принципиально новые конструкторско-технологические решения, снизить в конечном счете трудоемкость и себестоимость изготовления отечественной продукции, а также сократить машинное или оперативное время изготовления детали.

Так, для послойного построения объемных форм, характерного, например, для селективного лазерного спекания, определение времени построения изделия t_0 можно оценить при помощи выражения

$$t_0 = t_M + t_{B1} + t_{B2} = \sum \left(\frac{F_i}{k_{\text{п}} d_{\text{п}}^{\text{эф}} V_{\text{п}}} + t_i^{\text{пс}} \right) + t_{B2},$$

где t_0 – оперативное время; t_M – машинное время, обусловленное перемещением пятна светового контакта по контуру слоя; t_{B1} – часть вспомогательного времени, необходимого для подготовки формообразования выделенных слоев; t_{B2} – прочие затраты вспомогательного времени (выгрузка, включая возможную технологическую выдержку, включение цикла); m – число выделенных слоев; $d_{\text{п}}^{\text{эф}}$ – эффективный диаметр пятна контакта лазерного излучения с порошковым слоем; $k_{\text{п}}$ – коэффициент перекрытия; F_i – площадь i -го слоя, длина трассы обхода центром пятна контакта; $V_{\text{п}}$ – средняя скорость перемещения пятна контакта вдоль трассы; $t_i^{\text{пс}}$ – время подготовки к обходу i -го слоя.

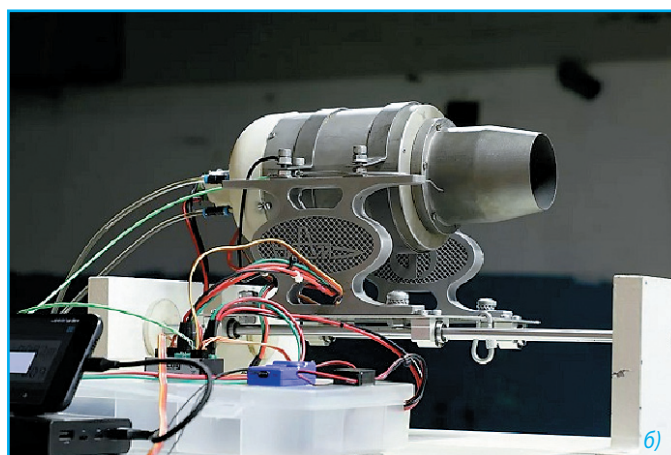
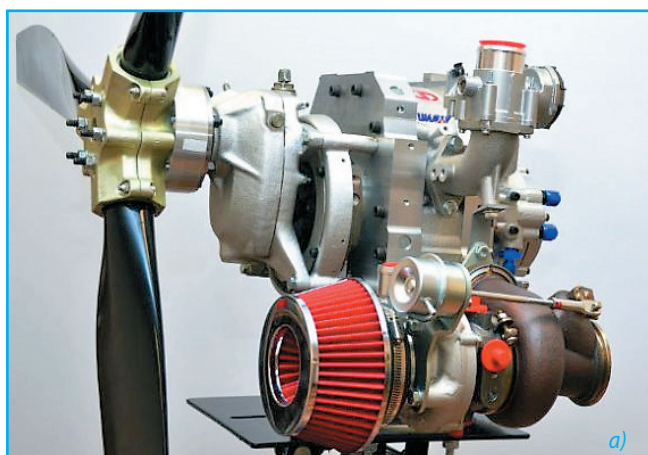


Рис. 2. Образцы авиационных двигателей, изготовленных по аддитивной технологии: односекционный турбированный роторно-поршневой двигатель (а); малоразмерный газотурбинный двигатель (б)

Из приведенного расчетного выражения следует, что время построения изделия зависит от числа слоев, способа разбиения на слои, выбранной стратегии обхода слоя, средней скорости перемещения пятна контакта. То есть время построения изделия не зависит от промежуточных технологических операций, характерных для классического способа изготовления изделия методом точения [7].

Таким образом, применение аддитивных технологий обеспечивает сокращение длительности технологического цикла изготовления изделия и тем самым позволяет ускорить выход нового изделия на рынок.

АО «Электропривод» при разработке нового электропривода авиационного назначения столкнулось с необходимостью изготовления корпусной детали из титанового сплава с заданными конструктивными особенностями в виде тонких стенок (менее 3 мм) и сложной формы (рис. 3а). Увеличение толщины стенок было невозможно ввиду необходимости сохранения заданной массы изделия и его габаритов.

Предприятия-изготовители титановых отливок на российском рынке гарантируют

качество продукции только при величине стенки от 3 мм [8].

АО «Электропривод» было принято решение провести сравнительный анализ изготовления детали альтернативными способами и рассмотреть особенности подходящих методов изготовления.

Традиционное и аддитивное производства имеют преимущества и недостатки, проявляемые в каждом конкретном случае. Они определяются совокупностью факторов, среди которых:

- цели применения;
- объем партии;
- срочность исполнения заказа;
- размеры и геометрические параметры детали;
- используемый материал;
- требования к обработке и др.

Проанализировав возможности поставщиков услуг по 3D-печати, было принято решение обратиться в лабораторию аддитивных технологий при Самарском национальном исследовательском университете имени академика С. П. Королёва за изготовлением образца корпусной детали. На рис. 3б показана готовая корпусная

деталь, изготовленная методом 3D-печати. На рис. 3в данная деталь проходит контроль на координатно-измерительной машине.

Параллельно АО «Электропривод» осуществило подготовку производства и изготовление такой же корпусной детали на собственной производственной базе традиционным способом.

Сравнение результатов изготовления корпусной детали представлено в таблице 2.

Изготовление корпусной детали методом 3D-печати позволило сократить трудоемкость изготовления детали в пять раз и время изготовления готовой детали – почти в 10 раз с учетом отсутствия необходимости изготовления средств технологического оснащения и заказа специального инструмента для обработки титановых сплавов.

Применение метода 3D-печати для получения детали позволило исключить дефекты, присущие классическому изготовлению (дефекты литья – непроливы, раковины, пористость), и решить конкретные технологические задачи изготовления детали с особенностью конструкции в виде тонких стенок менее 3 мм.

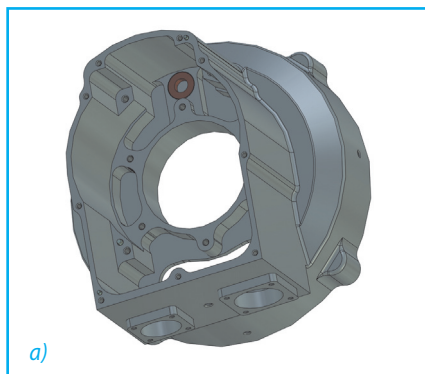


Таблица 2. Сравнение результатов изготовления корпусной детали

Характеристика	Изготовление из титановой плиты	Изготовление методом 3D-печати
Изготовление стенки менее 3 мм	Возможно	Возможно
Масса заготовки, кг	15,9	1,7
Сравнительная трудоемкость получения готовой детали	100%	20%
Время изготовления готовой детали	8–10 рабочих смен + время на изготовление средств технологического оснащения (СрТО)	Две рабочие смены
Дополнительные затраты	СрТО, хранение	Отсутствуют

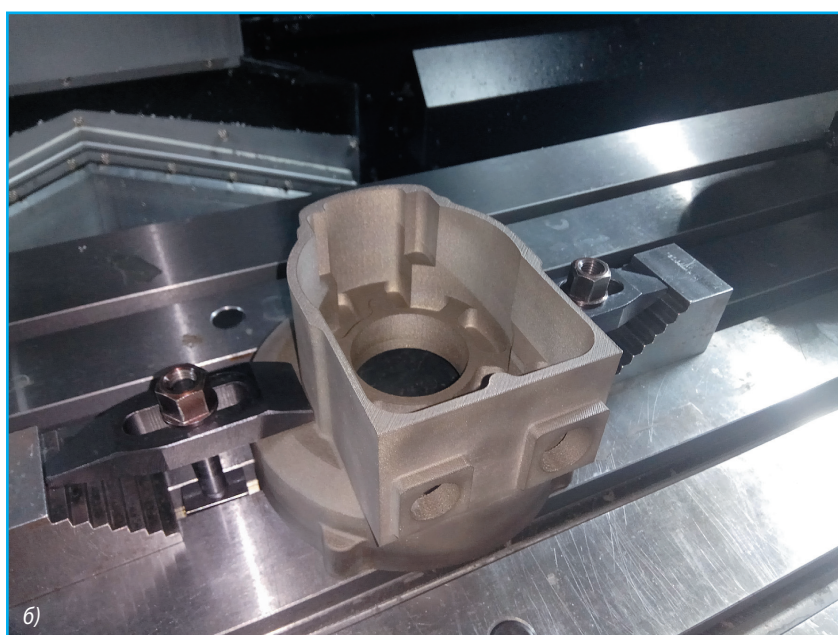


Рис. 3. Корпусная деталь: изготовление из титановой плиты (а), изготовление методом 3D-печати (б); контроль на координатно-измерительной машине детали, изготовленной методом 3D-печати (в)

Литература

1. Гончарова О.Н., Бережной Ю.М., Бессарабов Е.Н., Кадамов Е.А., Гайнутдинов Т.М., Нагопетьян Е.М., Ковина В.М. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство // Научная электронная библиотека «Киберленка». URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/additivnye-tehnologii-dinamichno-razvivayusheesya-proizvodstvo> (дата обращения: 25.04.2020).
2. Развитие 3D-печати: от революции к эволюции: [Электронный ресурс] // URL: <https://vc.ru/flood/43403-razvitie-3d-pechati-ot-revolyuicii-k-evolyucii> (дата обращения: 25.04.2020).
3. Рынок 3D-печати в России и мире (аддитивное производство, АП / Additive Manufacturing, AM), 2018: [Электронный ресурс] // URL: https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056 (дата обращения: 25.04.2020).
4. 3Dpulse.ru – проект группы «Текарт»: [Электронный ресурс] // URL: <https://www.3dpulse.ru/> (дата обращения: 25.04.2020).
5. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов: [Электронный ресурс] // URL: <https://viam.ru/> (дата обращения: 25.04.2020).
6. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации: [Электронный ресурс] // URL: <http://minpromtorg.gov.ru/> (дата обращения: 25.04.2020).

7. Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Технико-экономические аспекты аддитивного формообразования // Научные технологии в машиностроении, 2016, № 7, с. 28–35.

8. АО «Зеленодольский завод им. А.М. Горького», 1895–2020: [Электронный ресурс] // URL: <http://www.zdship.ru/> (дата обращения: 25.04.2020).

Филиппов Михаил Алексеевич

Родился в 1990 году. В 2012 году окончил ВятГУ по специальности «Технология машиностроения». Опыт работы в области машиностроения – 6 лет. В настоящее время работает инженером-технологом 2-й категории АО «Электропривод».

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил ВятГУ по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 17 лет. В настоящее время работает генеральным директором – главным конструктором АО «Электропривод». Имеет 41 научную публикацию.

Садаков Николай Александрович

Родился в 1970 году. В 1993 году окончил ВятГУ по специальности «Технология ма-

шиностроения». Опыт работы в области машиностроения – 26 лет. В настоящее время работает главным технологом АО «Электропривод».

Filippov Mikhail

Was born in 1990. In 2012 he graduated from Vyatka State University with a degree in “Engineering Technology”. Work experience in the field of mechanical engineering is 6 years. At present he works as a category 2 process engineer of JSC “Electroprivod”.

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in “Electric engineering”. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic “Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft”. Experience in the field of aviation electric machines – 15 years. At present he works as general director – chief designer of JSC “Electroprivod”. He has 41 scientific publications.

Sadakov Nikolai

Was born in 1970. In 1993 he graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specialization in “Mechanical engineering”. His work experience in mechanical engineering 26 years. At present he works as production manager of JSC “Electroprivod”.

Меры по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий

// Reliability measures at the stages of design, production and operation of products //

Трефилова Т. А., Бирюкова Г. А.,
АО «Электропривод», Киров

В статье представлен материал о мерах по обеспечению надежности на этапах проектирования, производства и эксплуатации изделий. Рассмотрена количественная оценка показателей надежности на этапе проектирования и этапе эксплуатации на примере электрической машины. Результаты расчета подтверждены статистическими данными и данными по результатам эксплуатации.

Ключевые слова: надежность, проектирование, эксплуатация, отказы, оценка надежности, задачи надежности.

The article presents material on measures to ensure reliability at the stages of design, production and operation of products. A quantitative assessment of reliability indicators at the design stage and at the operation stage is considered on the example of an electric machine, the calculation results are confirmed by statistical data, and data on operating results.

Keywords: reliability, design, operation, failures, reliability assessment, reliability tasks.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Оценку соответствия изделий заданным требованиям к надежности осуществляют при проектировании, производстве и эксплуатации.

Проектирование является первым и основным этапом, на котором закладывается определенный уровень надежности изделия. Процесс проектирования и отработки надежности изделий состоит из нескольких этапов: подготовительного, расчетно-конструкторского, изготовления опытных образцов, экспериментальной проверки и устранения выявленных недостатков.

Для обеспечения надежности проектируемого изделия на подготовительном этапе разрабатываются количественные требования к надежности, определяются типы комплектующих изделий и узлов, виды используемых материалов и защитных покрытий, анализируются условия эксплуатации. При решении перечисленных задач весьма важную роль играют сокращение количества деталей, узлов и элементов; жесткий контроль за разработкой отдельных комплектующих изделий и элементов; облегчение режимов используемых комплектующих и узлов.

Меры по обеспечению надежности

Основные методы обеспечения надежности на этапе проектирования изделий

1. Количественные показатели надежности задаются в технических требованиях на проектирование изделия, исходя из

особенностей работы данного изделия в системе и его ответственности. Приступая к созданию любого изделия, конструктор должен знать, какие функции оно будет выполнять, в каких условиях работать, какие требования предъявляются к его надежности. Незнание конкретных условий эксплуатации нередко приводит к грубым просчетам и в конечном итоге к снижению надежности изделий. Проектируя любую машину, конструктор обязательно должен учитывать технологичность изделия, то есть его приспособленность к серийному производству, удобству изготовления.

2. Надежность и долговечность любого нового образца изделия в значительной степени зависит от материала. При выборе материалов конструктор должен учитывать, чтобы они обеспечивали необходимые механические и электрические характеристики изделия во всем диапазоне эксплуатационных условий. Используемые материалы должны иметь такую скорость старения, при которой будет обеспечен необходимый технический ресурс и необходимый срок хранения изделий.

3. Важнейшая задача каждого конструктора – обеспечить такие условия, чтобы все узлы и детали работали в строго определенных режимах. При этом нужно учитывать, что увеличение нагрузки выше номинальной резко сокращает срок службы деталей, а использование элементов, узлов и деталей в облегченном и «разгруженном» режиме ведет к значительному увеличению производительности его исправной работы.

4. Непосредственно на надежность влияют тип конструкции, тип монтажа, тепловой режим, меры защиты как от механических

воздействий (вибрация, удары), так и защите программным обеспечением и др. Косвенное влияние на надежность изделия оказывают удобство применения и технического обслуживания, ремонтпригодность, унификация узлов и деталей, автоматизация производства и др.

5. При выборе конструкции изделия конструктор должен также определить и обосновать оптимальные сроки службы уже использованных узлов и деталей и произвести разбивку их на группы с близкими или кратными сроками службы. При таком методе проектирования обеспечивается равнопрочность определенных групп деталей и узлов, позволяющая получить изделие с наибольшей надежностью и эффективностью, с большим сроком службы до его ремонта. Равнопрочность обеспечивает значительное сокращение расходов на ремонт и эксплуатацию.

6. Наряду с улучшением качества отдельных узлов и деталей большое значение приобретает создание надежных устройств из менее надежных элементов, принимая методы резервирования. В теории надежности рассматриваются два возможных вида соединения элементов или узлов: последовательное и параллельное. Последовательным называют такое соединение, при котором отказ в работе хотя бы одного элемента или узла приводит к отказу изделия в целом. Это наиболее характерный и распространенный вид соединения для большинства изделий. Параллельным, или резервным, соединением элементов (узлов, агрегатов) в теории надежности считается такое соединение, при котором отказ изделия наступает только в случае выхода из строя всех параллельно включенных элементов. Следовательно, резервирование – это способ повышения надежности изделия путем включения в схему или конструкцию ряда параллельных, резервных элементов или узлов. Нужно иметь в виду, что резервирование усложняет изделие, удорожает его обслуживание, содержание и ремонт, поэтому не всегда экономически выгодно. Использовать методы резервирования целесообразно лишь после того, как исчерпаны все остальные, более простые способы повышения надежности.

7. Важным эксплуатационным требованием к изделиям является удобство технического обслуживания и восстановления, поэтому конструкция изделия должна предусматривать легкий и свободный доступ к его элементам, исключающий повреждение

других элементов при замене отказавших или при регламентных работах, обеспечивать простоту операций при настройке и регулировке.

8. Автоматизированный контроль за работой отдельных узлов в процессе эксплуатации позволяет по изменениям параметров проверяемого узла прогнозировать отказ и заранее принять меры по его предупреждению.

9. Необходимо тщательно производить опытную отработку изделия и всесторонние испытания, в том числе на надежность узлов и всего изделия. Целью испытаний опытных образцов является выявление слабых узлов, недостаточная надежность которых обусловлена ошибками проектирования. Испытания опытных образцов, с одной стороны, являются средством проверки эффективности принятых мер при проектировании, а с другой стороны – средством отработки надежности изделия при воздействии различных факторов. Тщательность отработки новой конструкции во многом определяется объемом проведенных испытаний.

10. Предусматривать предварительную приработку элементов и узлов до поставки их в изделие. Во многих изделиях наибольшее число отказов приходится на начальный период их работы. В этом периоде выявляются наиболее слабые места, их недостатки. Применение приработки позволяет выявить недостатки изделия еще на заводе, а не у потребителя.

11. Производить опытную эксплуатацию изделия до передачи его в серийное производство. Проведение опытной эксплуатации позволяет выявить недостатки изделия и принять меры к их своевременному устранению. Процесс проектирования предопределяет величину надежности изделий, однако реализация этой величины в значительной степени связана с организацией производства. Процесс производства должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить использование предусмотренных конструктором материалов, деталей, допусков и, следовательно, предусмотренных конструктором значение надежности.

На АО «Электропривод» надежность вновь разрабатываемых изделий подтверждается аналитическим расчетом надежности, проводятся ориентировочный расчет – по изделиям-аналогам; предварительный – по аналогам и с учетом начальных данных при разработке; уточненный расчет надежности проводится с учетом условий и режимов работы изделия на основе разработанных конструкторских документов. Показатели надежности электрических машин рассчитываются в соответствии с [1] (данный документ был разработан при участии специалистов АО «Электропривод»), расчет надежности электрорадиоизделий осуществляется с помощью программ «Автоматизированная система расчета надежности ЭРИ». Количественный анализ безотказности при

проектировании систем должен проводиться в соответствии с [2] табличным методом или методом логических схем.

Испытания на надежность опытных образцов вновь разрабатываемой (или модернизируемой) аппаратуры проводятся как самостоятельный вид испытаний на специально выделенных образцах по программе в соответствии с [3], [4], [5].

Обеспечение надежности в процессе производства достигается путем строгого соблюдения и совершенствования технологии производства, применения предварительных тренировок (приработок) узлов и элементов до постановки их в изделие. Качество производства изделий и их надежность во многом зависят от уровня технологических процессов и степени их автоматизации. Любое отклонение техпроцесса от нормы вызывает отклонение каких-либо параметров или свойств изделий. Неточное соблюдение режимов обработки материалов и деталей, пропитки, сушки, монтажно-сборочных работ и других производственных операций сначала может не вызывать заметных отклонений выходных параметров от норм, но впоследствии неизбежно приведет к сокращению сроков службы изделий и снижению их надежности. Необходимо поддерживать и увеличивать уровень культуры производства, организовывать тщательный контроль соответствия стандартам и ТУ сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий. Необходима организация как тщательного контроля технологического процесса на всех стадиях, так и тщательный выходной контроль готовых изделий.

Значительное влияние на надежность изделий в процессе их эксплуатации оказывают факторы субъективного характера, связанные с деятельностью обслуживающего персонала.

Обеспечение надежности при эксплуатации достигается путем повышения квалификации обслуживающего персонала, организации квалифицированного технического обслуживания и технической эксплуатации изделий, проведения профилактик и ремонта изделий, обеспечения запасными частями. Влияние квалификации обслуживающего персонала сказывается главным образом на качестве подготовки изделий к работе, его монтажу и на процессе восстановления работоспособности после отказов. Решающее значение в подготовке обслуживающего персонала имеет доскональное знание изделий, с которыми они имеют дело. В связи с этим следует обращать серьезное внимание на качество технической документации, сопровождающей изделие (описания, инструкции).

Обеспечение надежности при эксплуатации также достигается организацией системы сбора и анализа статистических данных о надежности эксплуатируемой техники и разработки рекомендации по повышению надежности изделий, узлов и элементов. Сбор и анализ эксплуатационной информации имеет большое практическое

значение – это помогает совершенствовать конструкции и технологию производства изделий, систему их эксплуатации.

Статистический анализ отказов в АО «Электропривод» проводится в соответствии с [6], [7], [8]. Информация по неисправностям изделий из эксплуатации поступает в бюро надежности для анализа неисправностей и расчета показателей безотказности.

К основным источникам информации относятся:

- акты исследования о причинах дефекта изделий серийного завода;
- акты исследования изделий предприятия;
- сводные отчеты предприятия «Неисправности изделий в эксплуатации» за год;
- карточки учета неисправностей.

Информация о применяемости изделий, модернизации, ресурсах и сроках службы, результатах испытаний, доработках в эксплуатации по бюллетеням и решениям, сведениям по отказам изделий в эксплуатации, конструктивных или технологических рекомендациях по повышению надежности формируются и накапливаются в Техническом паспорте изделия. Результаты анализов отказов используют при проведении работ по продлению ресурсов и сроков службы, при расчете показателей безотказности изделий, а также при выполнении анализа вида и последствий отказа (АВПО, FMEA (Failure mode and effects analysis), анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО, FMECA (Failure mode, effects and criticality analysis), анализа дерева неисправности (FTA, Fault tree analysis).

На предприятии разработаны бюллетени, в которых приведены обобщенные статистические данные об эксплуатационной надежности авиационных электромеханизмов, их узлов, деталей, элементов, полученные по результатам эксплуатации на объектах авиационной техники.

Бюро надежности выполняются работы по установлению и повышению технических ресурсов и сроков службы серийных изделий в соответствии с [9] на основе результатов лабораторных испытаний или результатов эксплуатации. За последние несколько лет изделиям нашей разработки, как электромеханизмам, так и аппаратуре, были продлены сроки службы до 35–40 лет с учетом проведения капитальных ремонтов, что подтверждает проверку теории надежности длительным сроком эксплуатации.

Все разработанные методы подтверждения надежности и сейчас используются при проектировании новых изделий и систем.

Спроектированное, тщательно изготовленное, детально испытанное и правильно эксплуатируемое изделие не должно отказывать в работе. Однако опыт показывает, что даже наилучшие конструкции изделий, современная технология их изготовления и правильная эксплуатация не исключают полностью возникновения отказов в работе.

Теория надежности различает три характерных типа отказов:

1. Приработочные отказы – это отказы, которые происходят в течение раннего периода эксплуатации машины вследствие несовершенной технологии производства. Приработочные отказы можно устранять путем предварительных испытаний машин перед вводом ее в эксплуатацию, о чем говорилось ранее.

2. Износосвые отказы – это отказы, вызываемые износом отдельных частей изделия, они являются признаком старения. Износосвые отказы могут быть ограничены путем своевременной замены изнашивающихся деталей во время регламентного обслуживания изделия или ремонта.

3. Внезапные отказы в период нормальной эксплуатации изделия, которые могут возникнуть случайно и не могут быть устранены ни наладкой, ни наилучшим обслуживанием. Эти случайные отказы подчиняются определенным общим закономерностям, и их интенсивность в течение достаточно большого периода эксплуатации машины примерно постоянна.

Каждый из этих отказов характеризуется особым статистическим распределением во времени: приработочные отказы – распределением Вейбулла, случайные (внезапные) – экспоненциальным распределением, износосвые – нормальным распределением Лапласа. При количественной оценке надежности изделия используются все перечисленные статистические методы и вероятностные расчеты.

Количественная оценка показателей надежности на примере электрической машины

Рассмотрим количественную оценку показателей надежности на этапах проектирования и эксплуатации на примере электрической машины.

Оценка надежности электрической машины на этапе проектирования

Надежность электрической машины, как сложного устройства, зависит от надежности ее составных частей: обмоток ротора и статора, шарикоподшипников, щеточно-коллекторного узла и др.

На этапе проектирования производится оценка конструкционной надежности, то есть оценка рациональности выбора данной конструкции, оценка надежности примененных в ней узлов и деталей, производится расчет количественных показателей безотказности проектируемого изделия.

Расчет вероятности безотказной работы электрической машины при условии независимости отказов производится согласно [1] по формуле:

$$P_{ЭМ}(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t), \quad (1)$$

где $P_{ЭМ}(t)$ – вероятность безотказной работы i -того узла;

t – время работы;

m – количество основных узлов. Как указывалось выше, при расчете электрической машины необходимо рассмотреть следующие узлы: шарикоподшипниковый, обмоточный, щеточно-коллекторный, встроенные вентильные коммутаторы, прочие узлы и детали.

Оценка надежности электрической машины на этапе эксплуатации

Расчет показателей безотказности по результатам эксплуатации на объектах авиационной техники производится по информации о неисправностях изделия и по наработкам объектов за рассматриваемый период времени. При расчете показателей безотказности учитываются неисправности изделий, отказавших в пределах технического ресурса до первого ремонта, а для ремонтных изделий – в пределах межремонтного ресурса. Не учитываются неисправности изделий, отказавших по вине эксплуатации. Нарботка на отказ, приводящая к досрочному съему изделия (MTBF, Mean (operating) time between failures), рассчитывается согласно [6] по формуле:

$$T_{ДС} = \frac{t_{\Sigma} \cdot m}{n}, \quad (2)$$

где t_{Σ} – суммарная наработка рассматриваемой совокупности объектов;

m – количество одноименных изделий, устанавливаемых на рассматриваемом объекте;

n – суммарное количество отказов рассматриваемых изделий. Проведем сравнение количественных показателей конструкционной и эксплуатационной надежности на примере генератора, разработанного на нашем предприятии, входящего в состав системы энергоснабжения противоблестенительной системы вертолетов.

В 1980-х годах появилась необходимость модернизировать один из ранее разработанных генераторов, техническое задание на разработку передали на наше предприятие. Модернизация была проведена с целью повышения надежности работы щеточно-коллекторного узла. В нем увеличено число щеток с 2 до 4 на фазу.

Вероятность безотказной работы генератора за 1 час работы, рассчитанная на этапе проектирования, получилась равной 0,99997823. Нарботка на отказ, приводящая к досрочному съему изделия, равна 45 934 ч. Нарботка на отказ, рассчитанная по результатам эксплуатации, получилась равной 306 700 ч.

По результатам эксплуатации наработка на отказ получилось примерно в семь раз выше, чем расчетная. Это объясняется тем, что при расчете конструкционной надежности учитываются предельные величины температур нагрева узлов и деталей, допуски на размеры, обороты и нагрузки, то есть рассчитываем наихудший вариант.

Величина ресурса до первого ремонта определяется по формуле:

$$\tau = \rho \cdot T_{ДС}', \quad (3)$$

где τ – ресурс до первого ремонта;

$0 < \rho < 1$;

$T_{ДС}'$ – наработка на отказ.

При заданной вероятности выявления раннего отказа изделия при экспоненциальном законе распределения величина ресурса до первого ремонта определяется по формуле:

$$\tau = -T_{ДС}' \ln(1 - q), \quad \text{то есть} \quad (4)$$

$$\rho = -\ln(1 - q), \quad (5)$$

где q – заданная вероятность выявления раннего отказа изделия, принимаем 0,01.

При экспоненциальном законе распределения величина ресурса до первого ремонта ориентировочно равна 3000 ч. Изначально для данного генератора был установлен ресурс 1500 ч. Учитывая расчетные данные и требования на объект, по результатам эксплуатации межремонтный ресурс был установлен 2000 ч.

Также в процессе эксплуатации генераторов предусмотрено проведение технического обслуживания, в том числе пополнение смазки в шарикоподшипниковых узлах и измерение высоты щеток. Предприятием-разработчиком проводились работы по проверке ремонта генераторов на ремонтных заводах, авторский надзор выполнения регламентных работ по щеткам и подпитке шарикоподшипников на вертолетах в эксплуатации.

В 2019 году для данных генераторов был установлен назначенный ресурс 20 000 ч. Результаты работ по исследованию генераторов с максимальными наработками были положительными. На этом основании был продлен назначенный ресурс, что подтверждает: на предыдущих этапах жизненного цикла данного изделия все меры по обеспечению надежности были проведены.

Постоянное обеспечение высокого технического уровня разработок, качества и надежности выпускаемых изделий – основные задачи, которые стояли и будут стоять перед коллективами предприятий, разрабатывающих и выпускающих продукцию.

Выводы

Внедренная в практику система анализа надежности изделий как по качественным, так и по количественным показателям позволяет:

- технически обоснованно разрабатывать конструктивные мероприятия по исключению повторяющихся дефектов в производстве и в ряде случаев – по доработкам непосредственно в эксплуатации;
- следить за динамикой изменения надежности изделий или отдельных его элементов;
- прогнозировать надежность при проектировании новых изделий.

В статье использовались данные из опыта работы бюро надежности АО «Электропривод» с 1962 года, года создания данного отдела на предприятии, по настоящее время.

Литература

1. ОСТ 100151–88 Машины электрические авиационные. Методы расчета количественных показателей безотказности.
2. ОСТ 100132–97 Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов.
3. ОСТ 101204–2012 Надежность изделий авиационной техники. Эквивалентно-циклические испытания на безотказность авиационного оборудования.
4. ГОСТ РВ 20.57.304–98 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям надежности.
5. МУ 2Н-924 Методические указания по ведению испытаний на надежность в технические условия бортовых электротехнических изделий.
6. ОСТ В100094–73 Надежность изделий авиационной техники. Методы анализа безотказности по данным эксплуатации.

7. ОСТ 100146–74 Надежность изделий авиационной техники. Система сбора и обработки информации. Порядок учета. Показатели. Виды обработки. Состав функциональных групп.
8. ОСТ 100156–75 Надежность изделий авиационной техники. Классификаторы признаков неисправностей.
9. ГОСТ РВ 15.702–94 Военная техника. Порядок установления и продления назначенных ресурса, срока службы, срока хранения.

Трефилова Татьяна Александровна

Родилась в 1990 году. В 2013 году окончила ВятГУ по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы в области надежности авиационных электроприводов – 6 лет. В настоящее время работает начальником Бюро надежности АО «Электропривод».

Бирюкова Галина Андреевна

Родилась в 1949 году. В 1972 году окончила Кировский политехнический институт по

специальности «Электрические машины и аппараты». Опыт работы в области надежности авиационных электроприводов – 48 лет. В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором АО «Электропривод».

Trefilova Tatyana

Was born in 1990. In 2013 she graduated from Vyatka State University with a degree in “Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes”. Work experience in the field of reliability of aviation electric drives is 6 years. At present she works as the head of the reliability bureau of JSC “Electroprivid”.

Biryukova Galina

Was born in 1949. In 1972 she graduated from the Kirov Polytechnic Institute with a degree in “Electrical Machines and Devices”. Work experience in the field of reliability of aviation electric drives is 48 years. At present she works as a leading design engineer of JSC “Electroprivid”.

Проблемы воспроизводимости вибрационных испытаний

// Vibration test reproduction problems //

Бушуев А. П., Гусев С. В.,
АО «Электропривод», Киров

Данная статья написана с целью раскрыть и показать основы такого инженерного направления, как вибрационные испытания. Основной упор в статье делается на рассмотрение вопросов воспроизводимости результатов вибрационных испытаний. Статья в первую очередь ориентирована на специалистов-практиков, также будет полезна разработчикам конструкции машин и аппаратов, разработчикам приспособлений для испытаний на воздействие вибрации, производственным службам – изготовителям данных приспособлений. Затронуты вопросы качества продукции.

Ключевые слова: испытания на вибрацию, амплитудно-частотная характеристика, виброгенератор, качество.

Вибрация встречается во всех сферах машиностроения, в том числе в отраслях авиационной и военной техники. Источником вибрации являются движущие механизмы, совершающие поступательные и вращательные действия. Воздействие вибрации на изделие является одним из важных факторов, оказывающих негативное влияние на характеристики, прочностные показатели и долговечность. Проведение вибрационных испытаний на этапах опытно-конструкторских работ (ОКР) позволяет избежать ряда проблем при дальнейшей эксплуатации. Очень важно для полноценного контроля качества и оценки стабильности характеристик изделия соблюдать чистоту эксперимента и повторяемость воздействий с момента первых положительных результатов вибрационных испытаний.

Вибрационные испытания являются одними из сложных видов испытаний, требующих наличия специфического комплекса оборудования: испытательного стенда, оснастки, набора контрольно-измерительной аппаратуры, а также специалистов, обладающих компетенциями, знаниями и опытом в области вибрации.

Испытательный стенд представляет собой вибрационную установку, состоящую

This article is written with the aim of revealing and showing the basics of such an engineering direction as vibration testing. The main focus of the article is on the consideration of reproducibility of vibration test results. The article is primarily aimed at practitioners, it will also be useful to developers of machinery and apparatus designs, developers of vibration test devices, production services – manufacturers of these devices. Issues of product quality are raised.

Keywords: vibration test, frequency response, vibration generator, quality.

из виброгенератора, посредством которого моделируется механическая вибрация, присутствующая на объекте эксплуатации, усилителя мощности и системы управления. Исследуемое изделие устанавливается через переходное приспособление (оснастку) на виброгенератор.

Основные этапы вибрационных испытаний следующие:

- определение резонансов конструкции и ее элементов. Данный этап позволяет выявить слабые места изделия без физического разрушения и оценить готовность к следующим этапам вибрационных испытаний;

- вибропрочность – позволяет оценить способность изделия противостоять разрушающему воздействию вибрации и сохранять характеристики. В данном случае изделие находится в стадии готовности к выполнению основных тактико-технических задач, ожидая сигналов управления, задания;

- виброустойчивость – позволяет оценить способности изделия выполнять функции и сохранять свои

характеристики при воздействии вибрации. При этих испытаниях изделие функционирует в номинальном режиме, подвергаясь воздействию вибрации в соответствии с требованиями ТЗ.

На начальном этапе вибрационных испытаний посредством вибродатчиков, установленных на элементах и узлах изделия, регистрируется вибрационный отклик на возмущение – определяется амплитудно-частотная характеристика (далее АЧХ) изделия. Определение резонансных частот (АЧХ) изделия является важной и определяющей характеристикой для продолжения испытаний [1].

Из опыта проведения вибрационных испытаний замечен тот факт, что по прошествии времени при проведении повторных испытаний полученные значения АЧХ изделия не соответствуют измеренным ранее, имеет место изменение АЧХ изделия.

Далее рассмотрим причины появления нестабильности воспроизводимости результатов испытаний.

Исследуемое изделие. Изделие состоит из множества конструктивных элементов, которые, в свою очередь, имеют собственные резонансные частоты, влияющие друг на друга. Точность изготовления элементов конструкции, непостоянство межэлементных зазоров – все это сказывается на изменчивости АЧХ изделия.

Приспособление. Цель приспособления – передать вибрации от стола виброгенератора к изделию без искажения.

Можно выделить несколько основных факторов, влияющих на результат воспроизведения вибрации.

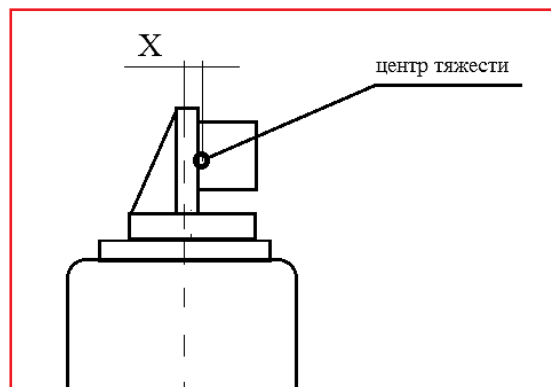


Рис. 1. Расположение изделия и оснастки на виброгенераторе

Совпадение центра масс приспособления с изделием с осью виброгенератора – наличие смещения центра масс от продольной оси создает момент в продольной плоскости стола виброгенератора (рис. 1) [2].

Возникающие поперечные знакопеременные нагрузки нагружают конструктивные элементы вибростенда, повреждая их. Идет «раскачка» приспособления с изделием, которое, в свою очередь, подвергается неконтролируемым поперечным перегрузкам, зачастую превышающим нормы задания. В техническом описании на виброгенератор, как правило, указывается поперечная жесткость системы (С). Имея координаты центра масс нагрузки, можно оценить влияние возникающего поперечного момента на виброгенератор. Расчет поперечных моментов и влияния их на виброгенератор указан ниже.

Статический момент

$$M_{\text{стат}} = X m a_{\text{св}}$$

Динамический момент

$$M_{\text{дин}} = X m a.$$

Суммарный момент

$$M_{\text{сум}} = M_{\text{стат}} + M_{\text{дин}}$$

Оценка допустимости момента

$$M = C - M_{\text{сум}}$$

где X – расстояние от центра тяжести нагрузки до оси виброгенератора, м;

m – масса испытуемого объекта, кг;

$a_{\text{св}}$ – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

a – испытательное ускорение, m/c^2 ;

C – поперечная жесткость системы, Нм.

При $M > 0$ поперечный момент находится в пределах требований; при $M < 0$ возникающий момент превышает поперечную жесткость системы, возможны повреждения виброгенератора.

В случае сложносоставного приспособления не так все прозрачно. Элементы конструкции сложносоставного приспособления имеют собственные массы и нелинейные АЧХ. При испытаниях по мере изменения частоты синусоидальной вибрации конструктивные элементы приспособления могут резонировать, будет наблюдаться относительное смещение «динамического центра тяжести» [3], что также приведет к нежелательным воздействиям поперечных составляющих на изделие и виброгенератор.

Приспособление должно быть спроектировано таким образом, чтобы его жесткость была достаточной для удержания объекта испытаний, имеющего массу, вместе с знакопеременным ускорением. С точки зрения технологии изготовления наиболее верным считается изготовление приспособлений из цельного куска материала, но, как правило, ввиду ограниченных мощностей предприятий при изготовлении сложного приспособления предпочтение отдается применению болтового соединения элементов конструкции, либо соединяют на сварку. Данные соединения обладают рядом отрицательных свойств: при болтовом креплении

жесткость соединения намного ниже, чем при сварке, со временем она еще снижается ввиду ослабления крепления. Соединение сваркой лишено таких проблемных свойств, но вследствие сварочных работ возникают мощные механические напряжения [4]. Такие напряжения практически во всех конструктивных материалах присутствуют в течение всего эксплуатационного периода. Они представляют наибольшую опасность для изделий, так как являются причиной изменения габаритов и формы деталей. Существующие мероприятия по снятию внутренних напряжений (термообработка, механическая и термическая правка) не всегда дают тот результат, который необходим для применения приспособления на вибрацию, поскольку возникающая неплоскостность посадочной поверхности может являться причиной возникновения резонансов конструкции. Сварное приспособление требует периодического контроля геометрических размеров с последующим проведением ремонтно-восстановительных работ, что не всегда возможно ввиду ограниченных производственных мощностей предприятия по технологическим причинам.

Виброгенератор. Конструктивно виброгенератор электродинамического стенда состоит из динамической катушки, установленной на специальной подвеске. Задача подвесов – позволить перемещаться динамической катушке со столом вдоль оси виброгенератора в широком частотном диапазоне, одновременно зафиксировав в поперечных направлениях.

Как и любой материал, подвесы имеют ограниченную прочность. Со временем эксплуатации они теряют прочностные свойства и дают возможность катушке перемещаться в поперечных направлениях. Критерием годности вибростендов является метрологическая аттестация – подтверждение характеристик. Согласно ГОСТ 25051.4–83 за критерий оценки поперечных составляющих принимается «коэффициент поперечных составляющих», который не должен превышать 25% от заданного уровня – это не малый процент допустимого отклонения. Заметим также, что при аттестации используется нагрузка цилиндрической формы (отношение высоты к диаметру от 0,4 до 1), что никогда не будет соответствовать реальным условиям испытаний [5].

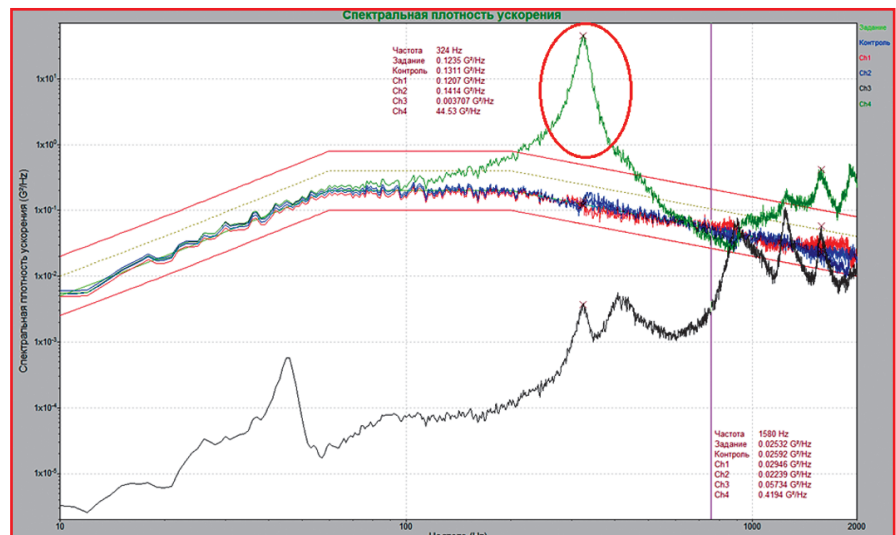


Рис. 2. АЧХ изделия, установленного на вибростенд TIRA vib мощностью 55 кВт

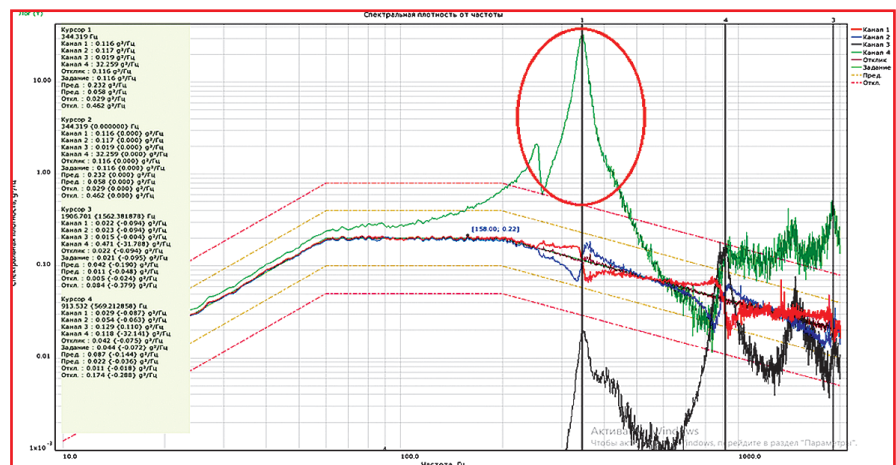


Рис. 3. АЧХ изделия, установленного на вибростенд ETS Solutions мощностью 20 кВт

Для примера рассмотрим испытание изделия на двух различных вибростендах мощностью 55 кН и 20 кН. Изделие представляет собой электромеханизм, который крепится к плоскости приспособления фланцем. Приспособление – угольник, изготовленный из цельного куска алюминиевого сплава. Общий центр масс системы приспособление-изделие проходит через ось вибростенда, но центр масс самого изделия не совпадает с осью вибростенда.

При воздействии вибрации изделие будет входить в резонанс с возникновением многократной перегрузки на резонансной частоте, центр масс системы приспособление-изделие будет смещаться. Возникающий поперечный момент будет взаимодействовать с конструктивными элементами вибростенда.

Ниже на графиках зеленой кривой представлен отклик изделия, полученный на консоли (рис. 2 и 3).

Из графиков можно заметить, что резонансные частоты и пиковые значения откликов изделия фактически отличаются.

Рассмотрев ряд причин нестабильности воспроизводимости результатов, можно сделать один общий вывод – подвижный стол виброгенератора (подвижная катушка), переходное приспособление, объект испытаний следует рассматривать как единую систему [6]. Любое изменение в конструкции системы может вызвать изменение амплитудно-частотной характеристики в любой ее точке. Кроме вышеописанных причин на результаты испытаний оказывает влияние погрешность средств измерений (система управления + датчик), правильная настройка системы управления (квалификация оператора).

Исходя из сказанного выше, можно сформировать следующие рекомендации для получения объективного результата и повторяемости:

1. Сравнительные испытания по определению АЧХ необходимо проводить на одном и том же или идентичном по характеристикам вибростенде.

2. Центр масс приспособления и изделия должны строго совпадать с продольной осью виброгенератора.

3. При испытаниях следует вести контроль поперечных ускорений с целью не перегрузить как изделие, так и виброгенератор.

4. Применять при разработке продукции средства компьютерного моделирования CAE (Computer Aided Engineering), системы для расчетов конструкции методом конечных элементов.

Использование систем инженерного анализа позволяет выявить возможные недостатки изделия и найти его оптимальный вариант конструкции до начала изготовления, значительно снизить расходы на проектирование и изготовление, повысить качество продукции. Наиболее распространенными системами считаются ANSYS, IDEAS,

T-FLEX Анализ и T-FLEX Динамика, APM FEM, NASTRAN.

Например, пакет ANSYS сопрягается с CAD (Computer Aided Design) системами NX, CATIA, Solid Edge, Solid Works, Autodesk Inventor. CAE системы T-FLEX Анализ и T-FLEX Динамика интегрированы в T-FLEX CAD, а библиотека APM FEM интегрирована с КОМПАС-3D.

Можно выделить основные функции CAE-систем, необходимые для анализа механического поведения компьютерной модели изделия:

- анализ собственных частот – позволяет осуществлять расчет собственных (резонансных) частот конструкции и соответствующих форм колебаний. Результаты используются для повышения надежности и работоспособности изделия в условиях, исключающих возникновение резонансов;

- анализ вынужденных колебаний – позволяет получить зависимости отклика системы от частоты вынуждающих воздействий – силовых и/или кинематических, изменяющихся по гармоническому закону. По результатам расчета для диапазона частот могут быть получены зависимости амплитуд и виброускорений от частоты вынуждающих воздействий, что важно при оценке виброустойчивости системы в заданном диапазоне частот;

- анализ напряженно-деформированного состояния и динамических процессов – позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние механической системы под действием постоянных и изменяющихся во времени силовых и кинематических нагрузок.

Такие системы являются идеальным инструментом для прогнозирования поведения механической системы, но обладают рядом недостатков.

Компьютерная модель не может включать в себя все возможные варианты и условия поведения определенных узлов и компонентов. Для упрощения математической модели принимают определенные допущения, которые не должны оказывать существенное влияние на работу механических систем. Но, к сожалению, в реальной работе изделие может вести себя немного по-другому. Например, компьютерная модель не сможет просчитать, как поведет себя изделие в случае наличия в материале микротрещин или, имея сложную многосоставную конструкцию, наличия напряженных зон в сварочном шве и т.д. Все это может привести к совершенно иному распределению нагрузки в конструкции. В этом случае экспериментальные и смоделированные данные будут иметь отличия.

5. Следить за состоянием чистоты посадочных поверхностей и отсутствием неплюскостности.

6. Перед испытаниями определить АЧХ приспособления, используя, по возможности, ст. эквивалент массы изделия.

Литература

1. ГОСТ РВ 20.57.305–98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов.
2. Ананьева Е. С. Приспособления для вибрационных испытаний изделий на воздействие механических факторов. Инженерия для освоения космоса // Сборник научных трудов. – ТПУ, Томск, 2017.
3. ГОСТ 28231–89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Крепление элементов, аппаратуры и других изделий в процессе динамических испытаний, включая удар (Ea), многократные удары (Eb), вибрацию (Fc и Fd), линейное ускорение (Ga) и руководство.
4. Электронный ресурс: <http://solidiron.ru/obrabotka-metalla/svarka/>.
5. ГОСТ 25051.4–83. Установки испытательные вибрационные электродинамические. Общие технические условия.
6. P. Avitabile. Вибрационные испытания: последствия игнорирования резонансных колебаний оснастки // Sound and vibration, 2019.

Бушуев Андрей Павлович

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Опыт работы в сфере испытаний на внешние воздействующие факторы авиационного оборудования – 15 лет. В настоящее время работает инженером 1-й категории – руководителем группы испытаний АО «Электропривод».

Гусев Сергей Владимирович

Родился в 1982 году. В 2004 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Опыт в области испытаний авиационной электротехники – 16 лет. В настоящее время работает начальником экспериментально-исследовательского отдела АО «Электропривод».

Bushuev Andrey

Was born in 1986. In 2009 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes". Work experience in the field of testing for external factors of aviation equipment is 15 years. At present he works as an engineer of the 1st category – the head of the test group of JSC "Electroprivod".

Gusev Sergey

Was born in 1982. In 2004 he graduated from Vyatka State University with a degree in "Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes". Work experience in aviation electrical engineering testing is 16 years. At present he works as head of the test department in JSC "Electroprivod".

Сведения об авторах

К. т. н.

Власов Андрей Иванович

+7-833-223-13-83

Д. т. н., профессор

Исмагилов Флюр Рашитович

+7-347-273-77-87

Нефедов Борис Алексеевич

+7-833-238-00-35

Грязев Константин Дмитриевич

+7-833-223-19-70

Рубцова Людмила Александровна

+7-833-258-43-88

Филиппов Михаил Алексеевич

+7-833-258-45-66

Губин Илья Вячеславович

+7-833-274-27-36

Трефилова Татьяна Александровна

+7-833-258-08-15

Москвин Евгений Владимирович

+7-833-258-25-86

Бушуев Андрей Павлович

+7-833-223-28-85

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) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 20%

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, e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО Агентство «Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2020 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.