

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. Бадёр, д.т.н., профессор,
Л.А. Герман, д.т.н., профессор,
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,
К.Л. Ковалёв, д.т.н., профессор,
А.С. Космодамианский, д.т.н.,
профессор,
А.С. Мазнёв, д.т.н., профессор,
Г.Г. Рябцев, д.т.н., профессор,
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор,
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,
(495) 557-23-95
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать:
24.06.2015 г.

Отпечатано:

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

Формат 60х90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ 784.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Будин Л.Н.

Страницы истории АО «Электропривод» 2

Вишневский С.Н.

Современное состояние и перспективы развития
АО «Электропривод» 8

Садаков Н.А., Гусев С.В.

Техническое перевооружение АО «Электропривод» 11

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Волокитина Е.В., Ковязин В.И., Власов А.И., Никитин В.В.

Автономная система электроснабжения системы автоматического
управления авиадвигателя 14

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г.

Состояние и перспективы создания высокоэффективных
электроприводов для более электрифицированных
и роботизированных образцов отечественной техники
нового поколения 19

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

Особенности разработки малогабаритного слаботочного
электромагнита с повышенным быстродействием для замка
реверсивного устройства 25

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

Пульсации реактивного момента бесконтактных
электродвигателей постоянного тока 28

Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г., Опалев Ю.Г.

Имитационная математическая модель электропривода колеса
шасси самолета 32

Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.

Магнитоэлектрические вентильные электродвигатели в
электроприводах разработки АО «Электропривод» 38

Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.

Математическая модель электропривода реверсивного
устройства авиадвигателя ПД-14 42

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Бычков В.И., Вшивцев М.Н., Гусев С.В., Бессолицин А.Г.

Испытания изделий – важный этап выполнения
опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ 45

Страницы истории АО «Электропривод»

// History of JSC «Electroprivod» //

**Будин Л. Н.,
АО «Электропривод», г. Киров**

В статье представлены основные этапы развития АО «Электропривод» (г. Киров) со дня его образования. Приведены основные достижения и современное состояние предприятия.

Ключевые слова: АО «Электропривод», опытно-конструкторское бюро, история предприятия, авиационная электротехника.

The article presents the main stages of the history of JSC «Electroprivod» (from Kirov) since its formation. The main achievements and current status of JSC «Electroprivod» are given.

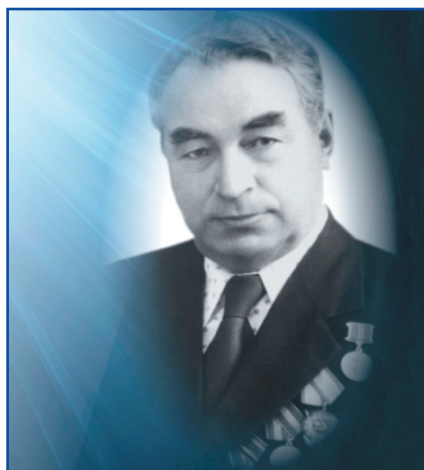
Keywords: JSC «Electroprivod», experimental design bureau, history of company, aircraft electrical equipment.

25 августа 2015 года коллектив АО «Электропривод» (г. Киров) – одного из ведущих отечественных опытно-конструкторских бюро по разработке авиационного электротехнического оборудования – отметит 60-летие со дня образования предприятия.

История предприятия началась в 1955 году. Постановлением Совета Министров СССР № 1510–845 от 12 августа 1955 года и Приказом Министра авиационной промышленности № 565 от 25 августа 1955 года в целях развития опытно-конструкторских бюро авиационной промышленности в восточных районах СССР в г. Кирове на территории завода им. Лепсе был создан филиал Московского агрегатного завода (МАЗ) «Дзержинец», в те времена головного в отрасли предприятия-разработчика авиационного электротехнического оборудования.

Первым руководителем предприятия и одновременно заместителем главного конструктора МАЗ «Дзержинец» приказом МАП № 247к от 09.07.1955 года был назначен Негодяев Леонид Николаевич, работавший до этого назначения начальником конструкторского отдела завода им. Лепсе (рис. 1).

Большую поддержку при организации предприятия и в его первых шагах оказали заместитель начальника 2-го Главного Управления ГКАТ Ключин Николай Михайлович, главный конструктор МАЗ «Дзержинец» Федосеев Алексей Фролович и его заместители Делекторский А. В., Исаев Л. В., Гальперин Г. Я.,



*Рис. 1. Первый руководитель предприятия
Негодяев Леонид Николаевич.*

Шермазанов К. Т., Экштейн Н. К., руководство Кировского завода им. Лепсе в лице директора Большева А. С. и главного инженера Алексеева А. П.

Первоначально перед вновь созданным предприятием ставились задачи оказания помощи кировским заводам им. Лепсе и им. ХХ партсъезда в освоении изделий головного ОКБ и проведении разработок новой техники под руководством головного ОКБ.

Но уже в 1958 году Распоряжением 2-го Управления Госкомитета Совета Министров СССР по авиационной технике на филиал были возложены более конкретные задачи:

- разработка и опытные поставки электроприводов самолетных шасси, за-

крылков, пневматических и гидравлических кранов;

- разработки и опытные поставки изделий, выполненных на базе освоенных заводом им. Лепсе конструкций МАЗ «Дзержинец»;

- помощь заводам (ныне ОАО «Лепсе» и ОАО «Авитек») Совнархоза Кировского экономического административного района в освоении и серийном производстве всех новых электроагрегатов, разработанных МАЗ «Дзержинец».

Тематика разработок головного предприятия, переданных для освоения и освоенных серийными заводами, охватывала широкий спектр изделий и систем:

- бортовые электрические генераторы постоянного и переменного токов;

- аппаратуру регулирования, защиты и управления;

- коммутационную аппаратуру (реле, контакторы, микровыключатели);

- блоки датчиков и концевых выключателей;

- системы электрического запуска, стартер-генераторы;

- следящие электроприводы, электродвигатели и электромеханизмы.

И весь этот обширный комплекс изделий и систем (несколько сотен наименований) работникам вновь созданного филиала предстояло досконально изучить, чтобы технически грамотно оказывать помощь специалистам серийных заводов при их освоении, изготовлении, испытаниях и эксплуатации, проводить их модернизацию с целью улучшения технических характеристик, повышения унификации, технологичности, ресурсов и надежности.

В первые же годы профиль собственных разработок предприятия был дополнен электрогенераторами, стартер-генераторами, автоматами запуска авиадвигателей, электроагрегатами для систем антиобледенения, загрузки руля, очистки стекол и пр. бортовых систем самолетов, вертолетов и ракет. И в дальнейшем профиль загрузки неоднократно корректировался в соот-



Рис. 2. Первые работники предприятия:
Негодяев Л. Н. – начальник предприятия, Ускова Л. М. – секретарь-делопроизводитель, Зотов В. С. – конструктор,
Демидов В. А. – конструктор, Мазуров Э. В. – конструктор.

ветствии с текущими задачами Министерства авиационной промышленности и головного ОКБ.

Первый этап – этап становления (1955–1961 годы)

В первое время после образования предприятия в его составе было 8 человек, включая начальника филиала Негодяева Леонида Николаевича. Самым первым работником стал Зотов Владимир Сергеевич, затем оформились на работу Демидов Владимир Александрович, Мазуров Эрик Владимирович, Попкова Лидия Васильевна, Ускова Лидия Модестовна, Никитина Лидия Алексеевна и Титов Николай Петрович (рис. 2).

Самые первые разработки:

- МПП-10 – электромеханизм для перемещения объекта на тележке для летающей лодки Бе-10, г. Таганрог;
- СМ-20М – электродвигатель (по ТТ НИИ-25 МАП).

К концу периода становления численность возросла до 235 человек. Были образованы конструкторский отдел, состоявший из 5 бригад, технологическая бригада, испытательная группа и механо-сборочная мастерская.

Все подразделения предприятия располагались в помещениях, предоставленных заводом им. Лепсе. К 1961 году их площадь составляла 450 м².

Но с каждым годом становилась все более очевидной невозможность дальнейшего развития предприятия без собственных производственных площадей. И вот 03.12.1958 года вышло Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 1314–632, а 15.12.1958 года вышел Приказ Государственного Комитета Совета Министров СССР по

авиационной технике № 502 о строительстве для филиала трех корпусов: инженерно-конструкторского, лабораторного и производственного (последний так и не был построен). Уже в 1959 году началось строительство инженерно-конструкторского корпуса.

Второй этап (1961–1966 годы)

В конце 1961 года завершилось строительство инженерно-конструкторского корпуса, а в 1965 году – лабораторного. Началось их освоение. Было закуплено и смонтировано в короткие сроки уникальное производственное и испытательное оборудование. Эта громадная работа была успешно проведена благодаря усилиям и энергии главных инженеров Алексеева Александра Павловича и Матковского Ивана Григорьевича, а также начальника отдела – главного механика и энергетика Сергея Макарова.

Предприятие окончательно сформировалось как опытно-конструкторское бюро со всеми необходимыми подразделениями и службами, включая экспериментально-исследовательский отдел и опытное производство (рис. 3).

Резко выросла численность коллектива (до 500 человек) за счет молодых специалистов, прибывших по направ-



Рис. 3. Конструкторский отдел в 1962 и 2014 годах.

лениям МАП из ведущих вузов Москвы, Ленинграда, Свердловска, Казани, Новосибирска, Куйбышева, Иваново, Ижевска и др. Для их размещения были выделены места в общежитии завода им. Лепсе и построены квартиры на бюджетные средства.

Более чем в 2 раза вырос объем НИОКР и помощи серийным заводам.

Третий этап (1967–1985 годы)

В 1967 году между корпусами была построена вставка, и предприятие получило дополнительно 1000 м² площади (рис. 4).

Предприятие бурно развивается. Совершенствуется работа всех подразделений и служб, растет квалификация ра-



Рис. 4. Корпуса предприятия в 1970 и 2014 годах.

ботников. Непрерывно увеличиваются объемы работ, повышаются качественные показатели работы предприятия (надежность и ресурсы выпускаемой продукции, сложность и технический уровень новых разработок). К 80-м годам благодаря достижениям в создании новой техники в области авиационного оборудования организация завоевала высокий авторитет среди предприятий отрасли. Успешно развивалось деловое сотрудничество со многими вузами страны и отраслевыми институтами, со всеми отечественными разработчиками и изготовителями самолетов, вертолетов и дирижаблей.

Численность работников приблизилась к 1000 человек.

Сформировались традиции жизни коллектива и решения его социальных вопросов. В 1967 году на берегу реки Вятки в районе села Гольцы был построен дом отдыха из 3 домиков и 2 домика были построены в областном доме отдыха «Вишкель», которые до конца 80-х годов были популярнейшими местами семейного отдыха работников предприятия.

Четвертый этап (1985–1996 годы)

Это самый трудный период в жизни предприятия. Он совпадает с периодом реформ и преобразований в стране.

В 1985 году ушел на пенсию Л.Н. Негодяев, 30 лет возглавлявший предприятие. МАП назначило руководителем предприятия Л.Н. Будина, с 1977 года работавшего начальником конструкторского отдела.

С 1985 года началась горбачевская перестройка с гласностью, с созданием Совета трудового коллектива, анкетированием и выборами трудовыми коллективами руководителей всех уровней, внедрением хозрасчета, изменением системы оплаты труда и другими преобразованиями. Предприятие заихорядило. Тем не менее к 1989 году предприятие достигло максимальных производственных показателей: численность работающих приблизилась к 1,5 тыс. человек, загрузка тематикой и поставками была такой, что вошли в практику переработки и работа во вторую и третью смены, готовились и прорабатывались предложения о расширении производственных площадей, строительстве еще одного корпуса, приобретении новейшего высокопроизводительного производственного и лабораторного оборудования, строительстве жилого многоквартирного дома для работников предприятия.

Была завершена разработка более 30 изделий для самолетов Ан-70, Ил-96,

Ил-114, Ту-204, МиГ-29 и Су-27. Окончание разработки высокотехнологичных унифицированных рядов электроме- ханизмов поступательного и вращательного движений, не уступающих по техническому уровню лучшим зарубежным аналогам, явилось одним из самых больших достижений предприятия. Для атомной энергетики разработаны и с 1992 года изготавливаются высоко- надежные с большим ресурсом электро- двигатели ДП100–500–2,5 и 2ДП100– 500–2,5, предназначенные в составе сервоприводов для перемещения регу- лирующего органа в системах контроля, управления и защиты атомных реакто- ров РБKM в режиме автоматического регулирования и быстрой аварийной защиты. В дальнейшем поставки именно этих электродвигателей помогли пред- приятию выстоять в тяжелой финансо- во-экономической ситуации.

Благодаря государственной под- держке выполнены десятки научно-ис- следовательских и поисковых работ, в результате которых создан большой научно-технический задел для будущих разработок.

В 1989 году с целью повышения эф- фективности использования научно-тех- нического потенциала и с учетом поже- лания трудового коллектива предпри- ятия Приказом МАП № 357 от 06.07.1989 года предприятие было выведено из подчинения МАЗ «Дзержинец» и полу- чило статус самостоятельного предпри- ятия с наименованием КБ «Электропри- вод». Одновременно предприятие было включено в состав Кировского электро- машиностроительного объединения им. Лепсе (КЭМПО им. Лепсе), просущество- вавшего 4 года.

К сожалению, предприятие не успело вкусить все прелести самостоятельности. С 1989 года оно вступило в самый тяже- лый период своей жизни. На него, как и на все предприятия оборонного ком- плекса, обрушились конверсия, распад СССР, политические и экономические реформы, сбросившие его с вершин про- цветания на грань выживания. Прекрати- лось государственное финансирование, почти до нуля упал гособоронзаказ, за- казчики и потребители стали отказывать- ся от ранее заключенных договоров. Со- кращенная неделя, работа «по вызовам», урезание зарплаты и другие меры не мо- гли вывести предприятие из критической ситуации. Начались массовые увольне- ния и сокращения численности.

В этих условиях в 1993 году была проведена приватизация предприятия с преобразованием его в Акционерное общество открытого типа «Электро-

привод» с закреплением 25 процентов акций плюс 1 акции в федеральной соб- ственности.

На собрании акционеров был из- бран первый совет директоров. Первым генеральным директором и одновре- менно председателем совета директо- ров был избран Будин Л.Н.

Но смена собственности сама по себе в обстановке развала всей про- мышленности России не могла выпра- вить положение. Продолжались кризис неплатежей, спад объемов работ, за- держка выплаты зарплаты. Численность работников к 1996 году упала до 150 че- ловек, из-за огромного непогашенного своевременно кредита предприятие оказалось в предбанкротном состоянии.

Советом директоров было решено для сохранения предприятия времен- но разделить его на три предприятия: собственно ОАО «Электропривод», ООО НТК «Электропривод» и ООО ПК «Элек- тропривод».

Пятый этап (1996–2005 годы)

В июле 1996 года на внеочередном собрании акционеров генеральным ди- ректором избирается Головизнин Сер- гей Борисович.

Им были предприняты решительные меры по преодолению кризиса, в том числе было реализовано решение сове- та директоров о разделении предпри- ятия, была достигнута договоренность о замораживании на 3 года кредита, проведена реструктуризация и др. Спо- собствовало выходу из кризиса и на- чавшееся оживление промышленности, увеличившее спрос на продукцию и на новые разработки как авиационного, так и общепромышленного назначений.

Широко были отмечены юбилеи предприятия – 45 и 50 лет – с пригла- шением руководителей и специалистов многих предприятий-партнеров.

В 2002 году предприятие стало вновь единым, оба ООО были упразднены.

К 50-летию предприятия проведен ремонт всех помещений, открыт выста- вочный зал.

К концу 2005 года предприятие по- правило свое финансовое положение, вновь начали расти объемы работ, чис- ленность возросла до 400 человек.

Шестой этап (2005–2010 годы)

В 2006 г. генеральным директором избран С.Б. Обухов, председателем со- вета директоров – В.И. Журавлев.

Проведено совершенствование многих сторон деятельности подраз- делений предприятия, изменены струк- тура и система оплаты труда. Уделялось

повышенное внимание диверсификации продукции, внедрению в нефтегазовый комплекс, атомную энергетику, космическую технику и робототехнику. Проводились широкие маркетинговые и поисковые исследования по изучению возможности сотрудничества с предприятиями и другими отраслями промышленности. Оформлены необходимые лицензии и сертификаты.

Выполнены перспективные НИОКР, из них наиболее важные: электропривод ЭППЗ-204 для самолета Ту-204СМ, электромеханизм МРС-1 с интегрированным вентильным электродвигателем, электродвигатели ДБМ для роботов, ряд систем электрозапуска для наземных газотурбинных установок.

Приобретены высокопроизводительные японские станки с ЧПУ, создан производственный филиал в Кирово-Чепецке, оснащенный современным станочным оборудованием.

Рост объема работ за 2006–2010 гг. составил более 200%, численность работающих выросла до 500 человек.

В 2008 г. ОАО «Электропривод» как стратегическое предприятие ОПК РФ вошло в государственную корпорацию «Ростехнологии», созданную для поддержки и развития высокотехнологичного сегмента российской промышленности. В 2009 году вошло в состав холдинга «Авиационное оборудование» государственной корпорации «Ростехнологии».

Седьмой этап (2010–2015 годы)

В 2011 г. генеральным директором избран Конышев Д. В., а в 2014 г. – Огибалов А. Н., председателем совета директоров – Журавлев В. И., а в 2012 г. – Басюк М. Г.

Проводилась отработка оптимальной системы управления предприятием, в связи с этим неоднократно изменялась структура предприятия, осуществлялось внедрение автоматизированной системы управления предприятием, совершенствовалась система автоматического проектирования и технологической подготовки производства.

Период характеризуется активным поиском новых потребителей серийной продукции и заказчиков новых НИОКР в авиации, оборонпроме, газпроме, судостроении, атомной энергетике и др. отраслях промышленности.

Начаты НИОКР по созданию электрооборудования для перспективного авиадвигателя ПД-14 для самолета МС-21.

Со дня образования предприятия его деятельность была неразрывно связана с развитием отечественной авиаци-

онной электротехники и была направлена на непрерывное совершенствование авиационных электроприводов и электроагрегатов: генераторов постоянного и переменного токов, стартер-генераторов, электродвигателей, электромеханизмов, коммутационной аппаратуры, аппаратуры регулирования, защиты и управления, блоков датчиков и концевых выключателей – и обеспечение их высокого технического уровня.

За все годы выполнено свыше 1600 НИОКР под руководством руководителей проектов Балыбердина В. А., Вишневого С. Н., Волокитиной Е. В., Голубкова В. П., Демидова В. А., Дунина В. П., Ермакова В. П., Журавлевой А. И., Кирьянова Ю. И., Мазурова Э. В., Миронова В. А., Рубцовой Л. А., Свиридова В. И., Ситникова Г. А., Шалагинова В. Ф., Якунина Э. Л. НИОКР проводились в основном по заданиям конструкторских бюро Антонова, Бериева, Ильюшина, Камова, Миля, Микояна, Мясищева, Сухого, Туполева и Яковлева и многих 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 на всех военных и гражданских самолетах, вертолетах и авиационных двигателях, разработанных головными авиационными КБ СССР, а после его распада – России и Украины, на космическом корабле «Буран» и международной космической станции. Они работают в системах запуска авиадвигателей, управления взлетом, полетом и посадкой самолетов, бортовых системах электроснабжения, кондиционирования воздуха, обогрева, выпуска и уборки шасси, регулирования по высоте сидения кресла летчика, вращения антенн, перемещения контейнеров и др.

Тесное сотрудничество с отраслевыми институтами НИИАО, ЦАГИ, ЦИАМ, ВНИИП и многими проектными и учебными институтами и конструкторскими бюро позволило реализовать системный подход к новым разработкам на научной основе. Немало новых разработок, выполненных коллективом предприятия, стали «пионерскими» в отечественном авиастроении. Так, разработанные в 80-х – 90-х годах прошлого века унифицированные, высокотехнологичные, малогабаритные ряды электромеханизмов поступательного и вращательного движений стали значительным до-



Рис. 5. Первые разработанные электромеханизмы, современные унифицированные ряды электромеханизмов вращательного и поступательного движений.

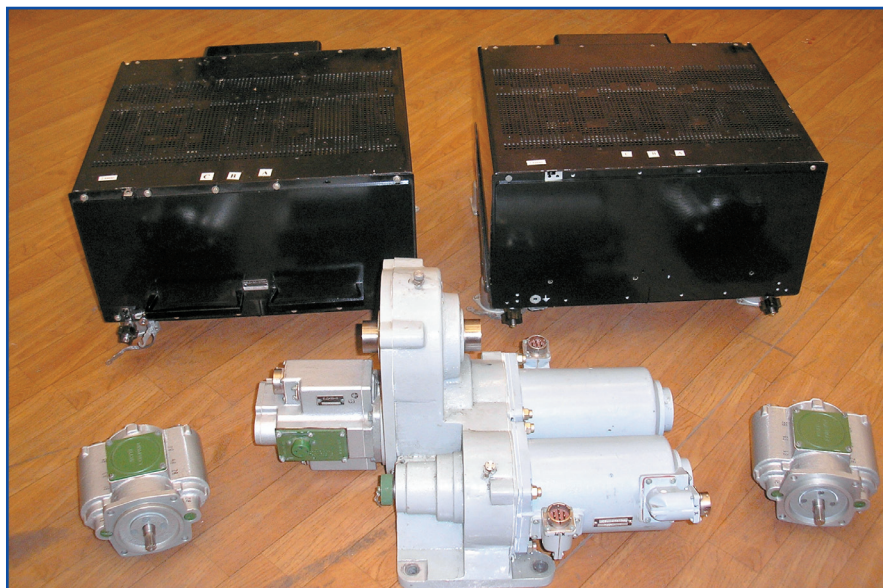


Рис. 6. Электропривод перемещения предкрылков и закрылков ЭППЗ-334 для самолета ТУ-334М.

стижением в создании новейшего электрооборудования для последнего поколения российских и украинских самолетов (рис. 5). Разработка рядов электромеханизмов получила 1 место в конкурсе Министерства авиационной промышленности на лучшую опытно-конструкторскую работу.

Впервые в отрасли были разработаны и поставлены на борт самолета вентиляльные электродвигатели и автоматизированные электроприводы на их основе для систем механизации крыла самолета вместо гидравлических и пневматических приводов. Первый такой электропривод был разработан и изготовлен по заданию АНТК им. Антонова для управления закрылками самолета Ан 70, затем велась их разработка для самолетов Ту 324, Ту 334 и Ту 204СМ, дирижабля АЕ 02Э и перспективного авиадвигателя для самолета 5-го поколения (рис. 6).

В последние три десятилетия предприятие успешно проводило диверсификацию направлений своих разработок. Были созданы изделия высокого технического уровня для атомной энергетики, нефтегазовой промышленности, сельского хозяйства, машиностроения и робототехники.

Разработки предприятия многократно экспонировались на российских и международных выставках, удостоены дипломов и положительных отзывов (рис. 7, 8). Предприятие с 1992 года является постоянным участником Международного авиационно-космического салона (МАКС) в г. Жуковском.

На всех этапах жизни руководство предприятия придавало большое значение кадровой политике как залого успешной деятельности коллектива.



Рис. 7. Председатель Правительства РФ Черномырдин Виктор Степанович знакомится с экспозицией предприятия, 1994 г.

Для молодых специалистов и рабочих созданы благоприятные условия для профессионального роста, освоения смежных профессий, повышения квалификации. Всем работникам и ветеранам труда предоставляется широкий круг льгот материального и социального характера. Закреплению кадрового состава способствуют один из самых высоких в Кировской области уровень зарплаты, интересная работа, дружный коллектив, имеющий множество достижений не только в труде, но и в спорте, туризме, художественной самодеятельности и КВН. Сотрудники предприятия имеют множество наград, в том числе свыше 360 правительственных – за достижения в создании новой техники и профессиональное мастерство.

В коллективе предприятия длительное время работали свыше 50 участников Великой Отечественной войны и свыше 80 тружеников тыла. Все они были примером честного служения делу и были всегда окружены повышенным вниманием и почетом. Коллектив с благодарностью и свято хранит память о всех участниках войны и тружениках тыла, уже ушедших из жизни.

В настоящее время АО «Электропривод» продолжает активную деятельность по созданию уникальных образцов новой техники для различных отраслей промышленности. Среди наиболее значительных и перспективных из выполняемых в настоящее время научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

- разработка электроприводов, предназначенных для автоматизиро-



Рис. 8. Визит губернатора Кировской области Белых Никиты Юрьевича на предприятие, 2014 г.

ванного управления аэродинамическими поверхностями самолетов, такими как предкрылки, закрылки, стабилизатор, интерцепторы взамен гидравлических систем;

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

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

- разработка электроагрегатов для перспективного авиадвигателя ПД-14;

- разработка ряда импортозамещающих вентильных электродвигателей, предназначенных для работы в составе электроприводов универсальных технологических роботов, а также прецизионного металлообрабатывающего, деревообрабатывающего, технологического и другого оборудования;

- разработка электростартеров на основе частотно-управляемых асинхронных электродвигателей для запуска газотурбинных установок мощностью до 30 МВт в составе приводных газотурбинных электростанций, газоперекачивающих агрегатов и газотурбовоза. Их ис-

пользование взамен пневмостартеров обеспечивает экологическую чистоту и энергосбережение в процессе запуска.

Встречая юбилей предприятия, можно с гордостью отметить, что благодаря напряженному самоотверженному труду нескольких поколений рабочих, технологов, конструкторов и испытателей, ветеранов и молодежи, бережно хранящих и преумножающих традиции родного предприятия, АО «Электропривод» выполнило цели и задачи, которые были ему определены при создании. Предприятие сохранило и умножило положительный имидж среди партнеров в авиационной отрасли промышленности и продолжает удерживать завоеванные еще в 80-х годах прошлого века позиции одного из лидирующих в России опытно-конструкторских бюро по созданию авиационного электротехнического оборудования.

Сегодня АО «Электропривод» располагает всеми ресурсами для успешной деятельности, что позволяет при действенной поддержке со стороны холдинга «Технодинамика» (бывшее наименование – «Авиационное оборудование») государственной корпорации «Ростехнологии» с оптимизмом смотреть в будущее, еще более интенсифицировать процесс создания ин-

новационной продукции, сохранить традиционно высокий технический уровень и конкурентоспособность разрабатываемых и выпускаемых серийно изделий, обеспечить достойную социальную поддержку работников и ветеранов предприятия.

Будин Лев Николаевич – родился в 1939 году. В 1962 году окончил Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова по специальности «Электрические машины и аппараты». Опыт работы в области авиационной электротехники – 52 года. В настоящее время работает ведущим инженером-маркетологом АО «Электропривод». Имеет 2 патента, 3 публикации. Награжден Почетной грамотой Министерства авиационной промышленности СССР, нагрудным знаком «Отличник качества авиационной промышленности».

Budin Lev – was born in 1939. In 1962 he graduated from Uralskiy Polytechnic Institute named after S.M. Kirov with specialization in «Electrical machines and devices». His work experience in the area of aviation electrical engineering is 52 years. At present he works as chief engineer – marketing manager of JSC «Electroprivod». He has 2 patents, 3 publications. He was awarded by a certificate of merit of the USSR Aviation Industry Ministry, award pin «Quality Expert of aviation industry».

Современное состояние и перспективы развития АО «Электропривод»

// Current status and development prospects of
JSC «Electroprivod» //

**Вишневский С. Н.,
АО «Электропривод», г. Киров**

В статье рассматриваются основные направления деятельности АО «Электропривод» (г. Киров). 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» (Kirov city) 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.

В августе 2015 года коллектив кировского АО «Электропривод» отметит 60-летие со дня основания предприятия. На всех этапах развития отечественной авиации его деятельность была направлена на постоянное совершенствование авиационных электроприводов и электроагрегатов: генераторов постоянного и переменного тока, стартер-генераторов, электродвигателей, электромеханизмов, коммутационной аппаратуры, аппаратуры регулирования, защиты и управления, блоков датчиков и конечных выключателей – и обеспечение их высокого технического уровня, минимизации массогабаритных показателей.

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

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

Разработка регулируемых и следящих электроприводов является базовым тематическим направлением АО «Электропривод».

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

ческих приводов. Эффективность замены проявилась прежде всего в уменьшении массы систем, а также в повышении их безотказности, точности позиционирования, упрощении обслуживания, снижении эксплуатационных расходов и энергопотребления. Создание таких электроприводов явилось серьезным практическим шагом в реализации концепции «более электрифицированного самолета».

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

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

- исследование и разработка электроприводов системы управления взлетно-посадочными устройствами, систем электроснабжения на базе вентильных электрических машин постоянного тока с высококоэффициентами постоянными магнитами для «более электрифицированного самолета»;

- исследование и разработка электроприводов с высокой удельной мощностью для топливных насосов, входных направляющих аппаратов, целого комплекса электроприводов и систем для реализации идеи «электрифицированного авиадвигателя»;

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

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

- разработка ряда импортозамещающих вентильных электродвигателей, предназначенных для работы в составе электроприводов универсальных технологических роботов. Первые образцы таких двигателей успешно прошли проверку в составе робота TUR15, разработанного ПТОО ОАО «АвтоВАЗ» в рамках государственного проекта «Разработка и освоение производства гаммы отечественных универсальных технологических роботов для массовых автоматизированных производств гражданской машиностроительной продукции»;

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

• разработка электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета.

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

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

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

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

Сегодняшняя стратегическая политика АО «Электропривод» направлена на:

- позиционирование как ведущего разработчика электроагрегатов и автоматизированных систем управления в наиболее ответственных областях применения в России;
- проведение разработок на уровне лучших мировых образцов;
- постоянное поддержание высокой надежности и качества выпускаемых изделий;
- применение наработанного опыта, методик проектирования на ответственных объектах других отраслей промышленности;
- постоянное совершенствование производственной, испытательной, технологической и конструкторской баз.

Важным преимуществом нашего предприятия является наличие высококвалифицированного научно-технического коллектива. Накопленные знания и опыт позволяют проектировать

и выходить на рынок с новыми, более совершенными изделиями, расширять номенклатуру, решать поставленные временем задачи. Внедрение научно-исследовательских и экспериментальных работ, обучение в аспирантуре, увеличение количества сотрудников с ученой степенью, действие адаптивной программы обучения, внедрение новых информационных технологий способствуют реализации поставленной цели.

Большая работа проводится сотрудниками предприятия по подготовке квалифицированных кадров. Осуществляется педагогическая деятельность в Вятском государственном университете, Кировском авиационном техникуме. Созданы условия для прохождения производственной практики студентов, выполняются подготовка и руководство дипломными проектами в интересах предприятия, работа в Государственных аттестационных комиссиях по защите дипломных проектов.

Постоянно повышается научно-техническая квалификация самих сотрудников предприятия. Многие из них проходят обучение в техникумах, вузах и аспирантурах, постоянно повышая свою квалификацию на различных курсах и семинарах.

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

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

Для того чтобы совершить скачок в технологических и конструкторских решениях, получить новые рынки сбыта, облегчить и ускорить сертификацию изделий (объектов), использовать поддержку в оформлении различного рода документов, целесообразно использовать опыт передовых фирм, как отечественных, так и зарубежных.

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

Повышение современных требований к изделиям авиационной техники по внешним воздействующим факторам вызывает необходимость как в техническом перевооружении испытательной базы, так и в сотрудничестве с другими организациями и лабораториями в проведении целого комплекса испытаний.

Приоритетными направлениями деятельности предприятия являются следующие.

•Авиационная промышленность – традиционная для нашего предприятия, где предъявляются высокие требования к качеству, надежности, массогабаритным показателям, условиям эксплуатации. Продукция используется как в гражданской, так и в военной авиации, а также в наземном оборудовании, в частности, автоматизированные электроприводы и их составные части (электромеханизмы, электроприводы, блоки датчиков, блоки управления). В связи с изменениями в мировой экономике, а также введением санкций со стороны ряда стран начинается выполнение большого комплекса работ по программе импортозамещения.

•Нефтегазовая отрасль – профилируется на добыче и транспортировке углеводородов. Предъявляются высокие требования к надежности, ресурсу, ремонтпригодности, так как простой или замена оборудования при транспортировке газа или нефти ведут к огромным убыткам. Оборудование эксплуатируется в тяжелых условиях от Крайнего Севера до субтропиков. Специфика эксплуатации таких приводов потребовала, соответственно, и нестандартного подхода к проектированию подобных изделий. Поэтому на первоначальном этапе создается опытный экспериментальный образец, на котором отрабатываются все конструктивные решения и алгоритмы управления ими в составе САУ газотурбинной установки. Возможная продукция: электростартеры, электроприводы для запорной арматуры, блоки коммутации и запуска.

•Атомная промышленность – характеризуется повышенными специфика-

ческими требованиями по надежности, очень жесткими условиями эксплуатации, требованиями к радиационной стойкости, к применяемым материалам и электрорадиоизделиям. Возможная продукция: электродвигатели, электроприводы для запорной арматуры, сервоприводы для управления и защиты, коммутационная аппаратура.

• **Судостроение** – в настоящее время судостроительную отрасль государство определило как стратегическую и планирует активно развивать. Будут возобновлены проектирование и производство новых судов гражданского и военного назначений. Замена гидроприводов на электроприводы в судостроении (по аналогии с авиацией) открывает большой перспективный рынок для нашего предприятия. Возможная продукция: моментные электродвигатели для манипуляторов, автоматизированные электроприводы и др.

Поэтому для создания возможности применения наших изделий, расширения рынка, повышения качества продукции предприятию необходимы:

- обновление и приобретение нового испытательного оборудования;
- проведение разработки новых методик испытаний;
- совершенствование подходов экспериментально-исследовательского

блока в выявлении причин отказов и разработки предложений по повышению надежности изделий;

- увеличение количества считываемых параметров при испытаниях и их автоматизация;
- расширение и внедрение новых видов испытаний.

Как разрабатывающее КБ АО «Электропривод» вырабатывает всесторонние меры по разработке конкурентоспособных изделий, такие как:

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

Научно-техническая база АО «Электропривод» позволит и дальше развивать масштабные проекты по модернизации производства, внедрению в разработки новейших достижений науки и техники, социальной поддержке работников, а трудовому коллективу –

быть уверенным в дальнейшей успешной деятельности и достойном будущем предприятия.

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

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

Техническое перевооружение АО «Электропривод»

// Technical reequiptment of JSC «Electroprivod» //

Садаков Н. А., Гусев С. В.,
АО «Электропривод», г. Киров

В статье представлены описания приобретаемого оборудования, его возможности и перспективы технического перевооружения предприятия.

Ключевые слова: АО «Электропривод», техническое перевооружение, обрабатывающие центры.

АО «Электропривод» – предприятие, которое сочетает в себе научно-технический и производственный комплексы. Оно имеет все необходимое для разработки, изготовления опытных образцов и их испытаний, а также серийных поставок. Вновь разрабатываемые изделия становятся все более сложными, а это, в свою очередь, накладывает повышенные требования к точности и качеству изготовления деталей и узлов.

Предприятие постоянно стремится повышать свою конкурентоспособность на рынке наукоемких разработок, а это невозможно без внедрения современных технологий в проектировании, испытаниях и изготовлении изделий.

Для повышения качества разработок на предприятии внедрили CAD и CAM системы на базе T-FLEX DOCs. В результате внедрения систем комплекса T-FLEX (CAD, DOCs, технология) АО «Электропривод» теперь использует единое информационное пространство при разработке, согласовании и применении конструкторско-технологической документации (рис. 1, 2). В системах T-FLEX постоянно работают более 50 человек.

Развитие предприятия невозможно без технического перевооружения. Реалии диктуют построение производства на базе современного, высокопроизводительного оборудования. Такое оборудование позволяет не только эффективно решать производственные задачи, но и привлекать на производство молодых специалистов.

Решение задач по техническому перевооружению предприятия началось с реализации проекта по внедрению двух высокопроизводительных и высоко-

The article presents descriptions of purchased equipment, its features and prospects of technical reequiptment of JSC «Electroprivod».

Keywords: JSC «Electroprivod», technical reequiptment, machining center.

коточных обрабатывающих центров (ОЦ) от японских производителей: токарного

обрабатывающего центра NAKAMURA TOME WT150 (рис. 3) и горизонтального фрезерного обрабатывающего центра KITAMURA MYCENTR HX300 (рис. 4).

Данный проект стартовал в 2007 году. На новом во всех отношениях для предприятия оборудовании были освоены наиболее сложные детали. Одними из первых деталей были освоены «Шток» (рис. 5) с изделий типа МП10 на токарном ОЦ и корпус электродвигателя ДАТВ300 (рис. 6).

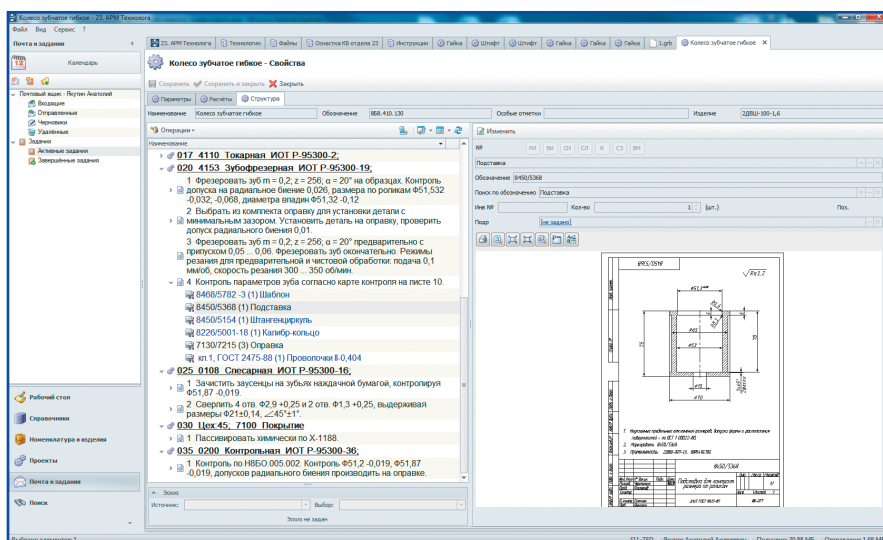


Рис. 1. Окно разработки ТП в T-FLEX технология.

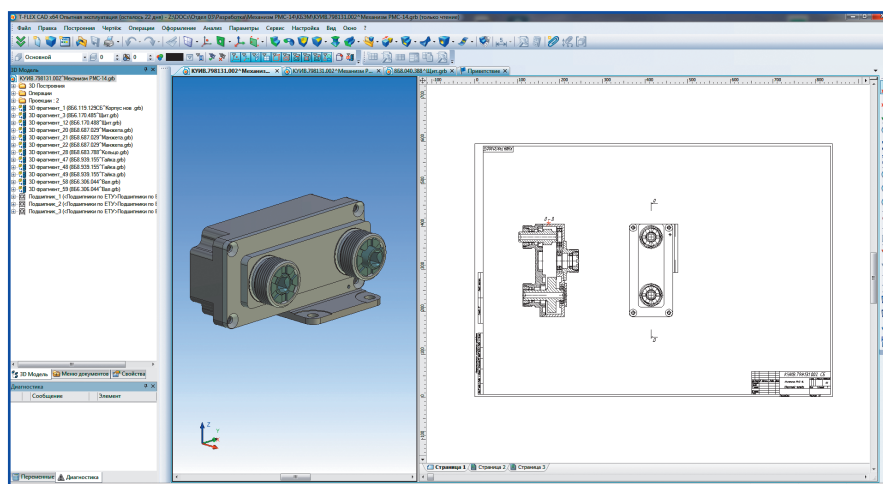


Рис. 2. Пример разработки в T-FLEX CAD.



Рис. 3. Обрабатывающий центр NAKAMURA TOME WT150.



Рис. 4. Обрабатывающий центр KITAMURA MYCENTR HX300.

Это позволило в разы сократить трудоемкость и повысить качество изготовления этих деталей. Освоение и внедрение этого оборудования подтвердило правильность выбранной стратегии развития предприятия. В настоящий момент на предприятии парк обраба-

тывающих центров пополнился двумя токарными высокоточными ОЦ южнокорейского производства HWACHEON HI-TECH 200 A(B) MC (рис. 7).

Станки предназначены для проведения всех видов лезвийной обработки и позволяют получать со станка готовую деталь. Эти станки имеют жесткую конструкцию, мощный привод шпинделя и виброустойчивые приводные блоки. Данные

станки позволяют вести производительную обработку как простым токарным инструментом, так и приводным инструментом, что позволяет получать со станка готовую деталь. Освоение станков началось с изготовления детали «Водило» (рис. 8).

При этом было применено уникальное технологическое решение, которое позволило снизить трудоемкость изготовления детали почти в 8 раз. Также

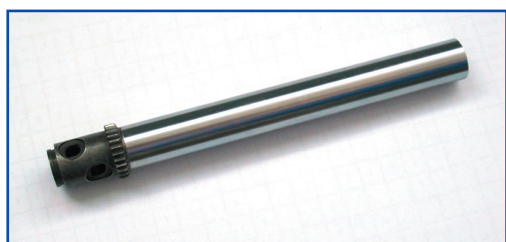


Рис. 5. Деталь «Шток».



Рис. 6. Корпус электродвигателя ДАТВ300.



Рис. 8. Деталь «Водило».



Рис. 7. Токарный ОЦ HWACHEON HI-TECH 200 B MC.



Рис. 9. Электроэрозионный станок повышенной точности MV2400R.



Рис. 10. Испытательный вибростенд TIRA vib.

предприятие приобрело прецизионный электроэрозионный станок MITSUBISHI MV2400R (рис. 9).

Данный станок имеет более совершенный генератор, который дал возможность повысить скорость резки металлов на 20% в сравнении с анало-

гичными станками других производителей. Приобретение этого станка позволило отказаться от проектирования и изготовления сложной оснастки для изготовления опытных деталей и, соответственно, сократить сроки изготовления опытных изделий в целом.

Продолжается модернизация испытательного оборудования нашего отдела. Приобретены два источника электропитания переменного тока Chroma, вибростенд TIRA vib (рис. 10). Это оборудование позволит осуществлять проверку и испытания изделий нашего предприятия в объеме современных требований авиационных стандартов и правил, гармонизированных с западными изданиями (KT-160D, DO-160F). Наличие вибростенда TIRA обеспечит возможность испытаний более массогабаритных изделий с виброперегрузками в среднем до 50g, позволит проводить имитацию удара и в дальнейшем осуществлять и анализиро-

вать комплексное воздействие механических и климатических факторов.

В планах организации провести глубокую модернизацию предприятия и выйти на современный технический уровень. Только таким образом мы сможем и дальше развивать научно-

технический потенциал и, соответственно, разрабатывать изделия мирового уровня.

Садаков Николай Александрович – родился в 1970 году. В 1993 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Технология машиностроения». Опыт работы в области механической обработки металлов – 19 лет. В настоящее время работает главным технологом АО «Электропривод».

Гусев Сергей Владимирович – родился в 1982 году. В 2004 году окончил Вятский Государственный Университет. Опыт работы в области авиационного электропривода – 11 лет. В настоящее время работает начальником экспериментально-исследовательского отдела АО «Электропривод».

Sadakov Nickolai – was born in 1970. In 1993 he graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specialization in «Mechanical engineering». His work experience in the area of mechanical metal-working is 19 years. At present he works as production manager of JSC «Electroprivod».

Gusev Sergey – was born in 1982. In 2004 he graduated from Vyatskiy State University. His work experience in the area of aviation electrical drive is 11 years. At present he works as head of the test department in JSC «Electroprivod».

Автономная система электроснабжения системы автоматического управления авиадвигателя

// Autonomous electrical power supply system for automatic control system of aircraft engine //

Волокитина Е. В., к.т. н., Ковязин В. И.,
АО «Электропривод», г. Киров

Власов А. И., к.т. н., Никитин В. В.,
АО «Технодинамика», ОП, г. Киров

В статье представлено описание системы электропитания и коммутации электронной части системы автоматического управления электрифицированного авиадвигателя. Необходимость обеспечения повышенной надежности системы определили конструктивные особенности системы – наличие двух независимых каналов. Показаны основные особенности проектирования генератора системы, представлено сравнение опытных и расчетных параметров. Ключевые слова: система электропитания, магнитоэлектрический генератор, моделирование электромагнитного поля, коммутационное индуктивное сопротивление.

The article presents description of the power supply system for electronics of automatic control system for aircraft more electric engine. Design features of system have identified the need for increased reliability that implies presence of two independent channels. Presented the basic features of designing of the generator for this system and comparison of experimental and design parameters.

Keywords: electrical power supply system, magneto-electric generator, electromagnetic field modeling, switching inductive reactance.

К самолетам следующего поколения предъявляются повышенные требования по стоимости эксплуатации, экологичности и топливно-энергетической эффективности, что ставит перед авиационными специалистами целый ряд задач, которые требуют поиска принципиально новых подходов к формированию облика перспективной авиационной техники.

Переход к концепции самолета с полностью электрифицированным оборудованием, под которым понимается самолет с единой централизованной системой электроснабжения, – одно из стратегических направлений развития мировой авиации. Данная технология подразумевает использование для обеспечения функционирования самолетных систем и их исполнительных механизмов только электрической энергии вместо используемых в настоящее время трех видов энергии: гидравлической, пневматической и электрической [1].

Фактически это неизбежная революция, поскольку она отвечает высокому спросу производителей самолетов относительно снижения расхода топлива,

более высокой надежности, уменьшения стоимости технического обслуживания.

Для реализации научно-технических вопросов концепции полностью электрифицированного самолета (ПЭС) одним из мероприятий является создание электрифицированного авиадвигателя (ЭАД). Отличительные черты программы электрификации авиадвигателя ПЭС, а также преимущества ЭАД достаточно подробно описаны в [2].

Одной из отличительных черт ЭАД является электрификация «обвязки» авиадвигателя, то есть переход на электрические приводы управления авиадвигателем и электрические приводы топливных насосов, что влечет повышение мощности источников электрической энергии, способных обеспечить электроэнергией всех потребителей ПЭС.

Для автономного электропитания электронной части системы автоматического управления, электронных блоков ЭАД и части исполнительных электрических механизмов АО «Электропривод» разработало автономную систему электроснабжения системы (СЭС) авто-

Таблица 1. Технические характеристики СЭС.

Наименование параметра	Значение параметра
Выходная мощность генератора (при работе двух каналов) при частоте вращения ротора, Вт, не менее - 3095 ... 5000 об/мин; - 5200 ... 5600 об/мин; - свыше 5600 об/мин	220 ... 250 290 ... 350 > 350
Выходное напряжение постоянного тока выпрямительно-преобразовательного устройства блока питания (БП), В	от 31 до 33
Размах пульсаций выходного напряжения, В, не более	±1



Рис. 1. Генератор.



Рис. 2. Блок питания и коммутации БП.

матического управления (САУ) авиадвигателя. Основные технические характеристики СЭС представлены в таблице 1.

В состав системы СЭС входят генератор (рис. 1), а также блок питания и коммутации БП (рис. 2).

Для автономных подвижных объектов в качестве электромашинных источников питания наиболее перспективным считается применение магнитоэлектрического генератора благодаря тем преимуществам, которые свойственны этому типу электрической машины [3]. В связи со сказанным в качестве электрической машины для генератора выбрана синхронная электрическая машина с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов.

Особенности проектирования и конструктивного исполнения магнитоэлектрического генератора

Важность и сложность функций, выполняемых СЭС, предопределили основные требования к ней – высокую надежность, безотказность, минимальные массу и габариты, стойкость к внешним воздействиям, а также такой показатель, как «живучесть». Одной из основных задач при разработке СЭС являлось обеспечение показателя «живучести».

ГОСТ 27.002–89 дает определение термина «живучесть» как свойства объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Из теории «живучести» технических систем известно, что данным свойством обладают только избыточные системы, а избыточность в технических системах достигается через резервирование [4].

Применение функционального резервирования позволяет без дополнительных аппаратных затрат за счет внутренней избыточности ресурсов обеспечить работоспособность системы. Наиболее эффективны системы на основе функционального резервирования с наличием избыточности силовых цепей в неявной форме.

При разработке СЭС была выбрана конструктивная схема, обеспечивающая принцип функционального резервирования за счет применения в конструкции генератора двух независимых трехфазных обмоток статора. Данная схема обеспечивает гальваническую и термическую независимости обмоток.

По результатам анализа большого количества расчетов надежности электрических машин, разрабатываемых

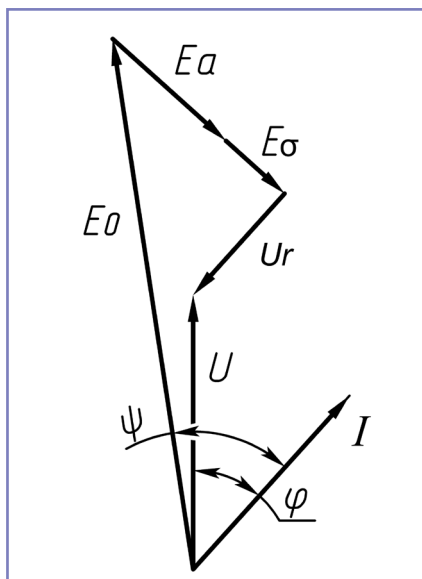


Рис. 3. Диаграмма ЭДС генератора.

в АО «Электропривод», установлено, что показатель безотказной работы обмотки составляет 30% от общего показателя безотказной работы электрической машины. Применение двух независимых обмоток в генераторе СЭС, по результатам аналитического расчета, показывает, что вероятность отказа сразу двух обмоток – событие практически невероятное.

В свою очередь, каждая из обмоток подключена к своей выпрямительно-преобразовательной секции блока БП.

Расчет генератора проводился на основе диаграммы ЭДС. Напряжение на клеммах генератора определялось как геометрическая сумма (рис. 3) следующих векторов:

- ЭДС от потока магнитов ротора E_0 ;
- ЭДС рассеяния E_σ ;
- падения напряжения на активном сопротивлении U_r ;
- падения напряжения на индуктивном сопротивлении E_s .

При расчете напряжения учитывалось фактическое магнитное состояние участка магнитопровода генератора, которое определялось в результате моделирования электромагнитного поля.

Для учета особенностей работы на выпрямительную нагрузку особое внимание было уделено:

- расчету индуктивного коммутационного сопротивления X_k ;
- определению параметров магнитного поля.

Индуктивное коммутационное сопротивление влияет на качество выходного напряжения и расчетную мощность, а следовательно, на его массу и габариты [5]. В связи с тем, что X_k неизвестно на этапе проектирования, был проведен ряд итерационных расчетов

генератора автоматизированным способом с последующим уточнением X_k .

Пренебрегая высшими гармониками тока и МДС якоря, индуктивное сопротивление коммутации можно записать как

$$X_k = X_s + X_{aq} \cdot \cos^2 \psi \quad (1)$$

где X_{aq} – индуктивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси,

X_s – индуктивное сопротивление рассеяния якорной обмотки,

ψ – угол между продольной осью и вектором тока якоря.

Из формулы (1) следует, что для уменьшения X_k необходимо снижать индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Существенное снижение индуктивного сопротивления рассеяния, а следовательно, и X_k было достигнуто за счет увеличения количества полюсов генератора. Кроме снижения индуктивного сопротивления, большое число полюсов обеспечивает повышенную частоту ЭДС, что повышает частоту пульсаций выпрямленного напряжения, облегчая фильтрацию высших гармоник.

При разработке любых специальных электрических машин, в том числе и генераторов с нетрадиционными активными частями, возникает настоятельная необходимость в расчете и анализе их магнитных полей. Кроме того, в электрических машинах нетрадиционного конструктивного исполнения возникает вопрос о корректности схемы соединений обмотки с целью обеспечения необходимой формы (синусоидальная или трапецеидальная) и симметричности ее ЭДС [6].

Для реализации указанных требований при определении выходных параметров генератора был произведен расчет характеристик магнитного поля. Известно, что при использовании аналитических методов расчета магнитного состояния приходится идти на ряд допущений, снижающих степень адекватности результатов расчета фактическим значениям. С другой стороны, моделирование магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ) позволяет достичь результата с заданной точностью с меньшей степенью допущений, чем при аналитических решениях.

На основе МКЭ разработан ряд систем программного обеспечения (ПО), предназначенного для решения полевых задач применительно к моделированию электромеханических устройств (Ansys, Elcut, Femlab, Femm и т.д.). Среди видов ПО программный комплекс Elcut, разработанный ООО «Тор», отличается предельно интуитивно понятным интер-

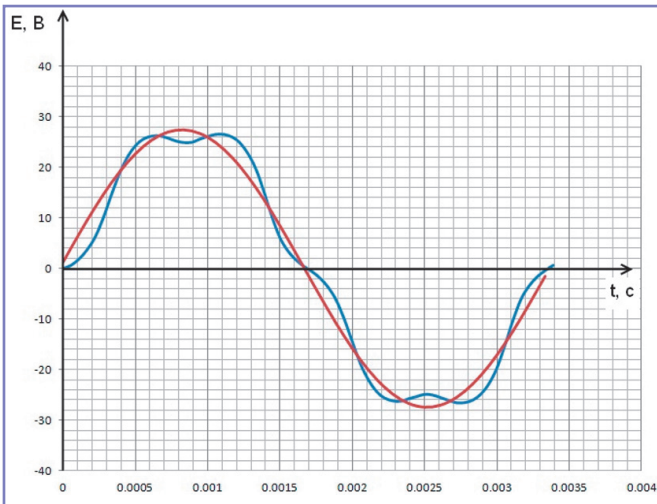


Рис. 4. ЭДС фазы и первая гармоника ЭДС фазы генератора.

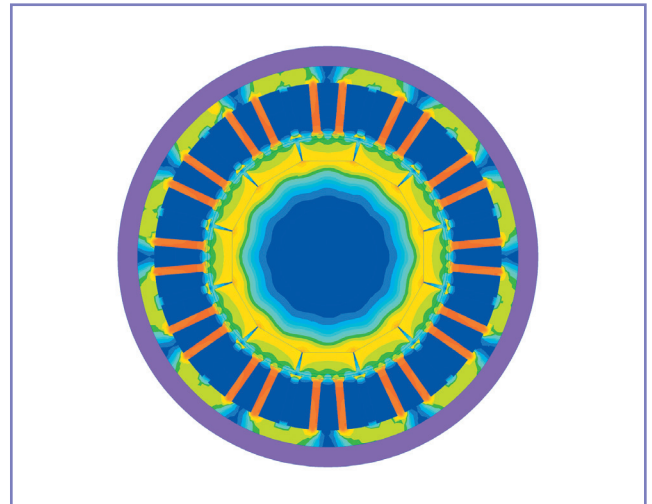


Рис. 6. Магнитное поле генератора на холостом ходу.

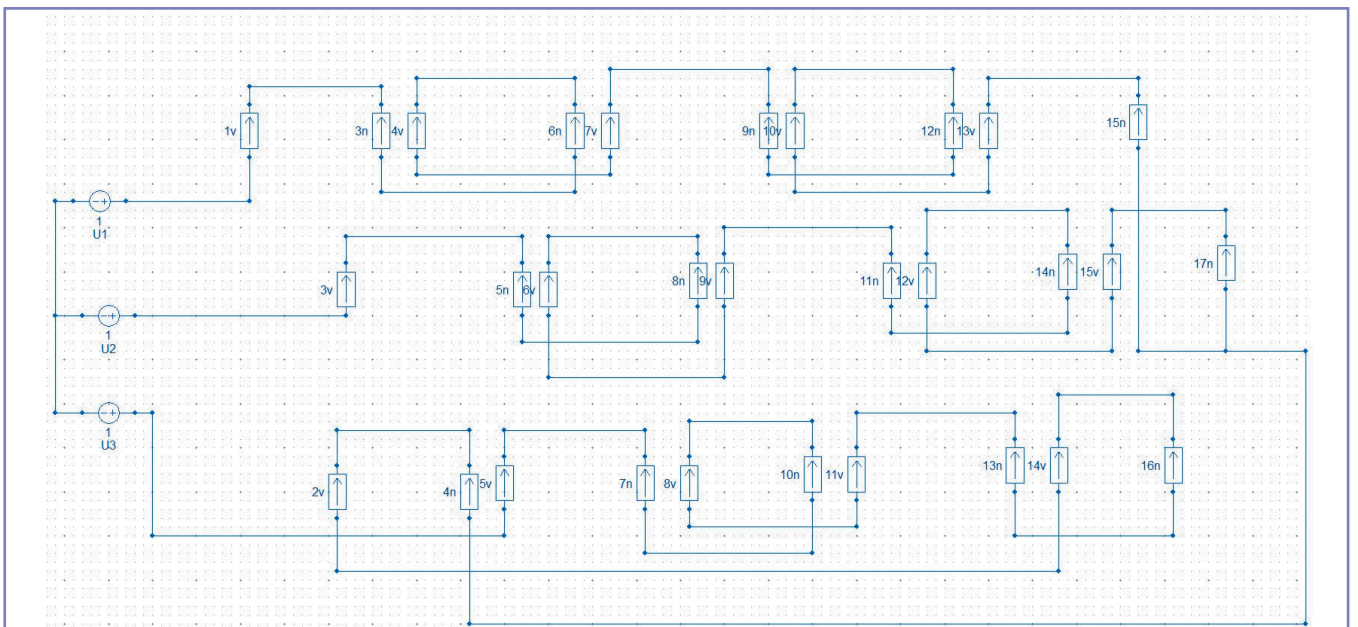


Рис. 5. Схема обмотки статора генератора.

фейс, простота и высокая скорость вычислений. В связи с этим программный комплекс Elcut был выбран в качестве инструмента для расчета и анализа характеристик магнитного поля генератора.

В результате расчета состояния электромагнитного поля генератора были получены такие параметры, как ЭДС (рис. 4), синхронные индуктивные сопротивления.

ЭДС определялась как

$$E_i = \frac{\Delta \Psi_i}{\Delta t} \cdot W_\phi \cdot L_\delta \quad (2)$$

где $\Delta \Psi_i$ – потокосцепление секции (вычисляется как разность потокосцеплений сторон секции) на 1 м,

$$\Delta \Psi_i = \Psi_{a-} - \Psi_{a+} \quad (3)$$

W_ϕ – число витков фазы,
 L_δ – длина активной части генератора с учетом заполнения пакета сталью,

Δt – шаг интегрирования.

Для определения синхронного индуктивного сопротивления к полевой модели генератора была подключена схема обмотки статора, питание которой осуществлялось от источника переменного тока (рис. 5). Синхронное индуктивное сопротивление определялось как мнимая часть комплексного сопротивления фазы

$$X_d = \text{Im} \left(\frac{\dot{U}}{\dot{I}} \right) \quad (4)$$

где $\dot{U}$ – вектор напряжения,
 $\dot{I}$ – вектор тока.

При определении синхронного индуктивного сопротивления дополнительно было учтено насыщение магнитопровода от магнитного потока ротора путем проведения моделирования магнитного состояния генератора на холостом ходу (рис. 6).

Таким образом, проведенные расчеты позволили определить основные характеристики генератора с учетом особенностей работы на выпрямительную нагрузку.

Блок питания и коммутации БП

Блок питания и коммутации БП представляет собой двухканальное выпрямительно-преобразовательное устройство и предназначен для:

- электропитания САУ напряжением постоянного тока;
- развязки цепей основного и резервного источников питания;
- защиты от перегрузок и короткого замыкания в цепях нагрузки;
- коммутации электрических цепей исполнительных механизмов;
- бесперебойного питания особо ответственных потребителей САУ при про-

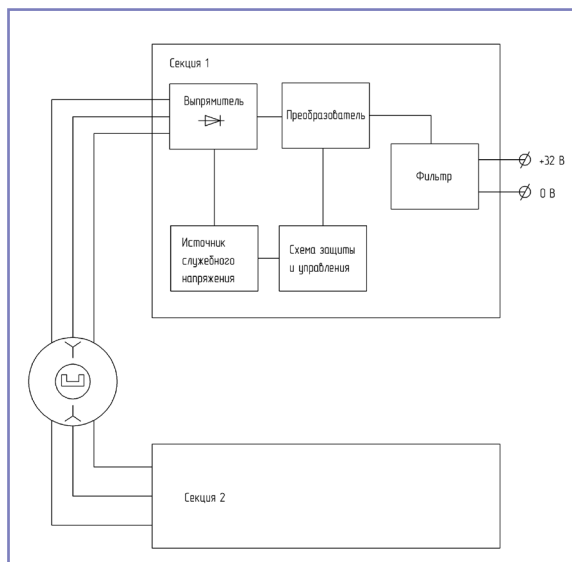


Рис. 7. Функциональная схема выпрямительно-преобразовательной секции.

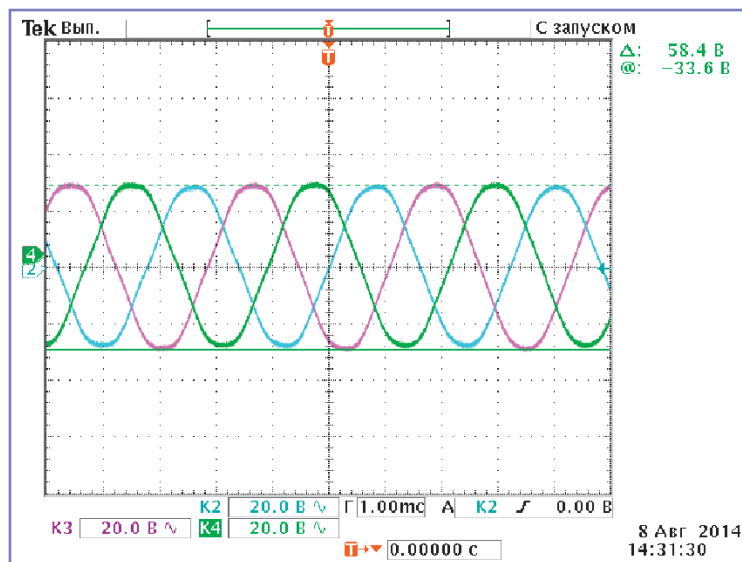


Рис. 8. ЭДС генератора.

валах интегрированного напряжения от первичных источников питания, фильтрации выходного напряжения питания для исключения высокочастотных помех, формирования и выдачи частотного сигнала, пропорционального частоте вращения ротора компрессора высокого давления;

- осуществления встроенного контроля и формирования сигналов исправности и отказа.

БП состоит из двух выпрямительно-преобразовательных секций, каждая из которых состоит из:

- выпрямителя;
- стабилизированного преобразователя без гальванической развязки;
- схемы защиты и управления;
- выходного фильтра;
- схемы формирования частотного сигнала;
- источника служебного напряжения.

Функциональная схема одной выпрямительно-преобразовательной секции представлена на рис. 7.

На вход каждой секции с трехфазной обмотки генератора подается напряжение переменного тока переменной частоты 3~150–500 Гц 18–60/31–105 В. Выпрямитель осуществляет трехфазное двухполупериодное выпрямление переменного тока и без фильтрации подает выпрямленное на-

пряжение на стабилизированный преобразователь.

Преобразователь выполнен по схеме понижающего преобразователя со стабилизацией выходного напряжения на уровне 32 ± 1 В, работающего при номинальной нагрузке в режиме непрерывного тока дросселя, а в режиме холостого хода переходящего в режим прерывистого тока. На выходе преобразователя имеется накопительный емкостный фильтр, обеспечивающий заданный уровень пульсации напряжения.

Выходное напряжение преобразователя складывается с напряжениями линий бортовой сети по схеме «Или» и подается на помехоподавляющий фильтр. После помехоподавляющего фильтра интегрированное напряжение подается на четыре линии питания нагрузки.

К каждой выходной линии питания подключена схема контроля выходного напряжения, которая контролирует уровень выходного напряжения и передает на схему информационного обмена с внешними системами сигнал исправности (напряжение на линии в пределах от 30 В до 34 В).

Источник служебного напряжения формирует напряжения для питания устройств, входящих в состав выпрямительно-преобразовательной секции,

а также схемы информационного обмена с внешними системами.

Схема защиты и управления управляет работой преобразователя, в том числе запрещает его работу при недопустимых режимах работы генератора и коротких замыканиях в нагрузке.

Схема формирования частотного сигнала формирует сигнал переменной частоты синусоидальной формы с амплитудой, пропорциональной частоте вращения компрессора высокого давления, и передает его во внешние системы.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Для подтверждения достоверности и точности расчетов приведем сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными СЭС.

Экспериментальные и расчетные параметры представлены в таблице 2.

Осциллограмма ЭДС генератора показана на рис. 8.

Расхождение расчетных и экспериментальных параметров составило не более 4%, что подтверждает корректность подхода к расчету.

Выводы

1. Разработана система электропитания и коммутации СЭС для электрифицированного авиадвигателя.

2. СЭС построена по принципу функционального резервирования за счет применения в конструкции генератора двух независимых трехфазных обмоток статора, что повысило «живучесть» системы.

3. При проектировании генератора учтена особенность работы генератора на выпрямительную нагрузку.

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных параметров генератора СЭС.

Параметр	Опыт	Расчет
Индуктивное сопротивление, мГн	0,134	0,139
ЭДС обмотки, В	20,65	21,09
Напряжение на клеммах генератора под нагрузкой, В	20,5	20,051

4. Разработанная в программе Elcut полевая математическая модель позволила определить основные параметры генератора.

5. Достоверность проведенных расчетов подтверждена экспериментальными данными.

Литература:

1. Волокитина Е.В. Вентильные генераторы и стартер-генераторы в концепции электрифицированного самолета: современное состояние вопроса / Волокитина Е.В., Головин С.Б. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2005. – № 5. – с. 25–31.
2. Волокитина Е.В. Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Ч. 1 // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 4. – с. 24–29.
3. Власов А.И. Выбор типа стартер-генератора для автономных подвижных объектов / Власов А.И., Волокитина Е.В. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 5. – с. 2–6.
4. Однокопылов Г.И. Отказоустойчивый асинхронный электропривод / Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. С. 157–162.
5. Рожнов Н.М., Русаков А.М., Сугробов А.М., Тыричев П.А. Вентильные генераторы автономных систем электроснабжения. – М.: Издательство МЭИ, 1996. – 280 с.
6. Власов А.И. Применение полевых математических моделей для проектирования обмоток вентильных электродвигателей / Власов А.И., Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – С. 12–15.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2006

году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов.

Ковязин Владимир Иванович – родился в 1954 году. В 1976 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Автоматика-телемеханика». Опыт работы в области разработки электронно-вычислительной техники – 30 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором 1-й категории АО «Электропривод».

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». 13 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает главным конструктором АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Имеет более 25 научных трудов.

Никитин Владимир Владимирович – родился в 1980 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». 13 лет работает в области авиационного электропривода. В настоящее время работает инженером-конструктором 1-й категории АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Автор более 15 научных трудов.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer-project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 80 scientific works.

Kovyasin Vladimir – was born in 1954. In 1976 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) with specialization in «Automatics-telemechanics». His work experience in the area of designing of computer technology is 30 years. At present he works as 1 degree design-engineer in JSC «Electroprivod».

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) with specialization in «Electromechanics». He is a candidate of Technical Sciences. In 2010 he defended a thesis on: «A magneto-electric starter-generator in the electrical power supply system of airplanes of new generation». He has been working in the area of aviation electrical machines for 13 years. At present he works as chief designer in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has more than 25 scientific works.

Nikitin Vladimir – was born in 1980. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) with specialization in «Electromechanics». He has been working in the area of aviation electrical drive for 13 years. At present he works as 1 degree design-engineer in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has more than 15 scientific works.

Состояние и перспективы создания высокоэффективных электроприводов для более электрифицированных и роботизированных образцов отечественной техники нового поколения

// State of the art and prospects for development of high-performance electric drives for new generation of native more electrified and robotic equipment //

Волокитина Е. В., к. т. н.,
АО «Электропривод», г. Киров
Опалев Ю. Г., к. т. н.,
АО «Технодинамика», ОП, г. Киров

*В статье проведен анализ современного состояния в области высокотехнологичных электроприводов на примере изделий АО «Электропривод», г. Киров. Выявлено основное направление развития техники специального назначения, заключающееся в применении автоматизированных комплексов для управления автономными объектами. Приведенные материалы были представлены для Десятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» (6–10 апреля 2015 года, п. Домбай, Карачаево-Черкесская республика).
Ключевые слова: робототехника, электропривод, мехатронный модуль, электромеханизм, вентильный электродвигатель, преобразователь вида движения.*

В современном мире авиационно-космическая промышленность является самой наукоемкой и высокотехнологичной. С каждым годом летательные аппараты (ЛА) становятся все более надежными, функциональными, энергоэффективными и, как следствие, более сложными.

В настоящее время наиболее перспективным направлением авиастроения является создание так называемого «полностью электрического самолета» (ПЭС). Это направление, наряду с усовершенствованиями аэродинамики, силовой установки, конструкции ЛА и его агрегатов, рассматривает возможности повышения летно-технических характеристик путем ликвидации отбора воздуха от авиадвигателя, применения электродистанционных систем управления полетом, создания единой вторичной энергосистемы.

АО «Электропривод» более 35 лет занимается вопросами реализации на-

*The analysis of a state of the art in the area of high-performing electric drives, based on products of JSC «Electroprivod» (Kirov city) are under consideration in the paper. The main trend in special purpose equipment evolution was identified, and it about usage of automated systems for autonomous object control. This information were provided for the 10-th All-Russian research and practice conference «Advanced Systems and Control Problems» (April 6–10, 2015, Domбай, Karachay-Cherkessia Republic).
Keywords: robotics, electric drive, mechatronic module, electric actuator, Brushless DC electric motor, movement converter.*

учной концепции ПЭС. Одним из примеров является разработанный в 90-е годы прошлого века автоматизированный электропривод (ЭП) ЭПЗ-77 для системы

управления механизацией крыла (СУМК) самолета Ан-70, который был первым (в мировой практике) ЭП нового поколения, внедренным в СУМК современного самолета вместо гидравлического привода [1]. Эффективность такой замены проявилась, прежде всего, в уменьшении массы СУМК, а также в повышении ее безотказности, точности и устойчивости, упрощении обслуживания.

В АО «Электропривод» уже разработано несколько аналогичных систем:

- ЭПЗ-77М, ЭПЗ-324 – ЭП для выпуска и уборки закрылков самолетов Ан-70 и Ту-324;
- ЭППЗ-334, ЭППЗ-204 – ЭП для выпуска и уборки предкрылков и закрылков самолетов Ту-334 и Ту-204;
- ЭПС-324 – ЭП стабилизатора самолета Ту-324;
- ЭПТ-324 – ЭП триммирования и регулирования загрузки рычагов систем управления самолета Ту-324.

Одной из новейших разработок является электропривод ЭППЗ-204, состав которого показан на рис. 1. ЭППЗ-204 предназначен для автоматизированного управления предкрылками и закрылками самолета Ту-204 в режимах взлета, посадки и ухода на второй круг.



Рис. 1. Электропривод ЭППЗ-204.

Собственный опыт в разработке электрооборудования для электрифицированных объектов, а также постоянный мониторинг и анализ новейших отечественных и зарубежных материалов, элементной базы и инновационных технических решений подтверждают низкую массо-энергетическую эффективность автономных объектов при использовании нескольких вторичных источников энергии (пневматической, гидравлической и механической) за счет потерь мощности при многократном преобразовании энергии [2].

Разработка и внедрение технологий робототехники являются одним из приоритетных направлений, используемых при создании новых и модернизации существующих на вооружении образцов военной техники [3].

Анализ тенденций создания перспективных образцов военной техники (ВТ) показывает, что существенное повышение технических характеристик и функциональных возможностей новых образцов ВТ могут обеспечить только принципиально новые подходы, основанные на использовании технологий искусственного интеллекта, в том числе робототехники. Связано это с тем, что объекты ВТ, в отличие от объектов гражданского назначения, ориентированы на работу в условиях неполноты исходящей информации и неопределенности среды функционирования и внешних воздействий, к которым можно отнести непредусмотренное изменение координат целей, собственных характеристик и т.д.

Очевидно, что многие из поставленных проблем являются общими как для беспилотных летательных аппаратов, так и для роботов наземного и морского базирования. Поэтому создание бортовых систем управления, обработки информации и наведения должно обязательным образом предполагать обоснованную унификацию (или унифицированный ряд основных подсистем).

Более того, решение этих же проблем представляет большой интерес и для пилотируемой авиации, например:

- вопрос о степени интеллектуализации бортовой системы является ключевым при обсуждении концепции самолетов 5-го поколения;
- создание интеллектуального цифрового автопилота крайне важно для обеспечения безопасности полетов на малых высотах, в сложных метеословиях, для обеспечения автоматической посадки на неподготовленную площадку приземления.

Следует также подчеркнуть, что развитие новых технологий управления может существенно улучшить технические характеристики традиционных систем ВТ за счет повышения быстродействия и точности приводных систем, совершенствования алгоритмов управления, обеспечивающих инвариантность к внешним возмущениям, и т.д. [4].

Базой для реализации модульного принципа построения нового поколения робототехнических конструктивно унифицированных функциональных компонентов является мехатроника.

Основой мехатроники является интеграция составляющих частей: функциональная, структурная, конструктивная интеграция элементов в мехатронных модулях; аппаратно-программная интеграция исполнительных и интеллектуальных элементов.

Суть мехатронного подхода состоит в объединении элементов, имеющих принципиально различную физическую природу, в интегрированные модули. Интегрированные мехатронные модули отличаются повышенной надежностью, точностью выполнения движения, компактностью конструкции, экономической целесообразностью, но являются менее гибкими, ограничены для модернизации и реконфигурации. Поэтому мехатронный подход подразумевает различные уровни интеграции исходя из целесообразности [5].

Важнейшим из основных компонентов электрифицированной мехатронной системы является регулируемый ЭП. ЭП включает в себя следующие обязательные функциональные элементы:

- устройство управления на основе микроконтроллера или цифрового сигнального процессора, выполняющее информационное преобразование (прием, обработку входных сигналов, формирование и трансляцию управляющих воздействий, обмен данными с внешней системой, контроль состояния изделия и др.);
- силовой преобразователь, как правило, на основе автономного инвертора напряжения с реализацией широтно-импульсной модуляции (ШИМ);

- исполнительный электродвигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую;

- передаточное устройство – механическое устройство для соединения вала электродвигателя с рабочим органом объекта;

- датчики обратной связи (по положению, скорости перемещения) для преобразования механических величин в электрический сигнал;

- интерфейс с внешней САУ, внутренние интерфейсы.

В общем виде современный ЭП представляет собой силовую часть, включающую трехфазный бесконтактный синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов с датчиком угловых перемещений, установленным на валу, и силовым модулем с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения. На выходе инвертора формируется напряжение регулируемой амплитуды и частоты, подаваемое на обмотку статора электродвигателя. Система управления реализуется на основе микроконтроллера и представляет собой трехконтурную систему регулирования с контурами тока, скорости и положения, которая, используя сигналы обратной связи, регулирует момент и частоту вращения электродвигателя в соответствии с получаемым заданием.

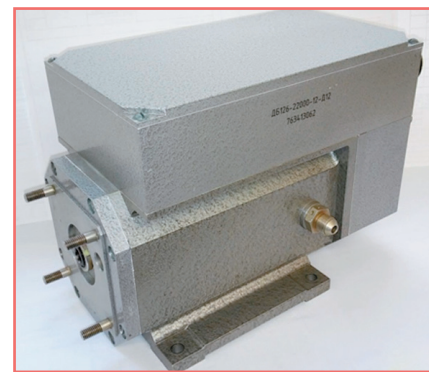


Рис. 2. Электродвигатель ДБ126-22000-12-Д12.

Примером мехатронного модуля может служить электродвигатель ДБ126-22000-12-Д12 (рис. 2) разработки АО «Электропривод».

Таблица 1.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	270
Максимальная мощность, кВт	25
Максимальная частота вращения, об/мин	12200
Диапазон регулирования частоты вращения	1:30
Охлаждение	Жидкостное
Габарит В×Л×Н, мм	157×290×207
Масса, кг	14,65



Рис. 3. Планетарная роliko-винтовая передача.

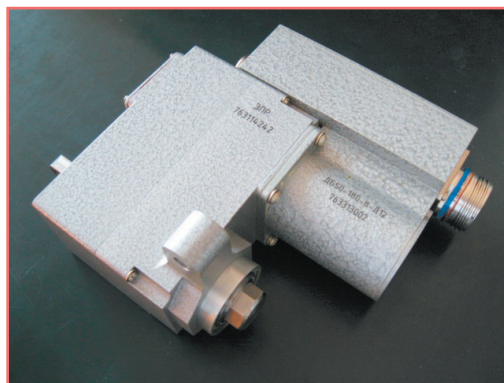


Рис. 4. Электропривод ЭПР с электродвигателем ДБ50-180-8-Д12.

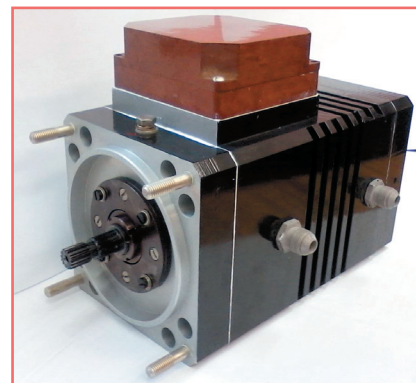


Рис. 5. Электродвигатель ДБ160-30000-60-U.

Основные технические характеристики электродвигателя ДБ126-22000-12-Д12 приведены в таблице 1.

Электродвигатель рассчитан на продолжительный режим работы с эквивалентной мощностью на выходном валу 4,8 кВт. Максимальная мощность на выходном валу реализуется при кратковременном режиме работы в течение 3 минут за счет перегрузочной способности электродвигателя.

Коэффициент перегрузки ЭД по мощности

$$k_p = \frac{P_{max}}{P_3} = \frac{25}{4,8} = 5,2$$

Рассмотренная система – вентильный электродвигатель постоянного тока (ВДПТ). ВДПТ фактически представляет собой законченный ЭП, однако в большинстве случаев рабочие органы автономных объектов требуют либо значительно больших вращающих усилий и одновременно достаточно низких частот вращения (в сравнении с возможностями электродвигателя), либо приводных механизмов поступательного движения. В таких случаях необходимо применение понижающих механических передач – редукторов, а при поступательном виде движения необходим преобразователь вида движения.

При разработке ЭП поступательного и вращательного движений особое внимание уделяется люфтам и упругим деформациям, которые являются основными причинами возникновения в электроприводе статической ошибки. Наибольшего значения статическая ошибка достигает при реверсе и при изменении знака нагрузки, действующей на выходное звено привода. В настоящее время для обеспечения миниатюризации и, в случае необходимости, получения беззазорного соединения в винтовых преобразователях ЭП поступательного движения применяется несколько конструктивно-технологических способов устранения зазоров.

В шарико-винтовых преобразователях (ШВП) вида движения повышение осевой жесткости передачи и точности позиционирования возможно за счет применения специального профиля резьбы или создания предварительного натяга путем регулировки или взаимного расположения контактируемых деталей.

Для ЭП поступательного движения, обеспечивающих высокую надежность, кинематическую точность, плавность движения во всем диапазоне скоростей, максимальный КПД, наибольшую нагрузочную способность и жесткость, наиболее перспективными в настоящее время являются планетарные роliko-винтовые передачи (ПРВП).

ПРВП является разновидностью винтовой передачи «Винт-гайка качения», особенностью которой является установка резьбовых роlikов между винтом и гайкой, совершающих планетарное движение относительно оси ходового винта (рис. 3).

В отличие от ШВП и передач «Винт-гайка скольжения», ПРВП обладают более высокой надежностью и долговечностью, кинематической точностью, нагрузочной способностью, плавностью движения в зоне средних и больших скоростей, жесткостью и быстроходностью, что делает ПРВП наиболее перспективной. ПРВП обладает реверсивностью, то есть вращательное движение винта преобразуется в поступательное движение гайки и наоборот.

К недостаткам ПРВП следует отнести сложность конструкции и кинематики, высокие требования к точности изготовления деталей.

Примером мехатронного модуля поступательного движения с ПРВП может служить электропривод ЭПР с электродвигателем ДБ50-180-8-Д12 (рис. 4) разработки АО «Электропривод».

Основные технические характеристики ЭПР приведены в таблице 2.

Зачастую при необходимости получения высокой скорости рабочего органа, например, компрессора системы кондиционирования воздуха, требуется применение высокоскоростных электродвигателей [6].

Для высокоскоростных электрических машин основной проблемой при проектировании и эксплуатации является обеспечение механической прочности ротора [7]. Главная трудность здесь заключается в удержании постоянных магнитов от действий центробежных сил, возникающих при вращении ротора.

Одним из основных вариантов решения данной задачи является защита постоянных магнитов от разрушения банджом из высокопрочных немагнитных и неэлектропроводных сплавов, а также современных композиционных материалов.

На рис. 5 показан бесконтактный электродвигатель постоянного тока ДБ160-30000-60-U разработки АО «Электропривод».

Таблица 2.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	27
Усилие на выходном штоке, Н	6468
Скорость выходного штока, мм/с	От 10 до 20
Охлаждение	Воздушное
Габарит В×Л×Н, мм	60×190×165,5
Масса, кг	2,65

Таблица 3.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	270
Номинальная мощность, кВт	30
Номинальная частота вращения, об/мин	55000
Диапазон регулирования частоты вращения, тыс. об/мин	От 35 до 55
Охлаждение	Жидкостное
Габарит В×Л×Н, мм	161×290×161
Масса, кг	19,5

Таблица 4.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	27
Номинальное осевое усилие на выходном штоке, Н	От 98 до 3920
Скорость выходного штока, мм/с	От 1,5 до 10
Охлаждение	Воздушное
Габарит В×Л×Н, мм	От 35×61×210 до 82×107×363
Масса, кг	От 0,4 до 2,7

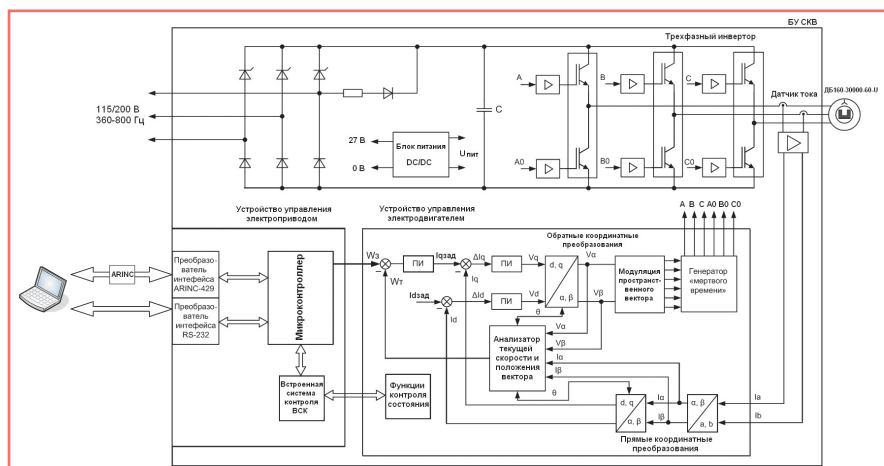


Рис. 6. Структурная схема ЭП с бездатчиковым управлением.

Основные технические характеристики электродвигателя ДБ160–30000–60-U приведены в таблице 3.

Дополнительной отличительной особенностью ДБ160–30000–60-U является отсутствие датчика положения ротора.

Перспективные методы бездатчикового управления преимущественно основаны на косвенном определении угла положения ротора электродвигателя, а также частоты вращения с применением наблюдателей, позволяющих вычислять неизмеряемые координаты и использовать их в системе регулирования.

Наблюдатель состояния выполняет вычисление всех параметров электро-

двигателя, необходимых для реализации алгоритма векторного управления, по информации о двух фазных токах статора и (или) двух значениях фазных напряжений, а также по параметрам его математической модели с помощью специальных алгоритмов [6].

Структурная схема ЭП с бездатчиковым управлением показана на рис. 6.

Наиболее существенным достоинством бездатчикового управления является высокая надежность системы в целом за счет отказа от применения механических датчиков положения ротора.

Многообразие современных магнитных материалов и магнитных систем, новейшие достижения в областях силовой и информационной электроники позволяют реализовывать различ-

ные алгоритмы управления ВДПТ для обеспечения регулирования выходных параметров ЭП. Кроме того, имеются потенциальные возможности дальнейшего совершенствования этого класса электрических машин в части конструктивных исполнения, повышения удельных, энергетических показателей, быстрой работы, увеличения надежности и срока службы [8].

В настоящее время в АО «Электропривод» существует задел электроприводов «старого поколения» с коллекторными электродвигателями постоянного тока, на основе которых можно создать «новое поколение» с существенно улучшенными техническими характеристиками.

Для замены устаревших ЭП и обеспечения развития техники специального назначения используется принцип унификации. Такой подход позволяет разрабатывать унифицированные ряды ЭП поступательного и вращательного движений, когда на единой конструктивной базе путем замены отдельных сборочных единиц обеспечивается заданный диапазон выходных параметров. Еще одним шагом для разработки рядов ЭП является их модульная компоновка. То есть, используя набор унифицированных элементов, составляющих основу, можно проектировать ЭП различных типов номиналов, что обеспечивает изготовление узлов и деталей по типовым технологическим процессам. Кроме того, указанные решения позволяют обеспечить соответствие технического уровня и показателей технологичности ЭП унифи-

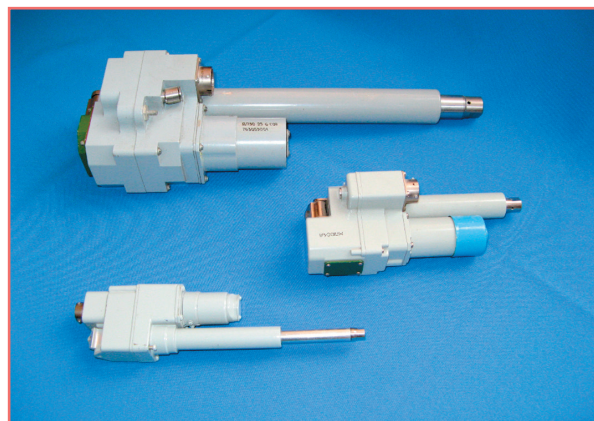


Рис. 7. Отрезок ряда электроприводов поступательного движения МП.



Рис. 8. Отрезок ряда электроприводов вращательного движения МПК.



Рис. 9. Отрезок ряда бесконтактных электродвигателей ДБ.

Таблица 5.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	27
Вращающий момент на выходном валу, Н·м	От 2 до 15
Частота вращения, об/мин	От 0,5 до 6
Охлаждение	Воздушное
Габарит В×Л×Н, мм	От 61×71×108 до 74×135×190
Масса, кг	От 0,36 до 3,1

цированного ряда нормативам отрасли.

АО «Электропривод» имеет многолетний опыт создания рядов электродвигателей и электромеханизмов. Примером могут послужить ряды электромеханизмов поступательного движения серии МП и вращательного движения серии МПК, показанные на рис. 7 и 8, а также ряды бесконтактных электродвигателей ДБ (рис. 9) и ДБМ (рис. 10).

Основные технические характеристики электромеханизмов поступательного движения МП приведены в таблице 4. Электромеханизмы МП применяются практически на всех современных самолетах и вертолетах [9]. В качестве преобразователя вида движения используется ШВП.

Основные технические характеристики электромеханизмов враща-

тельного движения МПК приведены в таблице 5. Электромеханизмы МПК предназначены для привода воздушных заслонок систем кондиционирования воздуха, а также для привода топливных кранов, применяются на современных самолетах и вертолетах [9].

В настоящее время ведутся работы по модернизации электромеханизмов МП и МПК с целью обеспечения соответствия современным требованиям к высокоэффективным ЭП за счет применения мехатронных модулей на основе ВДПТ.

Основные технические характеристики бесконтактных электродвигателей ДБ приведены в таблице 6. Электродвигатели ДБ применяются в автоматизированных электроприводах специального назначения [9].

Таблица 6.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	27, 48, 270
Механическая мощность на выходном валу, Вт	От 25 до 20000
Частота вращения, об/мин	От 8000 до 15000
Охлаждение	Воздушное
Габарит Д×Н, мм	От Ø25×56 до Ø158×215
Масса, кг	От 0,14 до 12,5

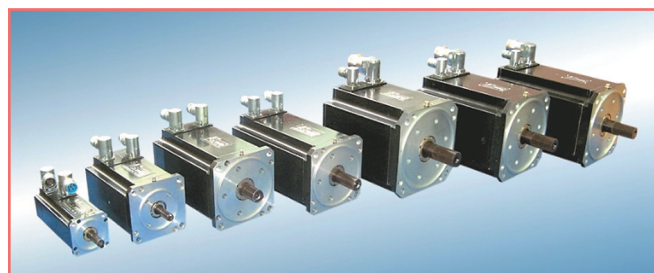


Рис. 10. Отрезок ряда бесконтактных электродвигателей серии ДБМ.

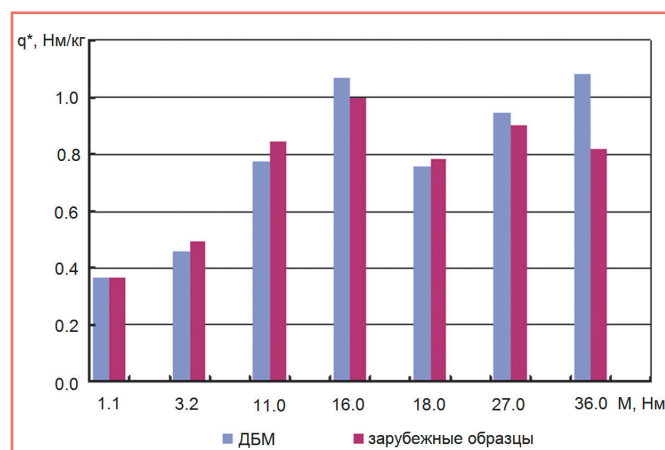


Рис. 11. Сравнение электродвигателей серии ДБМ с зарубежными образцами по удельному моменту.

Бесконтактные электродвигатели ДБ выполнены на основе редкоземельных постоянных магнитов. Примененные в электродвигателях материалы обеспечивают работу при температуре окружающей среды от минус 60 до +85 °С, а также механическую прочность при воздействии ударов и вибрации.

Основные технические характеристики бесконтактных электродвигателей серии ДБМ приведены в таблице 7. Электродвигатели серии ДБМ предназначены для работы в составе ЭП с высокими динамическими характеристиками и точностью позиционирования, удовлетворяющими требованиям исполнительных механизмов универсальных технологических роботов и другого прецизионного металлообрабатывающего оборудования [10].

Таблица 7.

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	540
Вращающий момент на выходном валу, Н·м	От 1,1 до 36
Частота вращения, об/мин	3000, 4500, 6000
Диапазон регулирования частоты вращения	1:10000
Охлаждение	Воздушное
Габарит В×Л×Н, мм	От 72×72×175 до 192×192×295
Масса, кг	От 3 до 33,4

Электродвигатели способны выдерживать трехкратную перегрузку по току и вращающему моменту. В настоящее время разработаны 11 типов электродвигателей серии ДБМ.

Электродвигатели серии ДБМ были разработаны с целью импортозамещения аналогичных электродвигателей фирмы Siemens, сравнение с которыми по удельному моменту показано на рис. 11 [10].

АО «Электропривод» имеет обширный опыт в области разработки регулируемых ЭП на основе ВДПТ [11].

Изделия, разработанные АО «Электропривод», работают в системах запуска авиадвигателей, управления взлетом, полетом и посадкой самолетов, бортовых системах электроснабжения, обогрева, кондиционирования воздуха, выпуска и уборки шасси, регулирования по высоте сидения кресла летчика, вращения антенн, перемещения контейнеров, в стеклоочистителях и в других системах летательных объектов, в системах управления реакторов типа РБМК атомных электростанций, в различных системах газоперекачивающих и энергетических агрегатов, успешно используются в медицинской хирургической технике.

Разрабатываемые ЭП имеют высокие быстродействие, точность позиционирования, хорошие энергетические и эксплуатационные характеристики, низкие массу и габариты, поэтому в полной мере могут быть применены в робототехнике.

Работы как по созданию перспективных образцов высокотехнологичной продукции, так и по модернизации существующих изделий активно ведутся АО «Электропривод» в направлениях разработки электроприводов:

- не уступающих или превосходящих по своим техническим характеристикам зарубежные аналоги;
- решающих вопрос импортозамещения и ликвидации зависимости российских разработчиков электрифицированных робототехнических комплексов от зарубежных производителей;
- выполняющих комплекс требований: высокая плавность и точность хода, минимальные масса и габариты, высокие динамические показатели, низкое энергопотребление, простота конструкции и минимальная стоимость.

Литература:

1. Волокитина Е.В., Свиридов В.И., Шалагинов В.Ф. Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами для электроприводов полностью электрифицированного самолета // Труды IV Междунар. симпоз. ЭЛМАШ-2004. М.: «Интерэлектромаш». – 2004. – с. 172–177.
2. Волокитина Е.В., Головизнин С.Б. Использование потенциальных возможностей вентильных электродвигателей с постоянными магнитами – основа реализации концепции полностью электрифицированного самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – № 3. – с. 31–33.
3. Рубцов И.В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3. – с. 14–20.
4. Ваганов Н.И. Перспективы развития базовых военных технологий в области создания систем управления и обработки информации // Мехатроника, автоматизация, управление, № 3, 2009 с. 2–4.
5. Компоненты интеллектуальных мехатронных модулей: [монография] / В.А. Нестерин, Е.В. Волокитина; М-во образования и науки Рос. Федерации, Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова. – Чебоксары: [б. и.], 2014.
6. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Москвин Е.В., Тебеньков Ф.Г. Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – с. 34–39.
7. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Хохлов О.В. Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 4. – с. 39–44.
8. Власов А.И., Волокитина Е.В., Малюгин А.А., Опалев Ю.Г. Исследование магнитной системы высокоскоростных бесконтактных электродвигателей постоянного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – с. 23–26.
9. Овечкин О.И., Миронов В.А. Электромеханизмы и электродвигатели разработки ОАО «Электропривод» // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – с. 5–11.
10. Волокитина Е.В., Данилов Н.А., Нестерин В.А., Опалев Ю.Г. Новая серия отечественных вентильных электродвигателей для универсальных технологических роботов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 7. – с. 13–16.
11. www.epv.ru

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электро-механика». Кандидат технических наук. В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». 13 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником отдела расчетов АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Имеет 20 научных трудов.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer-project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 80 scientific works.

Opalev Yuriy – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He is a Candidate of Science. In 2011 he defended a thesis about «AC electronic motors for precise fast-acting drives of mechatronic process models». He has been working in the area of aircraft electrical machines for 13 years. At present he is a head of the accounts department in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has 20 scientific works.

Особенности разработки малогабаритного слаботочного электромагнита с повышенным быстродействием для замка реверсивного устройства

// Features development of compact low-current electromagnet improve performance for locks of actuator thrust reverser //

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

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

In this article describes the design of a DC electromagnet retractable type with high performance, and provides key recommendations to the calculation.
Keywords: DC electromagnet, field model, magnetic system.

Электромагниты часто используются в виде элементов силового привода и в коммутационной аппаратуре, служащей для дистанционного включения и выключения цепей.

Необходимость применения электромагнитов в летательных аппаратах возникает, когда исполнительный механизм имеет относительно малый ход и не требуется преодоления больших противодействующих усилий.

В общем виде электромагнит состоит из следующих основных частей:

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

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

Наибольшее распространение получили втяжные электромагниты в качестве силовых, основным назначением которых является совершение работы на протяжении определенного пути, сопровождающееся приведением в движение рабочих органов различных механизмов.

Втяжные электромагниты постоянного тока, как правило, выполняются с массивным магнитопроводом. В большинстве случаев они имеют цилиндрическую форму.

При проектировании электромагнита для заданных условий работы

с оптимальными массогабаритными показателями руководствуются целесообразностью выбора размеров основных частей электромагнита. В первую очередь это относится к размерам полюса и якоря, так как они главным образом определяют размер обмотки электромагнита.

Малое сечение полюса и якоря может привести к большой величине намагничивающей силы, необходимой для проведения магнитного потока через рабочий воздушный зазор и магнитопровод. Завышенные размеры полюса и якоря приводят к чрезмерному увеличению массы электромагнита.

Помимо размеров магнитопровода на характеристики электромагнита также влияют длина хода якоря и форма рабочего воздушного зазора.

Выбор наиболее рациональной формы воздушного зазора (плоская, конусная, усеченно-конусная), обеспечивающего 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.

Рекомендованные диапазоны значений конструктивного фактора:

- для втяжных электромагнитов с плоским стопом $k = 16-90$;

- для втяжных электромагнитов с углом конуса якоря $\alpha = 90^\circ$ $k = 4-16$;

- для втяжных электромагнитов с углом конуса якоря $\alpha = 60^\circ$ $k = 1,8-4$.

Разработанный электромагнит относится к группе нейтральных электромагнитов постоянного тока, рабочий магнитный поток в которых создается с помощью обмотки постоянного тока. Действие электромагнита зависит только от величины магнитного потока и не зависит от его направления, а следовательно, и от направления тока в обмотке электромагнита [3].

Особенности разработанного электромагнита

Электромагнит разработан с применением конструктивных решений, основных материалов и покрытий, отработанных на изделии-аналоге [5], и предназначен для управления включением замка реверсивного устройства авиадвигателя ПД-14 [4].

Внешний вид электромагнита показан на рис. 1.

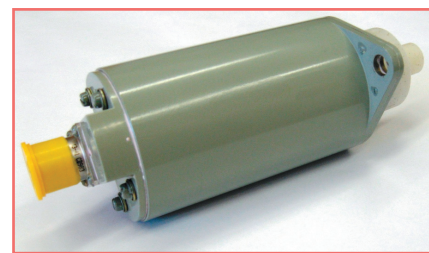


Рис. 1. Внешний вид электромагнита.

Якорь под действием электромагнитных сил перемещается вдоль внутренней поверхности щита, 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 на штоке уплотнительного устройства для обеспечения требования по водонепроницаемости и его быстродействие – время срабатывания электромагнита при ходе

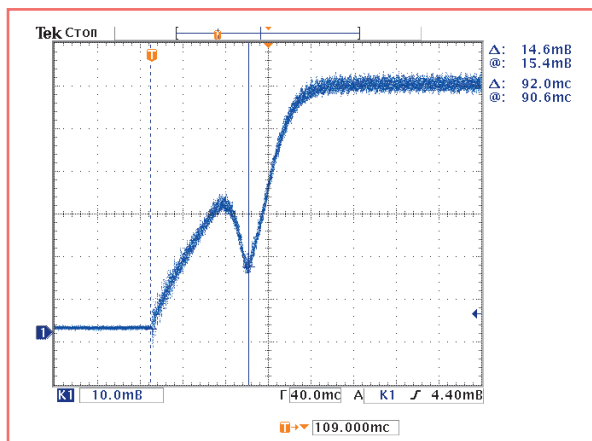


Рис. 2. Осциллограмма тока электромагнита.

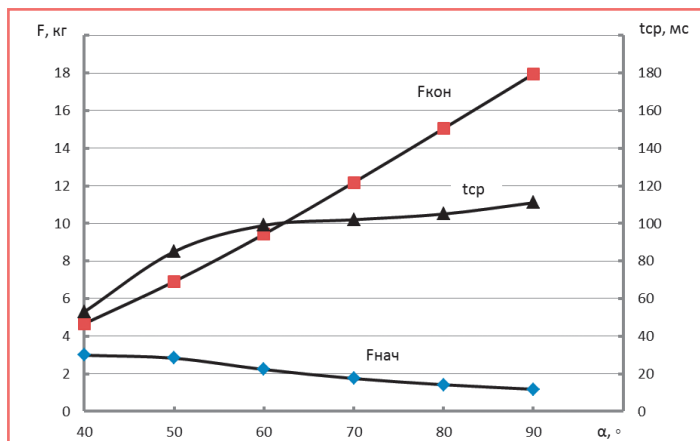


Рис. 3. Зависимости усилия и времени срабатывания электромагнита от величины угла конуса якоря.

якоря 9,5 мм – не более 0,1 с. Также особенностью электромагнита является высокое значение напряжения отпущения.

Основной проблемой при разработке электромагнита является реализация высокого быстродействия. Для решения данной проблемы необходимо установить, какие факторы влияют на время срабатывания и тем самым на быстродействие электромагнита.

Полная величина времени срабатывания электромагнита складывается из времени трогания и времени движения.

Как время трогания, так и время движения в первую очередь зависят от соотношения между полезной работой, которую должен произвести электромагнит, и мощностью его обмотки [2]. Кроме того, время трогания в значительной степени зависит от коэффициента запаса обмотки по току срабатывания, а время движения – от величины хода якоря и массы движущихся частей.

В ходе проведения испытаний электромагнита была снята осциллограмма тока, потребляемого электромагнитом (рис. 2), на которой видно, что значительная часть времени срабатывания приходится на время трогания. Таким образом, основной задачей при разработке быстродействующего электромагнита является уменьшение времени трогания.

Как показали исследования [2], при заданном начальном рабочем зазоре и сечении якоря существует оптимальное число витков катушки электромагнита, при котором время трогания будет минимальным. Также время трогания будет тем меньше, чем меньше сопротивление катушки. С учетом сказанного, в разработанном электромагните была применена катушка с оптимальными обмоточными данными для обеспечения максимального быстродействия.

Для быстродействующих электромагнитов необходимо, чтобы тяговое

усилие электромагнита при начальном зазоре намного превосходило противодействующую силу. Кроме обмоточных данных, на начальное тяговое усилие электромагнита влияет и конфигурация магнитопровода.

В ходе проектирования было исследовано влияние угла конуса якоря на усилие и время срабатывания электромагнита. Зависимости времени срабатывания и усилия, развиваемого электромагнитом, от величины угла конуса якоря показаны на рис. 3, где $F_{нач}$ и $F_{кон}$ – начальное и конечное усилия, развиваемые электромагнитом, кг; t_{cp} – время срабатывания электромагнита, мс.

Помимо конфигурации рабочего воздушного зазора, на характеристики электромагнита влияет также его расположение относительно обмотки, то есть соотношение длин полюса и якоря. На рис. 4 показаны определенные в ходе расчета тяговые характеристики электромагнита при различной длине якоря и постоянной длине электромагнита.

Как видно из рисунка, для электромагнита существует оптимальное расположение воздушного зазора относительно обмотки, при котором создается наибольшее тяговое усилие электромагнита, что положительно сказывается на

его быстродействии.

Для обеспечения необходимого напряжения отпущения в электромагните применена пружина с большим усилием в сжатом состоянии, а также введен немагнитный промежуток в месте соединения фланца с корпусом.

Результаты расчетов электромагнита

При кажущейся простоте устройства электромагнитов вопросы их теории и расчета достаточно сложны. Это обусловлено нелинейностью свойств стали и сложностью распределения магнитного поля в воздушных зазорах. Кроме того, влияние человеческого фактора при обработке и сборке электромагнитов вызывает сложности в оценке корректности расчета в связи со значительными отклонениями теоретических данных, используемых для расчета, от фактических.

Указанные обстоятельства не позволяют с первого раза получить, основываясь на расчетных данных, электромагнит с требуемой точностью заданных параметров. Поэтому, как правило, сначала на основании расчетов изготавливают макетный образец и по результатам испытаний с учетом внешних

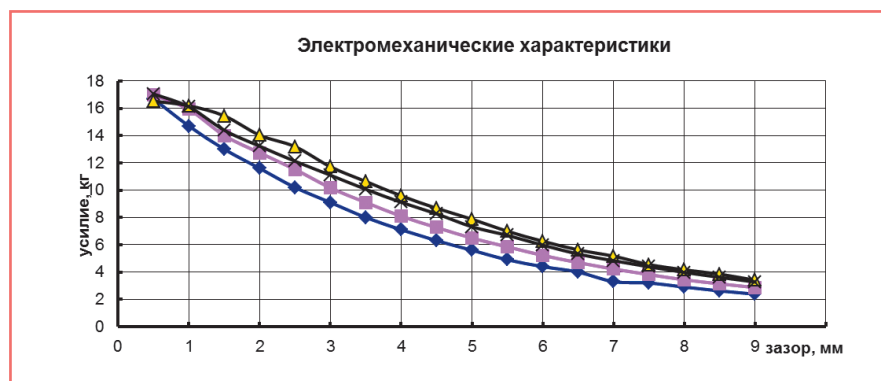


Рис. 4. Тяговые характеристики электромагнита при различной длине якоря.

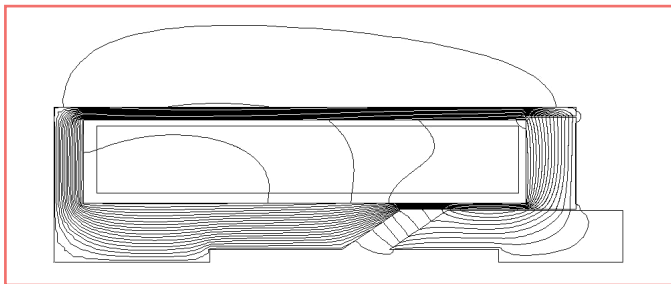


Рис. 5. Картина магнитного поля электромагнита.

воздействующих факторов выполняют окончательный расчет, на основании которого изготавливаются серийные образцы электромагнитов.

Одной из основных характеристик, определяющей свойства электромагнита, является тяговая характеристика, представляющая собой зависимость электромагнитной силы от положения якоря или рабочего зазора $F_z = f(\delta)$ для различных постоянных значений напряжения, подведенного к обмотке. Для движения якоря необходимо, чтобы в любой момент времени электромагнитная сила была больше усилия, приложенного к якорю и направленного противоположно действию электромагнитной силы.

Окончательный аналитический расчет проведен с учетом эмпирических коэффициентов, полученных по результатам испытаний макетного образца.

Для подтверждения результатов аналитического расчета проведено математическое моделирование электромагнита с использованием метода конечных элементов.

Картина магнитного поля электромагнита при нулевом ходе штока показана на рис. 5.

В результате математического моделирования и аналитического расчета получены электромеханические характеристики электромагнита без учета противодействующего усилия пружины.

Электромагнит был изготовлен, и опытным путем была получена электромеханическая характеристика.

Электромеханические характеристики, полученные математическим моделированием, аналитическим расчетом и опытным путем, показаны на рис. 6.

Анализируя результаты, можно сделать вывод о целесообразности использования математического моделирования электромагнитов благодаря небольшой погрешности расчета.

В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

- разработан быстродействующий электромагнит, соответствующий требованиям технического задания;

- аналитический расчет подтвержден математическим моделированием и опытным путем;

- доказана целесообразность математического моделирования электромагнитов;

- работоспособность электромагнита подтверждена лабораторными испытаниями в условиях заданных внешних воздействующих факторов и стендовыми испытаниями в составе авиадвигателя.

Литература:

1. Сапиро Д. Н. Авиационные аппараты и механизмы. – М., Оборониз, 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. Электромагнит для замка реверсивного устройства ЭМТ-XXXX: Пояснительная записка к техническому проекту / АО «Электропривод». КУИБ.677141.001 ПЗ – ТП. – Киров, 2013. – 28 с.
5. 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.

Рубцова Людмила Александровна – родилась в 1952 году. В 1975 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика». Имеет 39-летний опыт работы в области разработки систем и блоков управления запуском авиадвигателей. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Имеет 5 печатных трудов. Награждена Почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации.

Малюгин Антон Александрович – родился в 1985 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 7 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором 2-й категории АО «Электропривод». Имеет 2 научных труда.

Печенкина Надежда Андреевна – родилась в 1953 году. В 1976 году окончила Кировский политехнический институт по специальности

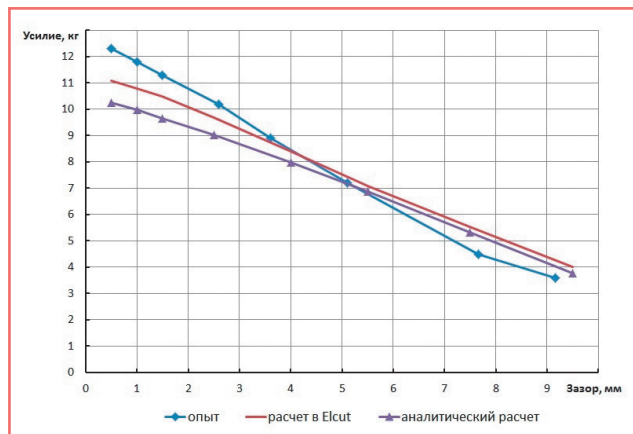


Рис. 6. Электромеханические характеристики электромагнита.

«Электрические машины и аппараты». Имеет 38-летний опыт работы в области проектирования электродвигателей постоянного и переменного токов. В настоящее время работает инженером-конструктором I категории конструкторского отдела АО «Электропривод». Имеет 1 патент на промышленный образец. Награждена Почетной грамотой Министерства промышленности и энергетики РФ.

Киселев Роман Владимирович – родился в 1987 году. В 2011 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электрические станции». Опыт работы в области электрических машин – 8 лет. В настоящее время работает инженером 2-й категории экспериментально-исследовательского отдела АО «Электропривод».

Rubtsova Lyudmila – was born in 1952. In 1975 he graduated from the Kirov Polytechnic Institute, specializing in «Automation and Remote Control». 39 years working in the field of systems development and launching of aircraft control unit. At the present time – she is a leading designer, project manager of JSC «Electroprivod». She has 5 scientific works. Awarded Diploma of Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation.

Malyugin Anton – was born in 1985. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He has 7 years of experience in the area of aircraft electrical machines. Currently he works as a design engineer of the 2 grade in JSC «Electroprivod». He has 2 scientific works.

Pechenkina Nadezhda – was born in 1953. In 1976 she graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute with specialization in «Electrical machines and devices». She has 38-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». She has 1 patent for a design invention. She was awarded by a certificate of merit of the Industry and Energy Ministry.

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 8 years. At present he works as 2 degree engineer at the research department of JSC «Electroprivod».

Пульсации реактивного момента бесконтактных электродвигателей постоянного тока

// Cogging torque pulsations of the brushless dc motor //

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

Власов А. И., к.т. н., Опалев Ю. Г., к.т. н.,
АО «Технодинамика», ОП, г. Киров

В статье описаны исследования по снижению пульсаций реактивного момента в бесконтактном электродвигателе постоянного тока, проведенные в АО «Электропривод», на основе которых разработана серия электродвигателей для прецизионных электроприводов металлообрабатывающего оборудования. Ключевые слова: бесконтактный электродвигатель постоянного тока, постоянный магнит, реактивный момент, скос пазов, моделирование магнитного поля.

The article presents researches, executed by JSC «Electroprivod» for reduction of cogging torque pulsations in a brushless dc motor. Based on these researches, was designed range of precision electric motors for metal-working equipment. Keywords: brushless dc motor, permanent magnet, cogging torque, slots skewing, magnetic field modeling.

Рост автоматизации и механизации технологических процессов и связанная с этим необходимость разработки электроприводов (ЭП) с высокими динамическими, массогабаритными, энергетическими показателями и длительным сроком службы определяют направление развития регулируемых ЭП с высокими качественными показателями. На сегодняшний день так же актуален вопрос импортозамещения высокотехнологичной продукции машиностроения, в частности, применение высокомоментных электродвигателей с возможностью работы в широком диапазоне регулирования частоты вращения (1:10000 и более).

Бесконтактный электродвигатель постоянного тока (БДПТ) является одним из самых перспективных, что объясняется рядом преимуществ, изложенных в [1, 2, 3]. Высокомоментные БДПТ с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов (ПМ), предназначенные для таких ответственных прецизионных ЭП, как приводы подачи в станках с ЧПУ и технологические роботы, должны удовлетворять специфичному комплексу требований [4], частью которых являются высокая плавность и точность хода.

Плавность хода зависит от пульсаций вращающего момента БДПТ, кото-

рые имеют две составляющие, оказывающие влияние на выходные характеристики электродвигателя (ЭД): пульсации, вызванные высшими гармониками тока и питающего напряжения, а также реактивный или зубцовый момент (cogging torque), который не зависит от формы потребляемого тока и питающего напряжения.

Реактивный момент электрической машины – момент, возникающий во вращающейся электрической машине вследствие изменения магнитного сопротивления в воздушном зазоре вдоль полюсного деления [5].

Реактивный момент в обесточенной магнитоэлектрической машине возникает в результате магнитного тяжения между ПМ ротора и зубцами статора. Это магнитное тяжение стремится поддержать такое положение магнитов ротора и зубцов статора, при котором сила притяжения ПМ к зубцам статора будет больше всех сторонних сил, стремящихся вывести систему из состояния равновесия.

Рассмотрим один период реактивного момента на примере явнополюсной магнитоэлектрической машины (рис. 1) [6].

На рис. 1а ротор находится в начальном неустойчивом положении, в котором результирующий реактивный момент равен нулю (положение а). В этом положении величина воздушного зазора между статором и ротором максимальна.

Поворот ротора из положения а создает реактивный момент, который стремится уменьшить воздушный зазор между статором и ротором. Реактивный момент, достигший максимальной величины M_{pmax} в точке b (рис. 1б), стремится повернуть ротор в установившееся положение c (рис. 1в). Положение c является устойчивым, воздушный зазор минимален, и величина реактивного момента равна нулю. Любое перемещение ротора из этого положения приводит к возникновению реактивного момента,

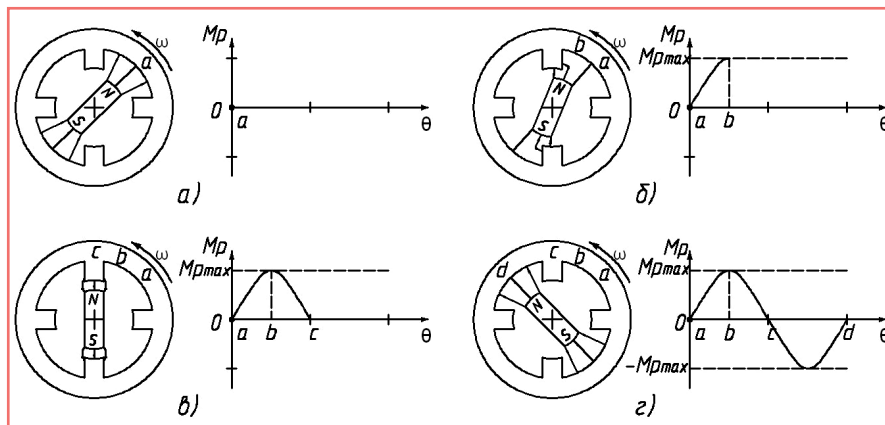


Рис. 1. Один период реактивного момента.

который будет стремиться вернуть ротор в устойчивое положение.

При перемещении ротора в положение d (рис. 1г) форма кривой реактивного момента будет симметричной относительно оси ординат, но направление – противоположным.

Как видно из рис. 1, реактивный момент имеет периодический характер, может быть как помогающим, так и противодействующим, независимо от токов обмотки статора БДПТ. Однако он затрудняет формирование оптимальных рабочих характеристик ЭП [7].

В конструкции ЭД для снижения пульсаций момента применяют различные методы борьбы, такие как скос пазов и дополнительные пазы на зубцах статора [8, 9], выбор числа пазов статора относительно числа полюсов, применение неравномерного воздушного зазора, скос магнитов, смещение магнитных сегментов, выбор ширины магнитов, а также различное направление намагничивания постоянных магнитов.

Величина реактивных моментов существенно уменьшается в ЭД беспазовой конструкции за счет увеличенного немагнитного зазора, в котором располагается обмотка статора, и отсутствия зубцов на статоре.

Кроме конструктивных методов борьбы с пульсациями момента, существуют также специальные средства компенсации формы тока статора или формы ЭДС, реализованные программным путем в системе автоматического управления ЭП [10].

Теоретический анализ и расчет реактивного момента представляет значительные трудности. В общем виде выражение для реактивного момента M_p магнитоэлектрической машины можно записать следующим образом [11]

$$M_p = k\Phi \frac{d\lambda(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

где k – конструктивный коэффициент; Φ – магнитный поток постоянного магнита, Вб; l – проводимость магнитной цепи; q – угол поворота ротора, эл. град.

Зависимость проводимости l от угла поворота q обусловлена влиянием зубчатости якоря и может быть записана в виде

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos(z\theta n) \quad (2)$$

где n – номер гармоники; z – число зубцов. Тогда

$$M_p = k\Phi \frac{d}{d\theta} \left(\lambda_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n \cos(z\theta n) \right) \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что число пульсаций реактивного момента за

один оборот кратно числу зубцов якоря z и составляет [12]

$$N = 2z \quad (4)$$

Так как пульсации имеют зубцовый порядок, то целесообразно рассматривать зубцовую гармонику с порядковым номером n , соответствующим числу зубцов z

$$n = \frac{N}{p} \quad (5)$$

где p – число пар полюсов электрической машины. Пульсации, вызванные остальными гармониками, имеют существенно меньшие значения, и ими можно пренебречь [13].

Среднее значение амплитуды M_z периода зубцовой гармоники имеет нулевое значение [14]

$$\langle M_z \rangle = \lim_{T_z \rightarrow \infty} \frac{1}{2T_z} \int_{-T_z}^{T_z} \cos(t) dt = 0 \quad (6)$$

где T_z – период зубцовой гармоники, эл. град.

Следовательно, величину скоса пазов в эл. град. необходимо выбирать из условия кратности периоду зубцовой гармоники T_z .

Аналитический расчет реактивного момента обесточенного БДПТ довольно сложен, поэтому для решения этой задачи применяется специализированное программное обеспечение. В АО «Электропривод» используется программа Elcut, разработанная ООО «Тор», г. Санкт-Петербург. Программа Elcut позволяет проводить расчеты магнитного поля методом конечных элементов в заданной геометрической модели.

Расчет реактивного момента, создаваемого ПМ, проводится без задания тока обмотки статора, то есть при холостом ходе.

Оптимизация геометрии зубцовой зоны БДПТ из условия минимизации пульсаций реактивного момента проводилась при проектировании электродвигателей серии ДБМ, предназначенных для ЭП технологических роботов. Оптимизация проводилась в следующих направлениях:

- выбор числа пазов статора;
- выбор скоса пазов статора;
- выбор типа

обмотки (однослойная или двухслойная).

Рассмотрим процесс оптимизации на примере вентильного электродвигателя ДБМ142–18–3 разработки АО «Электропривод». Исходными данными при проектировании являлись число полюсов $2p=6$, число фаз $m=3$, ПМ NdFeB, номинальный электромагнитный момент $M_{ном}=18$ Нм.

Расчет реактивного момента ЭД в зависимости от угла поворота ротора проводился при повороте ротора на 540 эл. град. (180 физ. град.) с шагом в 1,5 эл. град. (0,5 физ. град.) с учетом следующих условий:

- все диаметры (расточка статора, наружный диаметр ротора и статора и т.д.) постоянны;
- сумма площадей всех пазов постоянна;
- сумма ширин пазовых шлицев постоянна;
- форма постоянных магнитов – секторная;
- форма пазов – трапецеидальная;
- число полюсов постоянно;
- количество пазов статора – от 9 до 48 с шагом 3;
- скос пазов отсутствует;
- тип обмотки определялся следующим образом:

pq = целое число – обмотка однослойная,

$2pq$ = целое число – обмотка двухслойная,

где q – число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2pm} \quad (7)$$

Диапазон количества пазов статора ограничивается технологией изготовления листов статора.

Моделирование ДБМ142–18–3 с различным z показало, что (рис. 2):

- снижение z приводит к увеличению пульсаций реактивного момента;
- выполнение ЭД с четным z (однослойными обмотками) увеличивает

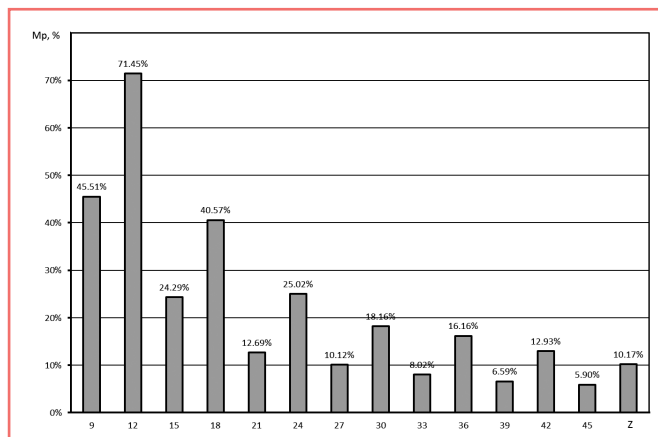


Рис. 2. Зависимость пульсации реактивного момента от числа пазов статора.

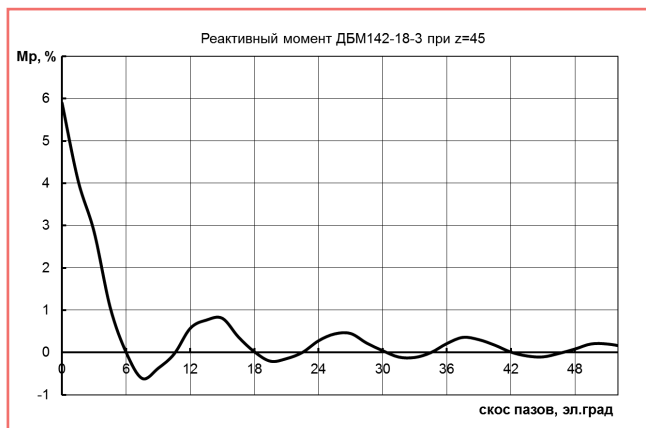


Рис. 3. Зависимость реактивного момента ДБМ142–18–3 от угла скоса пазов статора.

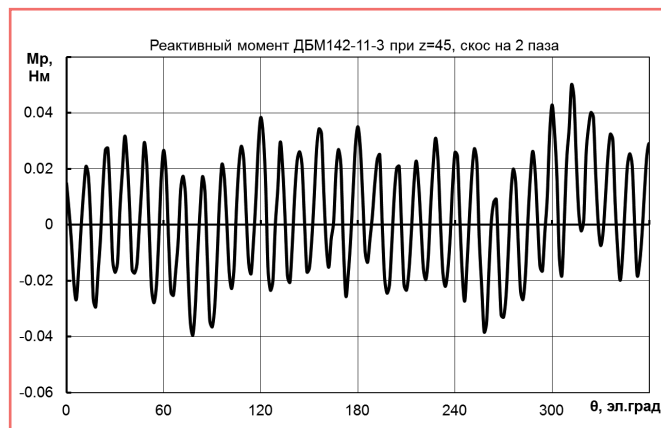


Рис. 4. Расчетная кривая реактивного момента ЭД ДБМ142–18–3 при скосе пазов.

пульсации реактивного момента в 1,5–2 раза по сравнению с нечетным z (двухслойными обмотками);

- минимум пульсаций реактивного момента (без учета скоса пазов) достигается при выполнении максимального числа пазов в сочетании с двухслойной распределенной обмоткой;

- в проектируемом ЭД наиболее целесообразно применить $z = 45$.

В результате расчета определено амплитудное значение реактивного момента ДБМ142–18–3 при $z=45$, которое составило $M_p = 1,0617$ Н·м или 5,9% от $M_{ном}$. Разложение кривой реактивного момента в гармонический ряд выявило основную гармонику реактивного момента 30-го порядка, амплитуда которой составила 0,83 Н·м или 4,61% от $M_{ном}$.

С целью получения минимального значения реактивного момента была рассчитана зависимость пульсации реактивного момента от угла скоса пазов статора (рис. 3).

Результаты расчетов ДБМ142–18–3 со скосом пазов на величины, соответствующие точкам нулевого реактивного момента на кривой зависимости реак-

тивного момента от угла скоса пазов статора (рис. 3), а также при скосе пазов на 48 эл. град., с разложением в гармонический ряд приведены в таблице 1.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что скос пазов статора ДБМ142–18–3 на угол более 10 эл. град. приводит к снижению пульсаций реактивного момента не менее чем в 3,7 раза.

По результатам расчетов было принято решение о выполнении статора ДБМ142–18–3 со скосом пазов на 48 эл. град. Расчетная кривая реактивного момента ДБМ142–18–3 при скосе пазов статора на 48 эл. град. показана на рис. 4.

В результате анализа расчетной кривой реактивного момента, показанной на рис. 4, определена максимальная амплитуда пульсации реактивного момента, которая составила 0,05 Н·м или 0,278% от $M_{ном}$.

Экспериментальная проверка величины реактивного момента электродвигателя ДБМ142–18–3, показанного на рис. 5, проводилась с помощью диска радиусом 12,5 см, на наружный диаметр



Рис. 5. Бесконтактный электродвигатель ДБМ142–18–3.

которого намотан трос для соединения с динамометром. Диск, установленный на выходной конец вала ЭД, с помощью троса, соединенного с динамометром, приводится во вращение вручную линейным перемещением динамометра в направлении, перпендикулярном радиусу диска. Во время эксперимента фиксировались минимальное и максимальное показания динамометра.

Величина пульсации рассчитывалась по формуле

$$M_p = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \cdot R_{\text{диска}} \quad (8)$$

где $F_{\max}$ и $F_{\min}$ – максимальное и минимальное показания динамометра, Н; $R_{\text{диска}}$ – радиус диска, м.

В результате измерения была получена величина $M_p = 0,049$ Н·м или 0,273% от $M_{ном}$, что на 2% ниже расчетного значения.

Проведенные исследования [15, 16] показали, что геометрия магнитной системы ДБМ142–18–3 с $z=45$, $2p=6$ и скосом пазов статора на 48 эл. град. является оптимальной с точки зрения

Таблица 1. Результаты гармонического анализа реактивного момента с учетом скоса пазов статора.

Скос пазов статора		Номер основной гармоники	Амплитуда основной гармоники, Н·м	Пульсация основной гармоники, % от $M_{ном}$
Эл. град.	Доли паз. дел.			
0	0	30	0,830	4,611
6	0,250	30	0,402	2,233
10,5	0,438	15	0,021	0,117
18	0,750	30	0,155	0,861
22,5	0,938	6	0,009	0,050
30	1,250	30	0,096	0,533
34,5	1,438	4	$7,87 \cdot 10^{-3}$	0,044
42	1,750	30	0,069	0,385
46,5	1,938	2	$7,22 \cdot 10^{-3}$	0,040
48	2,000	30	0,025	0,140

обеспечения минимальных пульсаций реактивного момента.

Таким образом, решена задача улучшения равномерности вращения магнитоэлектрической машины посредством минимизации реактивного момента, заключающаяся в снижении пульсаций реактивного момента.

Используя результаты исследований, проведенных в АО «Электропривод», практически была решена задача разработки ряда БДПТ с ПМ для прецизионных ЭП металлообрабатывающего оборудования, одним из основных требований к которым являются высокая равномерность вращения и точность позиционирования [15, 16, 17].

Литература:

1. Волокитина Е.В., Шалагинов В.Ф. Особенности применения постоянных магнитов в вентильных электродвигателях авиационных электроприводов // Электротехника. – 2003. – № 7. – С. 55–60.
2. Копылов И.П., Фрумин В.Л. Электромеханическое преобразование энергии в вентильных двигателях. – М.: Энергоиздат, 1986. – 166 с.
3. Жуков В.П., Нестерин В.А. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5ДВМ // Электротехника. – 2000. – № 6. – С. 19–21.
4. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / Косуплин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 184 с.
5. ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
6. Studer C., Keyhani A., Sebastian T., Murthy S.K. Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines / Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Rec.
7. Афанасьев А.А., Макаров В.А., Никифоров В.Е., Чихняев В.А., Кириллов С.В. Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с магнитами на ядре ротора // Электротехника. – 1989. – № 3. – С. 32–36.
8. Чан Тхи Тху Хыонг. Минимизация реактивного момента в вентильном двигателе с постоянными магнитами // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 45. – С. 139–141.
9. <http://www.elektropribor.spb.ru/ru/sp/catalog-pem.pdf>
10. Балковой А. Прецизионный электропривод с вентильным электродвигателем // Электронные компоненты. – 2008. – № 11. – С. 32–42.
11. Дубенский А.А. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – М.: Энергия, 1967. – 144 с.
12. Ефимов В.В. Численное и экспериментальное моделирование электромеханических компонентов автоэлектронных систем: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Чебоксары: ЧГУ, 2011. – 23 с.
13. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика» – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Пер. с англ. Под ред. Арамановича И.Г. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
15. Опалев Ю.Г. Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Чебоксары: ЧГУ, – 2011. – 20 с.
16. Пат. RU2518489 C2 Российская Федерация, МПК H 02 K 1/16, H 02 K 21/12. Магнитоэлектрическая машина с улучшенной равномерностью вращения / Власов А.И., Волокитина Е.В., Опалев Ю.Г., патентообладатель Киров. Открытое акционерное общество «Электропривод». – № 2012110625/07. заявл. 20.03.2012, опубл. 20.02.2013, Реестр Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 7 с.
17. <http://www.epv.ru/ru/catalogproducts/elektroprivod/DBM/>

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснаб-

жения самолетов нового поколения». 13 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает главным конструктором АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Имеет 25 научных трудов.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». 13 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником отдела расчетов АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Имеет 20 научных трудов.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer – project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 80 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional engineers».

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) with specialization in «Electromechanics». He is a candidate of Technical Sciences. In 2010 he defended a thesis on: «A magneto-electric starter-generator in the electrical power supply system of airplanes of new generation». He has been working in the area of aviation electrical machines for 13 years. At present he works as chief designer in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has more than 25 scientific works.

Opalev Yuriy – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He is a Candidate of Science. In 2011 he defended a thesis about «AC electronic motors for precise fast-acting drives of mechatronic process models». He has been working in the area of aircraft electrical machines for 13 years. At present he is a head of the accounts department in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has 20 scientific works.

Имитационная математическая модель электропривода колеса шасси самолета

// Mathematical simulation model of an aircraft landing gear wheel electric drive //

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

Опалев Ю. Г., к. т. н.,
АО «Технодинамика», ОП, г. Киров

В статье приведен краткий анализ современного состояния в области электромеханических систем привода колеса шасси самолета. Актуальность и перспективность рассматриваемого направления доказаны на примере зарубежного опыта разработок. АО «Электропривод» на основе структурной схемы разработало имитационную модель электропривода колеса шасси в программе LMS AMESim, которая позволяет учесть влияние повышенной температуры окружающей среды и реализовать требуемые алгоритмы управления системой. Адекватность имитационной модели и алгоритмов управления электроприводом подтверждена результатами макетной отработки.
Ключевые слова: электропривод колеса шасси, имитационная математическая модель, векторное управление, LMS AMESim, электродифференциал.

The article presents brief analysis of a state of the art in the area of aircraft landing gear wheel electromechanical drive systems. Topicality and promising of this area was proved by the example of foreign experience in development. By means of LMS AMESim software, the JSC «Electroprivod» made simulation model of aircraft landing gear wheel electric drive, based on block diagram. LMS AMESim software allows to take into account the effect of high ambient temperature and implement required system's control algorithms. Adequacy of the simulation model and control algorithms was confirmed by means of prototyping.
Keywords: aircraft landing gear wheel electric drive, mathematical simulation model, vector control (motor), LMS AMESim, electro differential.

Движение современных самолетов по территории аэропорта происходит при помощи основной турбины, работающей в режиме малого газа, или при помощи тягачей-буксировщиков [1]. Маневрирование самолета на земле при помощи авиадвигателей приводит к дополнительному расходу авиационного топлива и дополнительным вредным выбросам в атмосферу. Кроме того, работа авиадвигателей сопровождается высоким уровнем шума. Использование тягачей для буксировки требует привлечения дополнительных сотрудников и специальной техники для буксировки.

В настоящее время зарубежными компаниями ведутся работы по созданию электромеханических систем привода колеса шасси для узкофюзеляжных самолетов малой и средней дальностей [1, 2, 3]. Необходимость подобных разработок определяется значительными

лен их надежностью в эксплуатации, отсутствием гидрожидкости и трубопроводных коммуникаций, простотой обслуживания, увеличением ресурса авиационных шин благодаря возможности раскрутки колес в полете перед посадкой самолета [3, 6, 7].

Электрический привод колеса шасси позволит самолету практически бесшумно маневрировать по территории аэродрома в любых направлениях, а также улучшит экономичность и экологичность самолета.

В настоящее время предлагается два основных конструктивных решения электроприводных систем наземного маневрирования самолета: размещение электропривода в колесе носовой стойки шасси и в основной опоре шасси.

Колесо передней опоры шасси является полым, тормоз и другие детали отсутствуют, однако только 5–8% массы самолета приходится на эту опору шасси, что увеличивает риск скольжения при движении самолета по мокрой взлетно-посадочной полосе [3, 6].

Компанией Borealis Technical Limited (Гибралтар) разработан электропривод WheelTug, устанавливаемый в переднюю стойку шасси (рис. 1). WheelTug обеспечивает перемещение самолета со скоростью до 15 км/ч по прямой. Питание электропривода осуществляется от генератора вспомогательной силовой установки. Масса устройства, включая интерфейс и контроллеры, составляет 136 кг [4].

Испытания устройства были успешно

проведены на самолетах Boeing 767 и Boeing 737 в 2005 и 2010 годах.

Работами по размещению электропривода колеса шасси на основной опоре занимаются компании Honeywell и Safran. Одним из ключевых моментов



Рис. 1. Устройство WheelTug в составе стойки передней опоры шасси.

затратами времени на маневрирование по территории аэропорта в сравнении со временем полета самолетов данных типов.

Большой интерес к электромеханическим системам колеса шасси обуслов-



Рис. 2. Электрическая экологичная система руления EGTS, разработанная Honeywell и Safran.

такого решения является улучшение маневрирования самолета при движении по мокрой или заледенелой полосе, когда требуется большая сила сцепления.

Разрабатываемая ими электрическая экологичная система руления EGTS (рис. 2) была представлена на Парижском авиасалоне в 2013 году [8]. По заявлениям разработчиков, экономия топлива от применения новой системы достигает 4%. Коммерческая эксплуатация системы планируется с 2016 года [1].

Понимая перспективность и научную новизну экологического электрического руления, АО «Электропривод» в 2013 году по техническому заданию ОАО «Авиаагрегат» выполнило разработку технического предложения на электропривод колеса шасси (ЭПК) для самолета SSJ-100.

В соответствии с техническим заданием ЭПК должен выполнять следующие функции:

- движение с заданным уровнем скорости в пределах установленных ограничений, с возможностью плавного или дискретного регулирования от задающих устройств, установленных на пульте пилота;
- обеспечение функции электродифференциала при разворотах носовой стойки шасси;
- обеспечение взаимодействия с тормозной системой колес (автоматическое отключение ЭПК при включении механических тормозов);
- автоматическое включение/отключение трансмиссии ведущих колес в зависимости от состояния сигналов внешних команд с пульта пилота и текущей скорости ведущих колес;
- обеспечение блокировки включения ЭПК при скоростях ведущих колес

выше максимально допустимой.

Структурная схема ЭПК показана на рис. 3.

ЭПК состоит из блока управления и контроля и двух электроприводов колеса опоры шасси (электроприводы колес левой и правой опор). Электроприводы колес опор шасси состоят из тягового модуля (ТМ) и блока управления тяговым модулем (БУ ТМ).

ТМ состоит из редуктора с механизмом сцепления и бескон-

тактного синхронного магнитоэлектрического электродвигателя со встроенным электромагнитным тормозом (ЭМТ) и датчиком положения ротора (ДПР).

При разработке технического предложения на ЭПК по требованию разработчика самолета была разработана имитационная модель (ИМ) ЭПК.

В качестве среды разработки ИМ использовалась программа LMS AMESim. На время работы над ИМ представителями разработчика программы LMS AMESim была предоставлена пробная лицензия.

Структурная схема ИМ ЭПК показана на рис. 4.

ИМ ЭПК состоит из следующих блоков:

- система управления электроприводом (СУ ЭП);
- электропривод левой опоры (ЭПЛ);
- электропривод правой опоры (ЭПП).

СУ ЭП выполняет следующие функции:

- прием от взаимодействующих систем сигналов задания скорости движения самолета, угла поворота передней опоры шасси, сигналов наличия обжатия стоек шасси, наличия давления в тормозной системе, текущей частоты вращения колес шасси;
- проверка условий обжатия стоек шасси, наличия давления в тормозной системе;
- реализация алгоритма электрического дифференциала и выдача сигналов задания частоты вращения электродвигателей;
- автоматическое управление включением механизма сцепления электроприводов;
- автоматическая защита по превышению максимальной частоты вращения колес и блокировка включения при скорости ведущих колес свыше максимально допустимой.

На входные порты блока СУ ЭП подаются сигналы задания скорости самолета, текущей частоты вращения колес левой и правой опор, угла поворота передней опоры, наличия обжатия стоек шасси и давления в тормозной системе. Происходит проверка следующих условий:

- наличие обжатия всех трех стоек шасси;
- отсутствие давления в тормозной системе (тормоза расторможены);
- текущая скорость ведущих колес не превышает максимально допустимую.

В случае невыполнения хотя бы одного из условий на соответствующие входы блоков ЭПЛ и ЭПП подается сигнал отключения механизма сцепления и сигналы задания нулевой скорости.

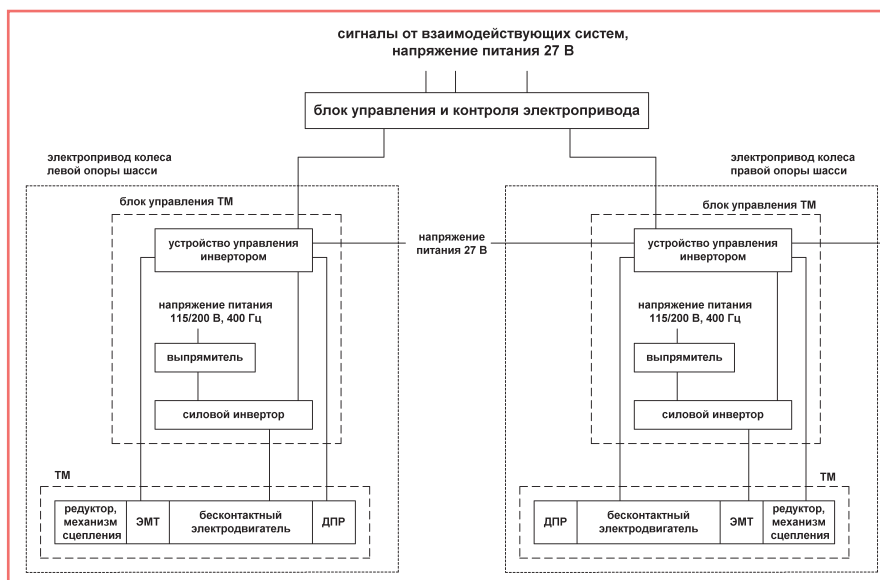


Рис. 3. Структурная схема ЭПК.

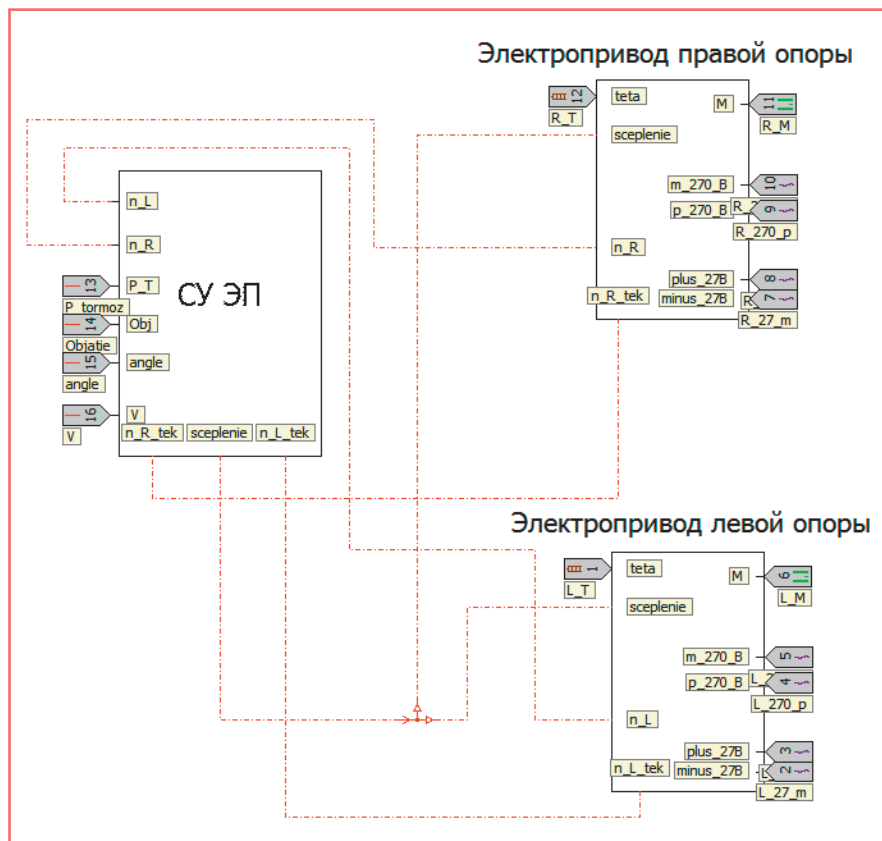


Рис. 4. Структурная схема ИМ ЭПК.

В случае выполнения всех условий на соответствующие входы блоков ЭПЛ и ЭПП подается сигнал включения механизма сцепления (на выходе порта *scepnie* сигнал «1»), происходит расчет линейных скоростей колес по формуле (1) (алгоритм электродифференциала) и частоты вращения электродвигателей по формуле (2).

$$V_L, V_R(\alpha) = \begin{cases} \alpha = 0, V_L = V_R = V_{3\Delta\Delta}; \\ \alpha > 0, V_L = V_{3\Delta\Delta} \cdot \frac{c \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) - \frac{L}{2}}{c \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) + \frac{L}{2}}, V_R = V_{3\Delta\Delta}; \\ \alpha < 0, V_L = V_{3\Delta\Delta}, V_R = V_{3\Delta\Delta} \cdot \frac{c \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) + \frac{L}{2}}{c \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) - \frac{L}{2}}, \end{cases} \quad (1)$$

где V_L – линейная скорость колеса левой опоры, км/ч;

V_R – линейная скорость колеса правой опоры, км/ч;

c – расстояние от оси передней опоры до оси левой и правой опор (рис. 5), м;

L – расстояние между колесами левой и правой опор (рис. 6), м;

α – угол поворота передней опоры, град.;

$V_{3\Delta\Delta}$ – скорость движения самолета, км/ч.

$$n_{\text{дв}L} = \frac{V_L \cdot 1000 \cdot 9,55 \cdot i}{3600 \cdot R_{\text{ш}}} \quad (2)$$

$$n_{\text{дв}R} = \frac{V_R \cdot 1000 \cdot 9,55 \cdot i}{3600 \cdot R_{\text{ш}}}$$

где $n_{\text{дв}L}$ – частота вращения электродвигателя левой опоры, об/мин;

$n_{\text{дв}R}$ – частота вращения электродвигателя правой опоры, об/мин;

i – передаточное отношение от вала электродвигателя к колесу шасси;

$R_{\text{ш}}$ – радиус шины шасси, м.

Полученные значения частоты вращения электродвигателей передаются в виде задающих сигналов в блоки ЭПЛ и ЭПП.

Блоки ЭПЛ и ЭПП представляют собой ИМ регулируемых ЭП на основе синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) и выполняют следующие функции:

- прием из СУ ЭП сигналов задания частоты вращения электродвигателя и включения механизма сцепления;
- выдача в СУ ЭП сигнала текущей частоты вращения колес;
- реализация алгоритма векторного управления СДПМ с замкнутым контуром управления по скорости;
- моделирование работы СДПМ;
- моделирование работы силового трехфазного инвертора;
- моделирование работы редуктора;
- моделирование работы механизма сцепления;
- подключение к взаимодействующим системам при помощи электрических, механических и тепловых портов.

Функционально ИМ ЭПЛ (ЭПП) состоит из системы векторного управления электроприводом (СВУ ЭП), силового инвертора (И), СДПМ, редуктора и электромагнитного механизма сцепления (Р).

Структурная схема блока ЭПЛ (рис. 6) аналогична ЭПП.

Блок СВУ ЭП (рис. 7) реализует векторный алгоритм управления СДПМ с замкнутым контуром регулирования по частоте вращения.

СВУ ЭП состоит из следующих основных блоков: регулятора частоты вращения СДПМ, преобразователя координат abc-dq0, регулятора электромагнитного момента СДПМ,

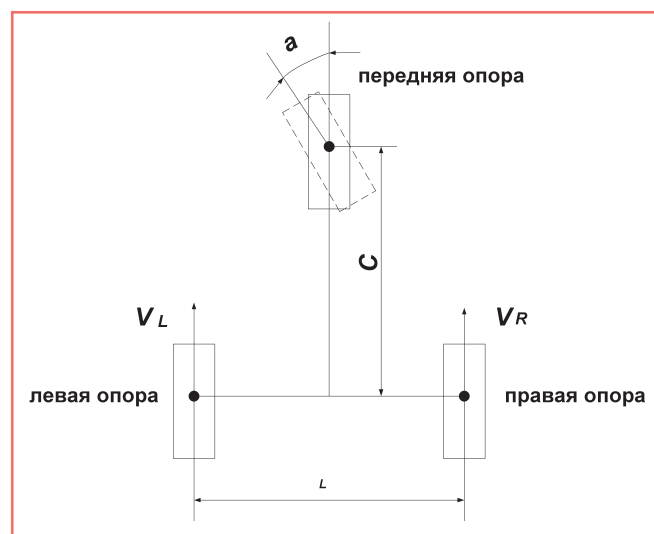


Рис. 5. Расстояния между опорами.

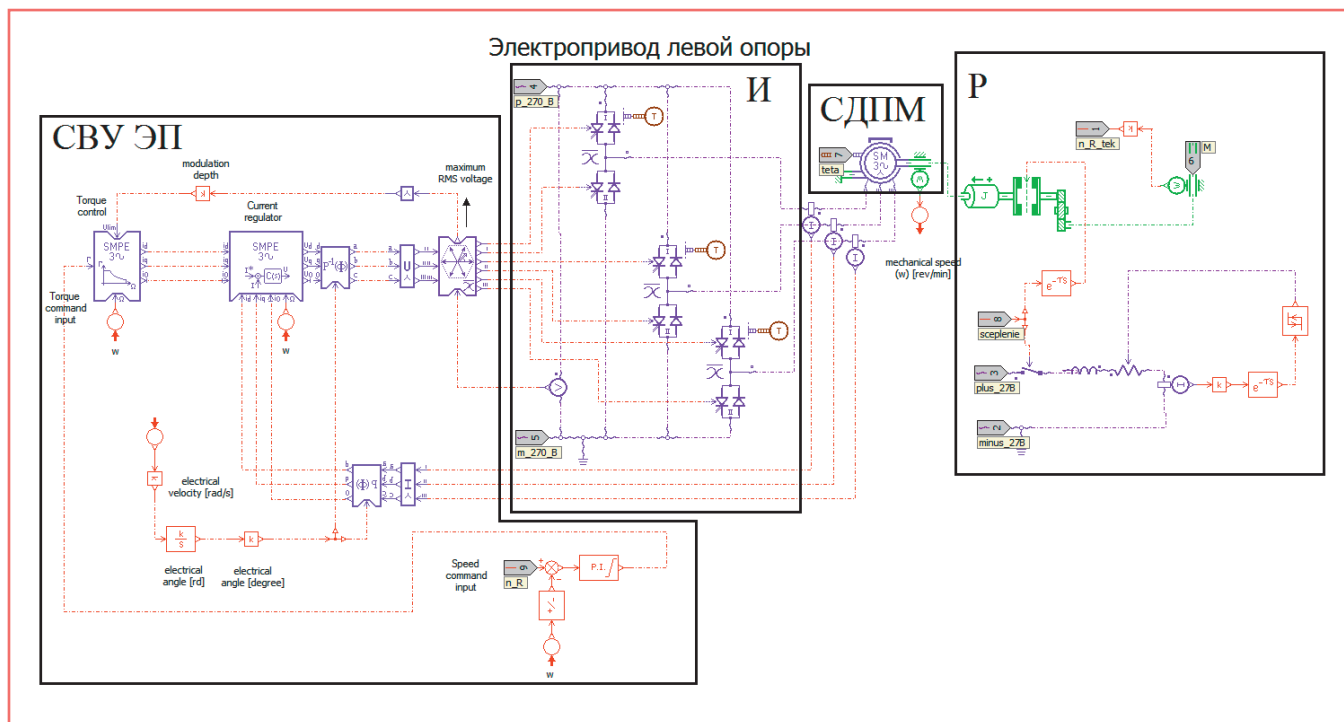


Рис. 6. Структурная схема ЭПЛ.

регулятора тока СДПМ, преобразователя координат dq0-abc и блока векторной широтно-импульсной модуляции.

Особенность ЭПК заключается в том, что ТМ находятся в непосредственной близости от механических тормозов самолета, температура которых при тор-

мождении может достигать нескольких сотен градусов Цельсия. Таким образом, возникает проблема учета влияния повышенной температуры на параметры электродвигателя.

В LMS AMESim стандартный блок СДПМ EMDSMPE01 (рис. 8) содержит термопорт, предназначенный для моде-

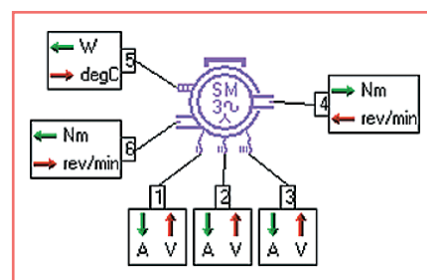


Рис. 8. Блок синхронной магнитоэлектрической машины EMDSMPE01.

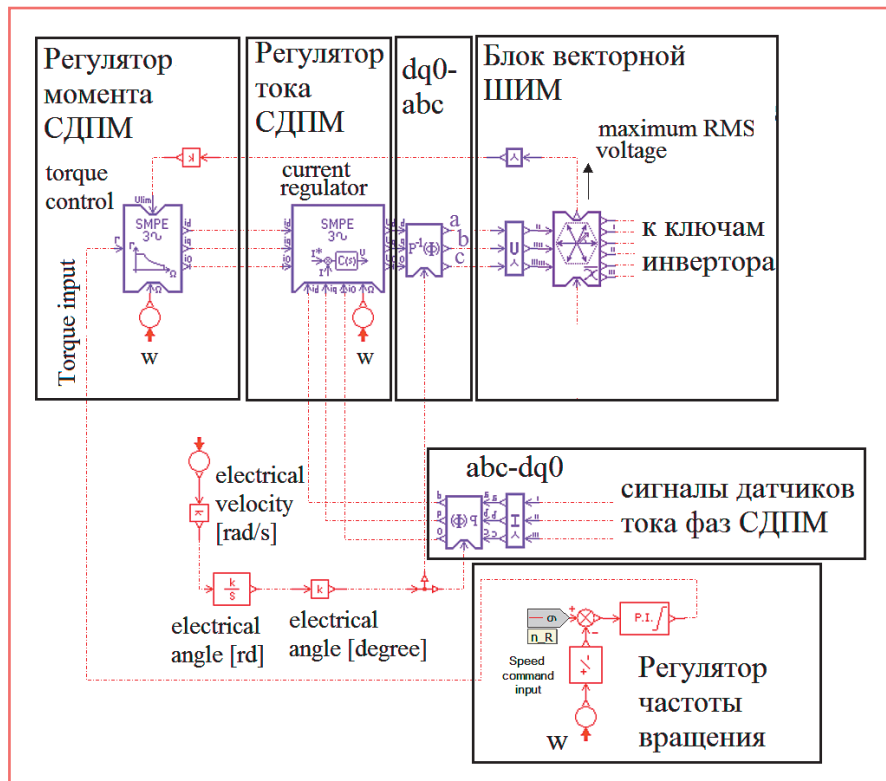


Рис. 7. Структурная схема блока СВУ ЭП.

лирования теплового взаимодействия с окружающей средой.

При помощи термопорта осуществляется стыковка блока СДПМ с внешними ИМ теплообмена. Входной переменной термопорта является температура, влияние которой на параметры СДПМ описывается уравнениями (3), (4).

$$\psi = \psi_0 \cdot (1 + \alpha_\psi \cdot (T - T_0)) \quad (3)$$

где Ψ – магнитный поток ротора, сцепленный с витками фазы статора при температуре T , Вб;

Ψ_0 – магнитный поток ротора, сцепленный с витками фазы статора при температуре T_0 , Вб;

α_ψ – температурный коэффициент изменения магнитного потока;

T – установившаяся температура, °С;

T_0 – начальная температура, °С.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha_R \cdot (T - T_0)) \quad (4)$$

где R – активное сопротивление фазы статора при температуре T , Ом;

R_0 – активное сопротивление фазы статора при температуре T_0 , Ом.

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования и результатов испытаний макета ЭПК.

Угол поворота, °	Частота вращения электродвигателя ЭПЛ, об/мин			Частота вращения электродвигателя ЭПП, об/мин		
	Макет	Модель	Расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования, %	Макет	Модель	Расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования, %
1	2	3	4	5	6	7
- 90	- 1005	-999	0,6	990	999	0,9
- 75	- 30	-30,1	0,33	990	999	0,9
- 50	486	493	1,44	990	999	0,9
- 25	755	765	1,32	990	999	0,9
0	990	999	0,9	990	999	0,9
25	990	999	0,9	757	765	1,32
50	990	999	0,9	485	493	1,44
75	990	999	0,9	- 35	-30,1	14
90	990	999	0,9	- 1000	-999	0,1



Рис. 9. Электродвигатели ДБМ192–18–3.



Рис. 10. Макеты блоков управления ТМ.

Для проверки адекватности разработанной ИМ и отработки алгоритмов управления электродвигателями в зависимости от угла поворота передней стойки было проведено моделирование макета ЭПК. Испытания макета ЭПК проводились на холостом ходу.

В состав макета ЭПК входят два бесконтактных электродвигателя ДБМ192–

18–3 (рис. 9), два макета блока управления тяговыми модулями (рис. 10), а также блок управления и контроля (БУКЭ), реализованный программным обеспечением. Структурная схема макета ЭПК показана на рис. 11.

Сравнение результатов моделирования с результатами испытаний макета ЭПК приведено в таблице 1.

Как показывает таблица 1, расхождение результатов моделирования и результатов эксперимента незначительно, что позволяет утверждать об адекватности разработанной ИМ ЭПК.

Готовая ИМ ЭПК была передана заказчику для стыковки с ИМ остальных систем самолета.

Выводы

1. Проведенный краткий анализ современного состояния в области электромеханических систем привода колеса шасси самолета показал высокую актуальность и перспективность рассматриваемого направления.

2. На основе предлагаемой АО «Электропривод» структурной схемы ЭПК разработана ИМ в программе LMS AMESim с учетом влияния повышенной температуры окружающей среды на характеристики электродвигателя.

3. Адекватность ИМ и алгоритмов управления ЭП подтверждена результатами макетной отработки.

Литература:

1. Электрическая система экологичного руления – это революция в шасси самолета // Журнал Safran. – Декабрь 2011. – с. 10–11.
2. Франция и США объединили усилия для развития инновационной программы // Журнал Safran. – Декабрь 2011. – с. 12.
3. Время принимать решение! // Журнал Safran. – Декабрь 2011. – с. 13.
4. <http://www.aviaglobus.ru/2013/01/05/5144>
5. <http://www.dw.de/электропривод-для-аэробуса/a-15310963-1>

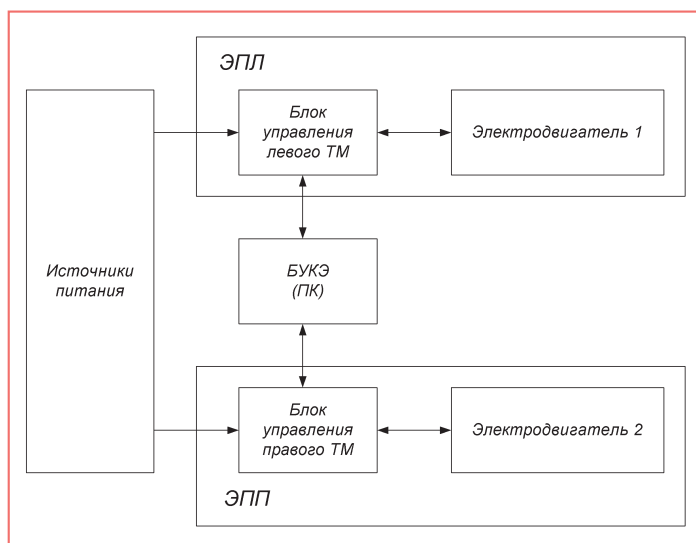


Рис. 11. Структурная схема макета ЭПК.

6. Заявка на патент № US2012/0153075 A1. Aircraft landing gear.

7. Патент № US7445178 B2. Powered nose aircraft wheel system.

8. Новости // Журнал Safran. – Июнь 2014. – с. 7.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

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

альности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2-й категории АО «Электропривод». Имеет 4 научных работы.

Опалев Юрий Геннадьевич – родился в 1980 году. В 2003 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Вентильные электродвигатели для прецизионных быстродействующих приводов мехатронных технологических модулей». 13 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником отдела расчетов АО «Технодинамика», ОП (г. Киров). Имеет 20 научных трудов.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University.

Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer – project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 80 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Tebenkov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 7 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 4 scientific works.

Opalev Yuriy – was born in 1980. In 2003 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU) specializing in «Electromechanics». He is a Candidate of Science. In 2011 he defended a thesis about «AC electronic motors for precise fast-acting drives of mechatronic process models». He has been working in the area of aircraft electrical machines for 13 years. At present he is a head of the accounts department in JSC «Technodinamika», self-standing business (Kirov). He has 20 scientific works.

Магнитоэлектрические вентильные электродвигатели в электроприводах разработки АО «Электропривод»

// Magnetoelectric brushless dc motors at electric drives,
developed by JSC «Electroprivod» //

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

Автоматизированные электроприводы на базе вентильных электродвигателей постоянного тока занимают особое место в номенклатуре изделий АО «Электропривод». В статье представлен обзор последних разработок и тенденций АО «Электропривод» в области вентильных электродвигателей и мехатронных модулей на их основе. **Ключевые слова:** автоматизированный электропривод, вентильный электродвигатель, постоянный магнит, векторное управление, бездатчиковое управление, мехатронный модуль.

АО «Электропривод» занимается разработкой электроприводов (ЭП) и электромеханизмов специального назначения. Изделия АО «Электропривод» находят свое применение в различных отраслях народного хозяйства: авиация, атомные электростанции, нефтегазовый комплекс, промышленные технологические роботы, медицина и др.

Особое место в номенклатуре изделий предприятия занимают автоматизированные регулируемые электро-

Automated electric drives based on brushless DC motors play an essential role among product range of JSC «Electroprivod». The article presents review of latest development trends and engineering developments of JSC «Electroprivod» in the area of brushless DC motors and mechatronic modules based on them.

Keywords: *automated electric drive, brushless DC motor, permanent magnet, vector control (motor), sensorless control, mechatronic module.*

приводы как наиболее востребованная и перспективная продукция.

Опыт работы, а также отечественная и зарубежная литература показывают, что наиболее перспективным в качестве электромеханического преобразователя энергии в электроприводах авиационного и космического назначений является использование вентильного электродвигателя постоянного тока (ВДПТ) с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ПМ), который сво-

боден от недостатков традиционных коллекторных электродвигателей, обусловленных наличием щеточно-коллекторного элемента [1].

Основными преимуществами ЭП на базе ВДПТ, например, по сравнению с асинхронными электродвигателями, являются:

- весьма высокая кратковременная перегрузочная способность по моменту, достигающая 5-10-кратного значения от номинального;
- более высокие энергетические показатели ($\cos\varphi=1$, $\eta=0,85\div 0,98$);
- существенно меньшие масса и габариты [2].

Электромеханическая часть ВДПТ состоит из бесконтактного электродвигателя (ДБ) – синхронной машины с магнитоэлектрическим возбуждением, датчика положения ротора (ДПР), по сигналам которого формируется последовательность коммутации обмоток ДБ.

Электронная часть ВДПТ представляет собой преобразователь частоты, основу силовой части которого образует автономный инвертор напряжения, обеспечивающий импульсное преобразование энергии. Инвертор ВДПТ может питаться как напрямую от сети постоянного тока,

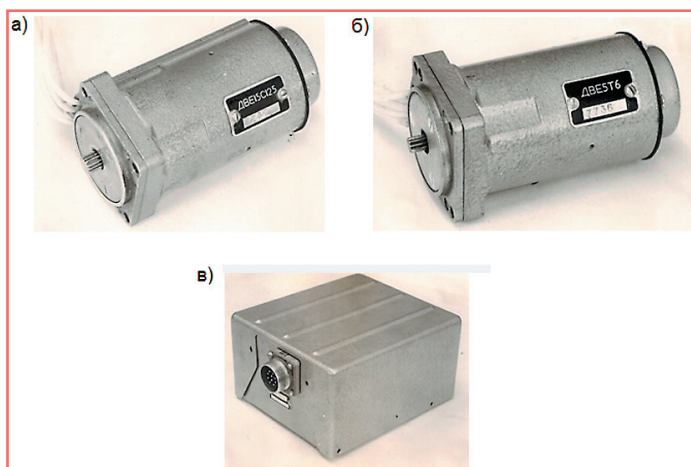


Рис. 1. Электродвигатели ДВЕ:
а) электродвигатель ДВЕ 15С125; б) электродвигатель ДВЕ 5Т 6;
в) блок управления БКВД-16.

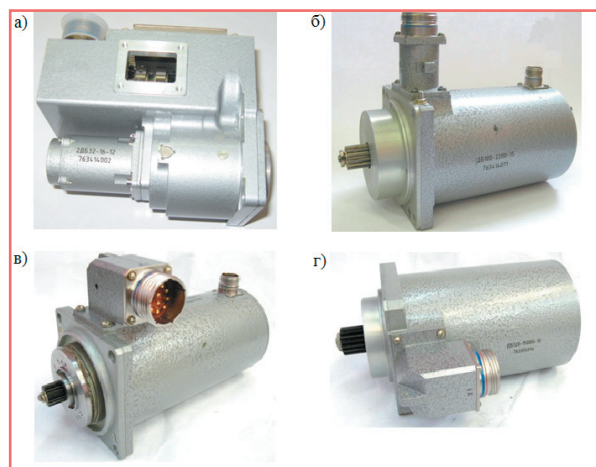


Рис. 2. Новые разработки ВДПТ АО «Электропривод»:
а) электродвигатель ДБ532–16–12 (в составе электромеханизма); б) электродвигатель ДБ100–2200–15; в) электродвигатель ДБ100–5500–12; г) электродвигатель ДБ120–15000–10.

Таблица 1. Новые разработки ВДПТ АО «Электропривод».

Тип электродвигателя	Напряжение питания, В	Способ управления	Номинальный момент, Н·м	Номинальная частота вращения, об/мин	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Момент торможения встроенного тормоза, Н·м
2ДБ32-16-12	28	Скалярное	0,011	12000	0,15	Ø34,5×55,5	–
ДБ50-180-8-Д12*	27	Скалярное	0,153	13000	1,1	98×60×118	0,215
ДБ65-750-12-Д12*	115/200 400 Гц	Скалярное	0,054	14000	2,8	73×121×140	0,812
ДБ100-2200-15	115/200 400 Гц	Векторное	1,67	15000	4,5	Ø100×165	2,7
2ДБ100-5500-12	115/200 400 Гц	Векторное	4,71	11000	6	Ø100×210	1,18
ДБ120-15000-10	115/200 400 Гц	Векторное	13,46	11000	9,9	Ø125×220	6,8
ДБ126-22000-12-Д12*	270	Скалярное	18	12000	14,7	157×290×207	–
ДБ160-30000-60-U	115/200 400 Гц	Бездатчиковое	5	55000	19,5	161×290×161	–

*) Блок управления интегрирован в электродвигатель

так и от выпрямителя, входящего в состав блока управления ВДПТ.

Первые разработки ВДПТ в АО «Электропривод» были выполнены в 1963 году. Это были ВДПТ мощностью 0,5 и 2 Вт – ДБ0,5 и ДБ-2-1. В 1977 году были разработаны электродвигатели ДВЕ 15С125 и ДВЕ 5Т мощностями 5 Вт и 15 Вт соответственно. Управление электродвигателями ДВЕ осуществлялось от блока БКВД-16 (рис. 1).

В 1983 году был разработан ряд беспазовых ВДПТ мощностью от 2,5 Вт до 16 Вт – ДБ25-2,5-10Б, ДБ25-4-10Б, ДБ25-6-22Б, ДБ25-10-22Б, ДБ25-16-22Б, частотой вращения 10000 и 22000 об/мин. ВДПТ, разработанные АО «Электропривод», в составе различных ЭП применяются на самолетах Ил-96-300, Ту-204, Ту-204СМ, Ан-70 и др.

На сегодняшний день номенклатура ВДПТ АО «Электропривод» насчитывает более 30 наименований и с каждым годом продолжает увеличиваться. Технические характеристики новых разработок приведены в таблице 1. Внешний вид электродвигателей показан на рис. 2, 6, 7.

Отсутствие у ВДПТ скользящих электрических контактов существенно повышает их ресурс и надежность по сравнению с электрическими машинами постоянного тока или асинхрон-

ными двигателями с фазным ротором, ВДПТ разработки АО «Электропривод» не являются исключением. В качестве примера высоких показателей надежности в таблице 2 приведена наработка на отказ электродвигателя ДБ32-25-12, рассчитанная с нарастающим итогом за 5 лет с доверительной вероятностью 0,5 при нулевом количестве отказов.

ВДПТ АО «Электропривод» спроектированы преимущественно на высокую частоту вращения (8000...15000 об/мин), однако разрабатываются и моментные электродвигатели, для которых характерны высокое отношение диаметра к длине и относительно низкая частота вращения. Естественным способом снижения частоты вращения ротора электродвигателя является увеличение числа пар полюсов $n=60f/p$.

В моментных электродвигателях применяют зубцовые обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, меньшим единицы, что органически присуще машинам с большим

числом пар полюсов. Другими словами, электрические машины с зубцовыми обмотками могут быть выполнены только многополюсными.

Магнитные системы роторов моментных электродвигателей могут быть как с внутренним расположением магнитов, так и с внешним. Конструкция электрической машины с неподвижным

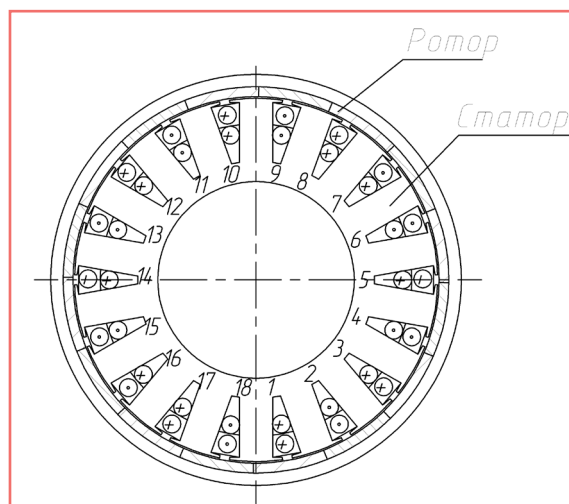


Рис. 3. Эскиз активной части электрической машины с постоянными магнитами с внешним ротором.

обмотанным статором и с внешним вращающимся ротором с постоянными магнитами в последнее время становится весьма актуальной. Данная конструкция по направлению магнитного потока является радиальной, магниты применяются в основном также радиально-намагниченные. Электродвигатели с внешним ротором широко применяются в мотор-колесах.

На рис. 3 показана типовая конструкция активной части ВДПТ с внешним ро-

Таблица 2. Показатели надежности электродвигателя ДБ32-25-12.

Объект	Наработка на отказ, ч
ИЛ 96-300	641 559
ТУ 204 и модификации	1 908 699
ТУ 214	299 235
ИЛ 114	177 606
Примечание: сведения приведены по состоянию на 2014 год	

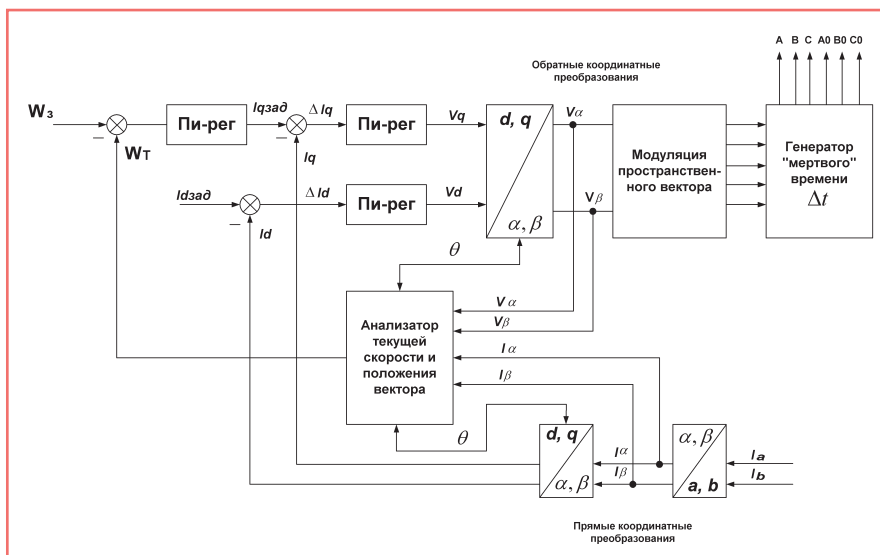


Рис. 4. Структурная схема векторного управления без ДПР.

тором разработки АО «Электропривод».

Для управления ВДПТ используется принцип самосинхронизации, заключающийся в том, что управление преобразователем частоты осуществляется в строгом соответствии с положением ротора ДБ, исключаяющим выпадение ДБ из синхронизма.

Задача управления ВДПТ сводится к определению закона переключения полупроводниковых ключей инвертора для обеспечения требуемого положения вектора МДС статора относительно положения вращающегося ротора. В связи с этим в ВДПТ используются два способа управления:

- дискретный, при котором по сигналам дискретного ДПР (например, на основе эффекта Холла) в заданных точках положения ротора осуществляются коммутация требуемых фаз обмотки статора и дискретное перемещение вектора МДС статора;
- непрерывный, при котором по сигналам непрерывного ДПР (например, резольвера или энкодера) формируется требуемый алгоритм коммутации ключей инвертора, при котором

вектор МДС статора плавно перемещается вдоль поверхности статора ВДПТ и неподвижен относительно вектора МДС ротора.

В настоящее время в ВДПТ разработки АО «Электропривод» используются оба способа управления (таблица 1).

Перспективной разновидностью векторного управления является бездатчиковое управление. Достоинством данного способа является отказ от ДПР, что приводит к увеличению надежности, улучшению массогабаритных показателей, исключению проводов, идущих от ДПР, и снижению стоимости.

Идентификацию вектора состояния системы при бездатчиковом управлении осуществляют с помощью различных оценивающих моделей-наблюдателей, основываясь только на информации об электрических переменных ДБ, не используя информацию о механических переменных (угловой скорости или положении). Входными данными являются электрические переменные ВДПТ (ток и напряжение статора ДБ), которые могут быть измерены с помощью датчиков, установленных внутри силового преоб-

разователя частоты. Структурная схема векторного управления без использования ДПР показана на рис. 4.

АО «Электропривод» разработан бездатчиковый ЭП компрессора системы кондиционирования самолета, в состав которого входят высокоскоростной электродвигатель ДБ160–30000–60-U (номинальная частота вращения – 55000 об/мин) и блок управления БУ СКВ (рис. 5).

В данном ЭП используется наблюдатель бездатчикового определения положения ротора, выполненный на основе наблюдения тока в скользящем режиме [3].

В настоящее время одной из тенденций АО «Электропривод» в разработке вентильных ЭП является использование мехатронных подходов. Мехатронный подход предполагает интеграцию элементов электропривода в один модуль.

К методам интеграции относятся:

- минимизация структурной сложности мехатронных модулей путем исключения из структуры промежуточных преобразователей и соответствующих интерфейсов, сохраняющая при этом функциональное назначение. Исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации создает основу для достижения высокой точности и быстродействия, компактности и надежности;
 - минимизация конструктивной сложности мехатронных модулей за счет аппаратно-конструктивного объединения устройств различной физической природы в едином корпусе многофункционального мехатронного модуля;
 - минимизация механической сложности мехатронного модуля путем переноса функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным, которые придают системе гибкость, поскольку их легко перепрограммировать под новую задачу.
- Мехатронный подход предполагает не дополнение, а замещение функций,



Рис. 5. Блок управления БУ СКВ.

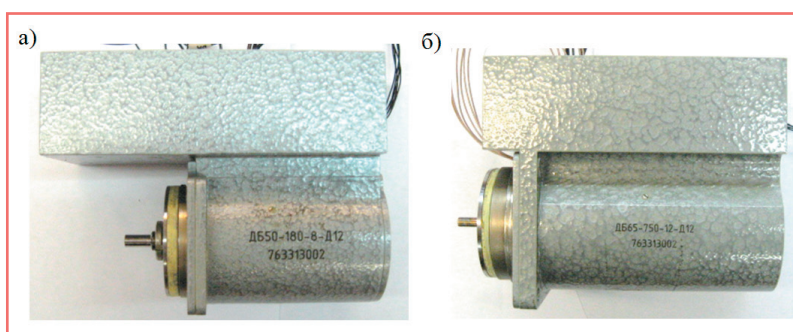


Рис. 6. Вентильные электродвигатели со встроенным блоком управления:
а) электродвигатель ДБ50-180-8-Д12; б) ДБ65-750-12-Д12.

традиционно выполняемых механическими элементами системы, на электронные и управляющие блоки. Примером переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства является способ бездатчикового управления мехатронными модулями. [4].

На рис. 6, 7 показаны ВДПТ, конструктивно выполненные в виде мехатронного модуля. Такой подход позволил значительно сократить габариты и массу, а также повысить надежность всего ЭП за счет исключения соединительных проводов и использования корпуса электродвигателя в качестве радиатора при охлаждении блока управления.

Активная работа ведется в новом для нашего предприятия направлении – разработке «мокрых» ВДПТ, через полости которых прокачивается жидкость. Особенность данных ВДПТ заключается в том, что прокачиваемая через электродвигатель жидкость используется для охлаждения как электродвигателя, так и теплонагруженных элементов блока управления, что приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи и позволяет увеличить нагрузку на электродвигатель без увеличения габаритов.

К такому типу электродвигателей относится ДБ126–22000–12–Д12 (рис. 7), предназначенный для привода топливного насоса, также реализованный в виде мехатронного модуля с ин-

тегрированным блоком управления.

Приведенный в статье обзор разработанных и выпускаемых АО «Электропривод» ВДПТ показывает широкий спектр их номенклатуры и области применения. АО «Электропривод» постоянно проводит работы по совершенствованию, внедрению новых конструкторских решений и технологий для создания научно-технического задела и разработки перспективных ВДПТ для ЭП специального назначения.

Литература

1. Волокитина Е.В. Использование потенциальных возможностей вентильных электродвигателей с постоянными магнитами – основа реализации концепции полностью электрифицированного самолета // Волокитина Е.В., Головизнин С.Б. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – № 3. – с. 31–33.
2. Нестерин В.А., Жуков В.П. Высокомомментные электродвигатели серий 5ДВМ // Электротехника – 2000. – № 6 – с. 17–19.
3. Волокитина Е.В., Власов А.И., Копчак А.Л., Москвин Е.В., Тебенков Ф.Г. Разработка высокоскоростного электропривода компрессора системы кондиционирования воздуха самолета // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – с. 37–42.
4. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2006.



Рис. 7. Электродвигатель ДБ126–22000–12–Д12.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электро-механика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Тебенков Фёдор Геннадьевич – родился в 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2-й категории АО «Электропривод». Имеет 4 научных работы.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer – project manager in JSC «Electroprivod». She is the author of 80 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional engineers».

Tebenkov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatSU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 7 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 4 scientific works.

Математическая модель электропривода реверсивного устройства авиадвигателя ПД-14

// Mathematical model of thrust reverser electric drive for aircraft engine PD-14 //

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

АО «Электропривод» выполняет опытно-конструкторскую работу по созданию электропривода реверсивного устройства для авиационного двигателя ПД-14. Наиболее значимыми параметрами электропривода реверсивного устройства являются его быстродействие и точность позиционирования. Аналитическая методика расчета быстродействия электропривода не позволяет учесть влияние контуров регулирования и переменный характер нагрузки на электропривод. В связи с этим для оценки быстродействия и точности позиционирования была разработана математическая модель электропривода реверсивного устройства.

Ключевые слова: реверсивное устройство, электропривод реверсивного устройства, блок управления, электро-механизм, математическая модель, быстродействие, точность позиционирования.

Современные самолеты развивают достаточно высокую скорость полета, одновременно наблюдается увеличение их посадочных скоростей. В связи с этим возникает острая необходимость в применении особых средств для уменьшения пробега при посадке реактивных самолетов.

Одним из наиболее эффективных средств торможения самолета при пробеге после посадки является реверсивное устройство (РУ), осуществляющее реверс тяги авиационного реактивного двигателя.

До недавнего времени РУ приводилось в действие при помощи гидравлических приводов с присущими им недостатками, одним из которых является применение токсичных рабочих жидкостей, значительно усложняющих обслуживание данных приводов.

Последние разработки в области создания приводов РУ направлены на электрическое и механическое (электро-механическое) управление [1].

АО «Электропривод» выполняет опытно-конструкторскую работу по соз-

JSC «Electroprivod» makes development project to creation aircraft thrust reverser electric drive for aircraft engine PD14. The most significant characteristics of electric drive for thrust reverser are actuation speed and positioning accuracy. Analytical methods of actuation speed calculation do not allow to take into account the influence of control loops and unsteadiness of load of electric drive. Due to this fact, for estimation of actuation speed and positioning accuracy was designed mathematical model of thrust reverser electric drive.

Keywords: aircraft thrust reverser, aircraft thrust reverser electric drive, control unit, electric actuator, mathematical model, actuation speed, positioning accuracy.

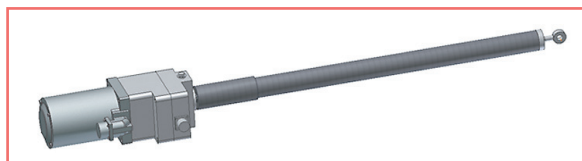


Рис. 1. Трехмерная модель электромеханизма.



Рис. 2. Трехмерная модель блока управления.

данию электропривода реверсивного устройства (ЭРУ) для авиационного двигателя ПД-14, разрабатываемого ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь).

Основные функции ЭРУ описаны в [1]. ЭРУ представляет собой многодвигательный электропривод с тремя электродвигателями, обеспечивающими синхронное движение трех исполнительных органов – штоков электро-механизмов.

Первоначально на этапе технического проекта предполагалось, что каждый электро-механизм будет управ-

ляться от отдельного блока управления [1]. Однако по результатам проработки компоновки ЭРУ в составе двигателя ПД-14 было принято решение о применении одного трехканального блока управления вместо трех одноканальных. Преимуществами данного решения являются отсутствие межблочных информационных кабелей, снижение количества соединителей, возможность размещения силовых ключей инверторов на общем радиаторе, увеличение помехоустойчивости и, как следствие, снижение массы всего ЭРУ.

Таким образом, комплект ЭРУ состоит из трех электро-механизмов поступательного движения на основе бесконтактных электродвигателей постоянного тока (рис. 1) и одного трехканального блока управления (рис. 2).

Наиболее значимыми параметрами ЭРУ являются его быстродействие и точность позиционирования выходных штоков электро-механизмов.

В соответствии с требованиями ОСТ 101040 переключатель РУ в положение «Обратная тяга» должна осуществ-

ляться за время не более 2 с [2].

Предварительный расчет времени переключения РУ был выполнен аналитическим способом по следующей методике.

Время переключения РУ, с

$$\sum t_{\text{ПЕР}} = t_{\text{П}} + t_{\text{ДВ}} + t_{\text{Т}} \quad (1)$$

где $t_{\text{П}}$ – время пуска электропривода [3], с;

$$t_{\text{П}} = 3 \dots 4 \cdot T_{\text{ЭМ}} \quad (2)$$

$T_{\text{ЭМ}}$ – электро-механическая постоянная времени электропривода, с;

$t_{\text{Т}}$ – время торможения электропривода, с;

$t_{\text{ДВ}}$ – время движения ЭРУ с постоянной скоростью, с;

$$t_{\text{ДВ}} = \frac{L - L_{\text{П}} - L_{\text{Т}}}{V_{\text{Ш}}} \quad (3)$$

L – полный ход РУ, мм;

$V_{\text{Ш}}$ – номинальная скорость штока электро-механизма, мм/с;

$L_{\text{П}}$ – перемещение РУ за время пуска, мм;

$$L_{II} = \frac{N_{II}}{i_{ред}} \cdot t_a \quad (4)$$

N_{II} – число оборотов электродвигателя за время пуска;

$$N_{II} = \frac{\varepsilon_{УСК} \cdot t_{II}^2}{2} = \frac{n}{60 \cdot t_{II}} \cdot \frac{t_{II}^2}{2} = \frac{n \cdot t_{II}}{120} \quad (5)$$

n – частота вращения электродвигателя, соответствующая скорости переключки $V_{III'}$ об/мин;

$i_{ред}$ – передаточное число редуктора;

t_a – шаг винта преобразователя вида движения, мм;

L_T – перемещение РУ за время торможения, мм;

$\varepsilon_{УСК}$ – ускорение электродвигателя при пуске, об/с.

$$L_T = \frac{N_T}{i_{ред}} \cdot t_a \quad (6)$$

N_T – число оборотов электродвигателя за время торможения;

$$N_T = \frac{n \cdot t_T}{120} \quad (7)$$

$$t_T = \frac{n \cdot J}{9,55 \cdot (M_T + M_H)} \quad (8)$$

J – суммарный момент инерции электромеханизма, приведенный к выходному валу электродвигателя, кг·м²;

M_T – момент торможения, создаваемый электродвигателем, Н·м;

M_H – момент нагрузки на валу электродвигателя, Н·м.

Данная методика имеет следующие недостатки:

- значительная погрешность определения времени пуска и торможения из-за переменного характера нагрузки (рис. 3);
- отсутствие возможности учета влияния параметров регуляторов контуров положения и скорости;

• отсутствие возможности учета влияния на разгон и торможение электромеханизмов алгоритмов синхронизации.

С целью устранения указанных недостатков, а также оценки точности позиционирования расчет времени переключки РУ был выполнен с использованием математического моделирования. Структурная схема математической модели (ММ) показана на рис. 4.

В качестве среды разработки ММ использовалось программное обеспечение Matlab Simulink.

ММ ЭРУ состоит из следующих основных блоков:

- системы управления (СУ), реализующей замкнутый контур регулирования по положению и алгоритм синхронизации электромеханических каналов;
- трех одинаковых блоков («Канал 1», «Канал 2», «Канал 3»), моделирующих работу электромеханических каналов ЭРУ;
- блока, задающего нагрузку на электропривод.

На вход СУ поступают сигналы измеренного положения штока всех трех электромеханизмов и сигнал задания конечного положения РУ. В зависимости от заданного положения РУ и текущего положения штоков СУ формирует сигналы задания частоты вращения электродвигателей электромеханических каналов и осуществляет их выдачу в блоки «Канал 1», «Канал 2», «Канал 3».

Структурная схема ММ одного электромеханического канала показана на рис. 5.

Функционально ММ электромеханического канала состоит из электродвигателя, редуктора с преобразователем вида движения и регулятора частоты вращения электродвигателя.

В основе математического описания электродвигателя лежит система уравнений синхронной магнитоэлектрической машины в системе координат dq , вращающейся синхронно с ротором [4].

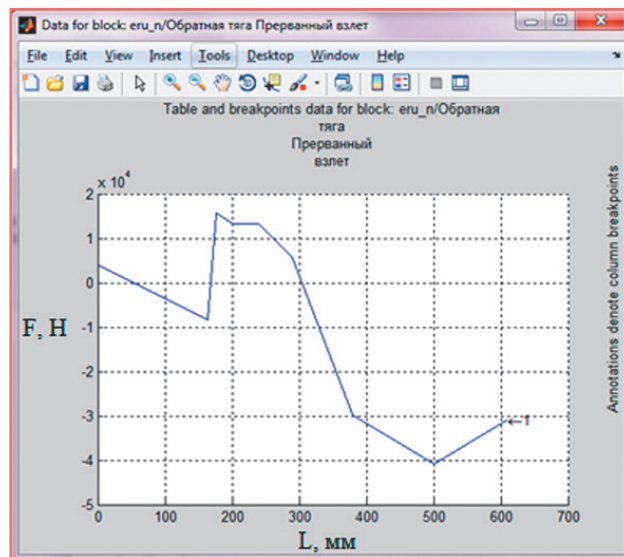


Рис. 3. Зависимость нагрузки на ЭРУ от положения РУ.

$$\begin{cases} u_d = R_s \cdot i_d + L_s \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L_s \cdot i_q \\ u_q = R_s \cdot i_q + L_s \cdot \frac{di_q}{dt} - \omega \cdot L_s \cdot i_d + \omega \cdot \Phi_0 \\ M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Phi_0 \cdot i_q \\ J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H \\ \omega = p \cdot \omega_m \end{cases} \quad (9)$$

где u_d, u_q – проекции вектора фазного напряжения на оси d и q , В;

i_d, i_q – проекции тока на оси d и q , А;

L_s – индуктивность фазы статора, Гн;

R_s – активное сопротивление фазы статора, Ом;

p – число пар полюсов электродвигателя;

Φ_0 – амплитудное значение магнитного потока ротора, сцепленного с витками фазы статора, Вб;

ω – угловая скорость магнитного поля статора, рад·с⁻¹;

ω_m – угловая скорость ротора, рад·с⁻¹;

t – время, с;

J – суммарный момент инерции электромеханизма, приведенный к валу электродвигателя.

Математическое описание редуктора с преобразователем вида движения имеет вид

$$\begin{cases} M_H = \frac{F_{III} \cdot t_a \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot i} \\ V_{III} = \frac{9,55 \cdot \omega_m \cdot t_a}{60 \cdot i} \\ L_{III} = \int V_{III} \cdot dt \end{cases} \quad (10)$$

где F_{III} – нагрузка на штоке электромеханизма, Н;

η – КПД механизма (редуктора и преобразователя вида движения);

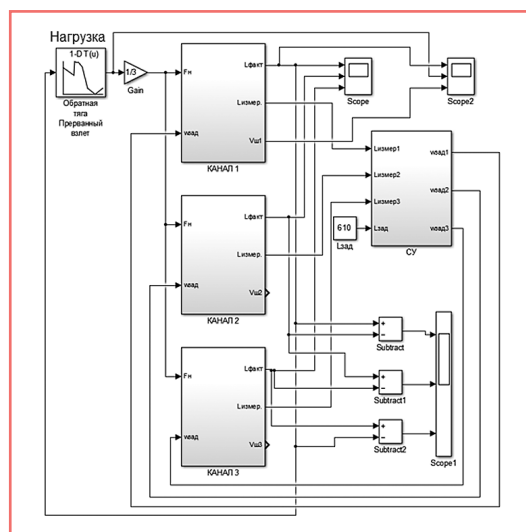


Рис. 4. Структурная схема математической модели ЭРУ в Matlab Simulink.

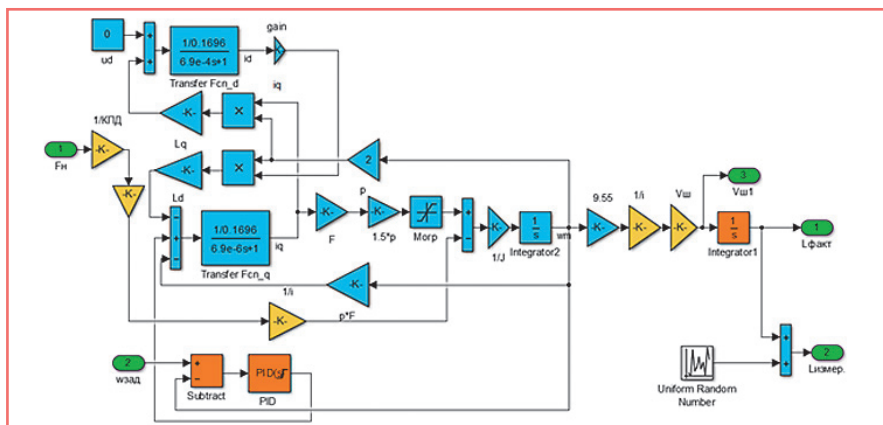


Рис. 5. Структурная схема ММ одного электромеханического канала ЭРУ в Matlab Simulink.

t_6 – шаг винта преобразователя вида
движения, мм;

i – передаточное число редуктора;

V_{III} – скорость штока, мм/с.

Регулятор скорости выполнен на основе ПИ-регулятора и предназначен для регулирования частоты вращения электродвигателя в соответствии с заданным СУ значением.

В реальном электроприводе всегда имеется погрешность измерения положения выходного штока, которая обусловлена погрешностью датчика положения, люфтом электромеханизма, погрешностью оцифровки и т.д. Учет этой погрешности в модели осуществляется следующим образом: к значению положения штока, рассчитанному по формуле (10), прибавляется случайное значение, амплитуда изме-

нения которого равна расчетной погрешности измерения. Таким образом, в модели различаются фактическое (L факт.) и измеренное (L измер.) положения штока.

Блок задания нагрузки осуществляет выдачу сигнала нагрузки в зависимости от положения РУ (рис. 3).

В результате моделирования ЭРУ с учетом заданного усилия на выходных штоках электромеханизмов при переключке ЭРУ в положение «Обратная тяга» получены осциллограммы, показанные на рис. 6.

В результате анализа осциллограмм (рис. 6) выявлено:

- перекладка ЭРУ в положение «Обратная тяга» происходит за время не более 2 с;
- рассогласование положения штоков между каналами не превышает допустимого значения $\pm 0,25$ мм.

Выводы

1. РУ является одним из наиболее эффективных средств торможения самолета при пробеге по взлетной полосе. Перспективной тенденцией является разработка электромеханического привода РУ.

2. Наиболее значимыми параметрами ЭРУ являются быстродействие и точность позиционирования. В связи этим на этапе проектирования перед разработчиком встает задача адекватной оценки этих параметров.

3. Расчет быстродействия ЭРУ по аналитической методике не обеспечивает приемлемую точность. В связи с этим для оценки быстродействия и точности позиционирования была разработана ММ ЭРУ.

4. Разработанная ММ учитывает влияние контуров регулирования на быстродействие и точность позиционирования, а также позволяет моделировать погрешность канала измерения положения штока.

5. Анализ результатов моделирования показывает теоретическую воз-

возможность обеспечения выполнения требований быстродействия и точности позиционирования.

6. В настоящее время разработанный электропривод проходит испытания в составе авиадвигателя ПД-14. По результатам испытаний при необходимости будут внесены коррективы в методику определения быстродействия и точности позиционирования.

Литература:

1. Волокитина Е.В., Тевеньков Ф.Г. Электропривод реверсивного устройства для перспективных двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 3. – с. 30–33.
2. ОСТ 101040–82 Устройства для реверсирования реактивной тяги авиационных газотурбинных двигателей. Общие технические требования.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для ВУЗов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. – СПб, КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 27 лет, авиационного электропривода – 17 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором – руководителем проекта АО «Электропривод». Автор более 80 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Тебеньков Фёдор Геннадьевич – родился 1986 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Имеет 7-летний опыт работы в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает инженером-конструктором 2-й категории АО «Электропривод». Имеет 4 научных работы.

Volokinina Elena – in 1981 she graduated from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 27 years, aviation electric drivers – 17 years. At present she is working as a leading designer – project manager in JSC «Electropivod». She is the author of 80 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional engineers».

Tebenkov Fedor – was born in 1986. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatsU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines is 7 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivod». He is the author of 4 scientific works.

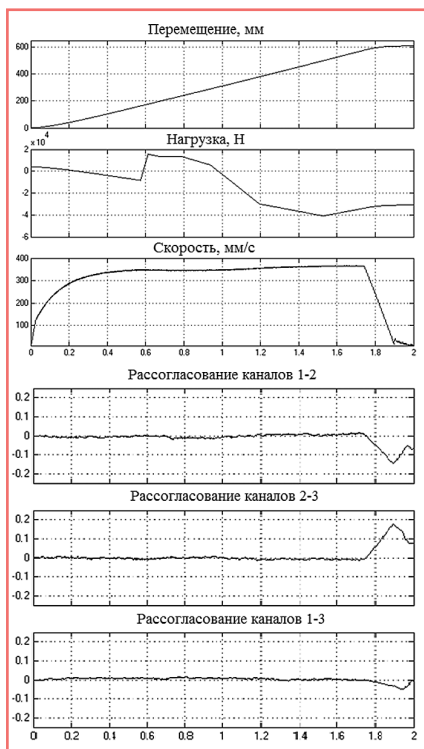


Рис. 6. Осциллограммы результатов моделирования ЭРУ.

Испытания изделий – важный этап выполнения опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ

// Products' testing is a significant phase of research and development //

**Бычков В. И., Вшивцев М. Н., Гусев С. В., Бессолицин А. Г.,
АО «Электропривод», г. Киров**

В статье приведены история создания и современное состояние экспериментально-исследовательского отдела АО «Электропривод». В настоящее время АО «Электропривод» располагает уникальным лабораторным оборудованием, позволяющим проводить испытания электротехнической продукции авиационного и военного назначений. Ключевые слова: экспериментально-исследовательский отдел, лабораторное оборудование, испытательный комплекс, электропривод, внешние воздействующие факторы.

The article presents history of creation and current state of affairs of the research department of JSC «Electroprivod». Today the JSC «Electroprivod» has unique laboratory equipment, which allows testing electro technical products for military or airborne application.

Keywords: experimental and research department, laboratory equipment, testing facility, electric drive, environmental conditions.

История экспериментально-исследовательского (ЭИО) отдела АО «Электропривод» началась более 50 лет назад, почти с первых дней образования предприятия. После завершения строительства инженерно-конструкторского корпуса был создан экспериментально-исследовательский отдел, который был укомплектован уникальным испытательным оборудованием и превратился в мощную и современную лабораторную базу с лабораториями электропривода, электроаппаратуры и источников питания, автоматического регулирования.

В 1966 году с вводом в эксплуатацию лабораторного корпуса были организованы новые лаборатории: автоматики и коммутационной аппаратуры, следящих систем и механизмов, входного контроля, испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам (ВВФ), вентильных двигателей, эксплуатации, мастерская по ремонту и эксплуатации испытательного оборудования.

На базе отдела были сформированы и выделены в самостоятельные подразделения отделы метрологии и вычислительной техники.

В отделе одними из первых в отрасли были освоены и внедрены (а некоторые и разработаны) методы испытаний: эквивалентно-циклические, на безотказность, быстрое разряжение, электромагнитную совместимость, радиационную стойкость и др.

Продолжала развиваться лабораторная база. Было приобретено и смонтировано уникальное импортное и отечественное оборудование: термобарокамеры, климатические камеры, камеры дождя, бароудара, морского тумана, электродинамические вибростенды, ударные стенды, стенд линейных ускорений, установки типа «Леонардо» для испытаний генераторов, балансирные машины, высококачественные преобразователи, источники питания постоянного тока и другое оборудование. В отделе главного метролога насчитывается более 600 единиц электрорадиоизмерительных приборов. В отделе главного механика и энергетика изготовлены сотни единиц нестандартных средств испытаний.

Такая оснащенность позволяет проводить испытания электротехнической продукции авиационного и военного назначений в различной конфигурации внешних воздействующих факторов в соответствии с требованиями различных стандартов: ЕНЛГ-З, ГОСТ РВ 20.57.305, ГОСТ РВ 20.57.306, КТ-160Д.

Проведены испытания вновь разработанных изделий: ЭПА-1, ЭПЗ-324, ЭППЗ-334, ЭПАО-100, ЭППЗ-204, МРС-1, БК-90А 2, СУПМ-76, устанавливаемых на гражданские и военные объекты. Идут государственные испытания изделий ЭПЗ-77М, ЭППЗ-204. Проведены макетные отработки и исследовательские испытания изделий для двигателя но-

вого поколения ПД-14, идет разработка высокودинамичного стенда нагрузки штоковых электромеханизмов, приобретается новое испытательное оборудование. Так, за последнее время в отделе появились вибростенд TIRAvib, статические источники переменного тока Chroma, автоматизированный тестер Formula TT, виброанализатор Zetlab, проведена модернизация термобарокамеры STBV-1000 Feutron, организован испытательный стенд с дистанционным управлением высокоскоростного электропривода ЭП СКВ.

ЭИО получил от ФГКУ «46 ЦНИИ» МО РФ свидетельства об аттестации, которые удостоверяют, что отдел соответствует требованиям к технической компетентности, предъявляемым в РД В 319.02.70–08 «Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения».

На сегодняшний день отдел укомплектован современным испытательным оборудованием, квалифицированными специалистами и может решать поставленные перед ним задачи.

Номенклатура изделий АО «Электропривод» разнообразна – от исполнительных электромеханизмов малой мощности, авиационных генераторов, блоков управления до сложного автоматизированного электропривода.

В настоящее время ЭИО состоит из лабораторий электроавтоматики, электромеханики, сопровождения испытаний на ВВФ, группы эксплуатации и входного контроля.

В 2011–2012 гг. в отделе организовано рабочее место для испытаний (РМИ) системы управления приводами механизации СУПМ-76 самолета Ил 76МД-90А РМИ СУПМ-76 (рис. 1), состоящее из:

- пультов проверки с комплектом жгутов, обеспечивающих коммутацию и контроль входных/выходных сигналов СУПМ-76, а также имитацию отказных ситуаций;

- электронного имитатора взаимодействующих систем по стандарту Arinc 429;

- электронного имитатора трансмиссии механизации крыла самолета на базе гидропривода, датчиков положения и концевых выключателей.



Рис. 1. РМИ СУПМ-76.

Особое внимание следует обратить на электронный имитатор трансмиссии механизации крыла. Данная идея была предложена непосредственным заказчиком системы – ОАО «Ил», проработана ИО АО «Электропривод» и реализована в бюро научно-исследовательских разработок АО «Электропривод».

Новый подход в имитации механической трансмиссии гидроприводов с датчиками положения и концевыми выключателями позволил уйти от механических стендов с редукторными системами распределения энергии вращения приводных электродвигателей, предназначенных для использования комплекта датчиков БР-50 и БДКВ-11.

Были пересчитаны входные механические характеристики датчиков в электрические величины в соответствии с законами работы механизации крыла. Проработаны отказные ситуации: самоход, рассинхронизация в различной конфигурации, выход за концевые выключатели. Оговорены законы движения трансмиссии в соответствии с ТЗ.

Имитатор трансмиссии состоит из электронного блока и управляющей программы для персонального компьютера (рис. 2). Управляющая программа

позволяет задать различные режимы работы датчиков, аварийные ситуации, визуализирует процесс изменения сигналов датчиков, концевых выключателей и состояние задатчика положения предкрылков и закрылков. Электронный блок реализован на основе микроконтроллера PIC18F8722, получает цифровые данные от управляющей программы и преобразует их в аналоговые сигналы, имитирующие работу физических датчиков БР-50 и БДКВ-11, измеряет сигнал задатчика положения и передает его в управляющую программу.

Данное РМИ позволило провести испытания всех этапов ОКР системы СУПМ-76, используя внешние средства контроля параметров. Преимущества такой конфигурации: уменьшение затрат на изготовление оборудования (механическая часть), возможность управления с помощью одного специалиста, отсутствие шумов, простота настройки датчиков механизации крыла, ускорение испытательного процесса.

В настоящее время на предприятии идет реализация автоматизированного нагрузочного комплекса высокодинамичных электроприводов поступательного движения.

Нагрузочный комплекс необходим для испытаний электромеханизмов и электропривода реверсивного устройства ЭРУ-ПД14 двигателя ПД-14 среднемагистрального самолета нового поколения МС-21.

Электропривод ЭРУ-ПД14 предназначен для управления положением подвижного обтекателя реверсивного устройства и элементами подвижной

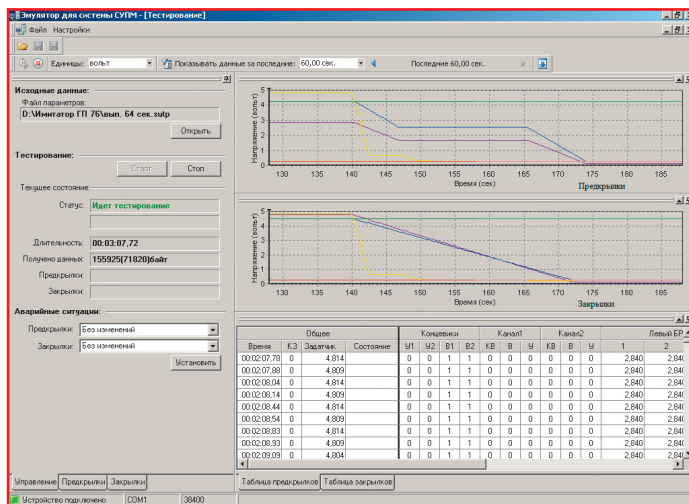


Рис. 2. Общий вид окна управления электронным имитатором трансмиссии механизации крыла.

части РУ по сигналам электронного регулятора самолета и командам пилота.

Главная задача при испытании такого электропривода – это имитация статической и динамической нагрузок на штоках электромеханизмов. Основные технические параметры комплекса:

- ход штока – до 1210 мм;
- скорость перемещения – до 1,0 м/с;
- нагрузка на шток каждого электро-механизма – до 3 тонн;
- динамика изменения нагрузки – 20 тонн/сек.

Реализация нагрузочного комплекса базируется на линейных электродвигателях компании Sew Eurodrive с системой измерения абсолютных линейных перемещений. Линейные электродвигатели обеспечивают высокую скорость перемещения (до 6 м/с) и ускорение вторичной части линейного электродвигателя, а также высокую точность позиционирования. Двигатели позволяют увеличить участок перемещения за счет стыковки вторичных частей в ряд. Внешний вид линейного двигателя с системой измерения линейных перемещений приведен на рис. 3. Внешний вид нагрузочного стенда для одного

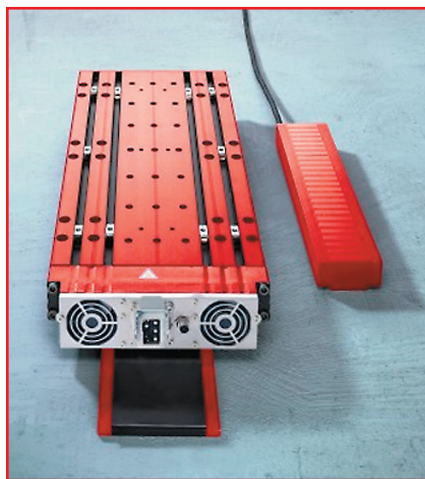


Рис. 3. Внешний вид линейного электродвигателя и системы измерения абсолютных линейных перемещений.

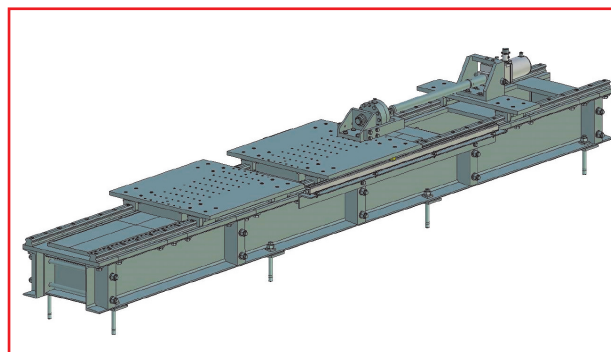


Рис. 4. Внешний вид нагрузочного стенда для одного электро-механизма.

электромеханизма приведен на рис. 4.

При разработке концепции нагрузочного комплекса было поставлено требование максимально точно и синхронно контролировать рабочие параметры электропривода, такие как ускорение, мгновенная скорость перемещения штоков, нагрузка, положение и рассогласование штоков электромеханизмов, а также целый ряд электрических параметров. Выполнение этого требования возможно с помощью системы сбора данных. В данном случае используется система фирмы L-Card с 8-местным крейтом LTR-EU-8-2 с интерфейсами USB2.0, Ethernet и встроенным источником питания 12 В.

Крейт LTR-EU-8-2 представляет собой рабочую станцию с посадочными местами для 8 гальванически изолированных LTR-модулей, с двумя интерфейсами – USB2.0 (high speed) и Fast Ethernet (100BASE-TX) – и интерфейсом синхронизации (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид 8-местного крейта с установленными модулями.

Использование возможностей Ethernet-интерфейса позволяет осуществлять ввод данных практически на любом расстоянии от компьютера оператора, а готовое ПО удаленного сбора данных существенно снижает трудоемкость реализации прикладных задач.

В нашем случае в крейт устанавливаются следующие модули:

- специализированный модуль АЦП LTR212M-2 для подключения до 8 тензодатчиков для контроля усилия на штоках электромеханизмов;
- модуль LTR27 с встроенным submodule Н-27Т для подключения измерительного шунта постоянного тока с реализацией разнотипных изолированных каналов для измерения постоянных и медленно меняющихся по времени электрических сигналов напряжения и тока;
- модули LTR11 для подключения 4 датчиков тока на основе эффекта Холла и 3 датчиков линейного перемещения. Отличительная особенность модуля – это высокая частота опроса измеряе-

мых параметров (суммарная 400 кГц), что позволяет вести контроль в различных переходных процессах (при пуске электропривода и изменении нагрузки). Коммутация входных каналов модуля и выбор амплитудных диапазонов осуществляются программно.

Комплект датчиков обратной связи для измерения параметров электропривода и защиты от различных аварийных ситуаций позволяет с заданной точностью контролировать процесс испытаний. В данном случае применяются следующие датчики: Тензо-М для контроля усилия, датчики линейного перемещения Balluf BTL5-H110-M1250-P-S92 с большим порогом устойчивости к эфирным и сетевым помехам, датчики переменного тока ДТТ-03 с детектором пиковых и фиксацией действующих значений, шунты постоянного тока типа 75 ШИСВ.1–20–0,2.

Нагрузочный комплекс с системой сбора данных – это универсальная трехканальная система, которая позволяет испытывать и определять параметры высокочастотных электромеханизмов поступательного действия. Примененные комплектующие нагрузочного комплекса входят в Госреестр СИ РФ, тем самым расширяя спектр использования данного нагрузочного комплекса в области современного машиностроения и техники военного назначения.

Из наиболее значимых работ ЭИО следует отметить следующие.

1. Создан измерительный комплекс по вибрографированию и термометрированию изделий на различных объектах, который позволял выполнять работы как в полете, так и в наземных условиях.

2. Система сигнализации и аварийного отсоединения вала генератора от привода в случае разрушения шарикоподшипников внедрена в производство на генераторах СГО-30УРС, СГС-30-8РС и других.

3. Проводятся работы по испытанию и внедрению новой марки смазки, обеспечивающей длительную работу шарикоподшипников генераторов в эксплуатации.

4. Разработана конструкция демпферной муфты в генераторе СГС-30-8, которая устранила «крутильные» колебания и уменьшила износ щеток до нормальной величины.

5. Проведены работы в направлении увеличения ресурса и надежности серийных изделий. Повышен ресурс целого ряда изделий в 5–10 раз, причем без снижения эксплуатационной надежности.

6. Разработаны методики и изготовлено испытательное оборудование на комплексное воздействие факторов, ко-

торое позволяет одновременно подвергнуть узлы и изделия испытаниям, например, на высоту, температуры и вибрацию.

7. Разработан пульт диагностики механизмов ПДГМ, предназначенный для дистанционной проверки износов пар сцепления-торможения электромеханизмов МУС-7А, МУЗ-ЗПТВ, МВД25Д25М, ЭПВ-8ПМ и других без снятия электромеханизмов с объекта.

В разработке и освоении новых методов отдел сотрудничал с такими организациями, как ГК НИИ ВВС, ГОСНИИ ГА, ВНИИ ЭО, ВНИИ НП, ЦИАМ, СибНИИ ГА, ФГУП 22 ЦНИИ МО РФ и другими.

Бычков Владимир Иванович – родился в 1940 году. В 1962 году окончил Уральский политехнический институт. Опыт работы в области авиационного электропривода – более 50 лет. Заслуженный машиностроитель РФ.

Вшивцев Максим Николаевич – родился в 1983 году. В 2010 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 13 лет. В настоящее время работает начальником лаборатории ЭИО АО «Электропривод».

Гусев Сергей Владимирович – родился в 1982 году. В 2004 году окончил Вятский государственный университет. Опыт работы в области авиационного электропривода – 11 лет. В настоящее время работает начальником отдела испытаний АО «Электропривод».

Бессолицин Андрей Генрихович – родился в 1952 году. В 1974 году окончил Кировский политехнический институт. Опыт работы в области электротехнических и электронных изделий – более 35 лет.

Bychkov Vladimir – was born in 1940. In 1962 he graduated from Uralskiy Polytechnic Institute. His work experience in the area of aviation electrical drive is more than 50 years. He is a merited mechanical engineer of the Russian Federation.

Vshivtsev Maksim – was born in 1983. In 2010 he graduated from Vyatskiy State University with specialization in «Electrical drive and automatics of industrial machines». His work experience in the area of aviation electrical machines is 13 years. At present he works as laboratory head of the research department in JSC «Electroprivod».

Gusev Sergey – was born in 1982. In 2004 he graduated from Vyatskiy State University. His work experience in the area of aviation electrical drive is 11 years. At present he works as head of the test department in JSC «Electroprivod».

Bessolitsin Andrey – was born in 1952. In 1974 he graduated from Kirovskiy Polytechnic Institute. His work experience in the area of electro-technical and electronic products is more than 35 years.

Сведения об авторах

Будин Лев Николаевич
8-963-431-86-66

Вишневский Сергей
Никодимович
(8332) 58-25-86

Садаков Николай
Александрович
8-963-431-94-49

К. т. н., доцент
Волокитина Елена Владимировна
(8332) 58-43-88

Рубцова Людмила
Александровна
(8332) 58-43-88

Бычков Владимир Иванович
(8332) 35-84-27

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 18%

Оформить подписку можно:

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

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

e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2015 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.