Конкурсная работа: *Разработка, изготовление и испытания электротехнических агрегатов для российского перспективного авиационного турбовентиляторного авиадвигателя ПД-14*

Авторский коллектив в составе:

Конышев Дмитрий Владимирович, Власов Андрей Иванович, Рубцова Людмила Александровна, Москвин Евгений Владимирович, Опалев Юрий Геннадьевич, Ерохин Денис Викторович

Цель проекта

Целью проекта является создание отечественных электротехнических комплектующих (агрегатов) для реализации российского проекта более электрифицированного перспективного авиационного двигателя увеличенной тяги ПД-14, способного конкурировать с аналогичными образцами зарубежной техники.

Актуальность проекта

Коммерциализация мирового гражданского авиастроения, рост стоимости создания самолётов, повышение цен на горючее, ужесточение глобальной конкуренции и другие факторы вынуждают разработчиков авиационной техники адаптировать несколько типов авиационных двигателей для одного объекта.

Расчёты, проведенные в начале 2000-х годов, привели к выводу, что ни один из существовавших на тот момент в мире двигателей не позволял добиться требуемого повышения топливной эффективности. К середине 2000-х годов были сформулированы требования к авиадвигателю нового поколения, что позволило начать переговоры с ведущими двигателестроителями России и мира. Готовых двигателей, позволяющих реализовать концепцию МС-21, на тот момент ни у кого не было. Поэтому было решено ориентироваться на перспективные разработки, задел по которым в той или иной степени имелся у всех основных участников рынка.

Так, при реализации российского проекта МС-21 для гражданской авиации разработчиками принято решение использовать разработки компаний Pratt & Whitney и АО "ОДК-Авиадвигатель". В обоих случаях задача ставится вернуться с конкурентоспособным продуктом на растущие внутренний и зарубежный рынки. Для решения поставленной задачи необходимо использовать все резервы улучшения лётно-технических и экономических характеристик самолёта.

Компания Pratt & Whitney разработала двигатель нового поколения, получивший наименование PW1400G в 2007 году.

Полномасштабная комплексная работа по созданию нового российского двигателя для гражданских и транспортных самолётов началась в 2008 году.

За основу были взяты научно-технический и технологический заделы, наработанные АО "ОДК-Авиадвигатель", ведущими институтами и другими предприятиями отрасли. Авиадвигатель получил наименование ПД-14. Разработка базового варианта ПД-14 велась с прицелом на сформированный облик самолёта МС-21.

Разработка двигателя осуществлялась в рамках государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы". Проект инициирован АО "ОДК" в целях обеспечения альтернативных поставок авиационных двигателей для перспективных российских среднемагистральных самолетов и поддержан ПАО "ОАК".

Авиадвигатель ПД-14 — первый с 1980-х годов полностью российский турбовентиляторный двигатель для гражданской авиации и первый отечественный двигатель, изначально разработанный в соответствии с международными нормами и требованиям мирового рынка.

Высокотехнологичный и конкурентоспособный двигатель ПД-14 предназначен для перспективного семейства среднемагистральных самолётов МС-21 (150-220 пассажирских мест). По сравнению с лучшими в настоящий момент аналогами, заявленные параметры авидвигателя обеспечат снижение удельного расхода топлива на крейсерском режиме на 15%.

В связи со сказанным, разработка новых электротехнических агрегатов, удовлетворяющих всем требованиям, предъявляемым к комплектующим изделиям для перспективного авиадвигателя ПД14 является актуальной задачей.

Описание выполненной работы

В 2018 году в рамках государственной программы Российской Федерации "Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы"" по договору с АО "ОДК-Авиадвигатель" авторским коллективом АО "Электропривод" выполнен ряд опытно-конструкторских работ:

1. Разработка электромагнита ЭМТ-14РУ для управления замком реверсивного устройства двигательной установки авиадвигателя ПД14;
2. Разработка электромеханизма МЗС-14 заслонки воздушного стартера авиадвигателя ПД14;
3. Разработка системы электропитания и коммутации СЭПК-14-1 авиадвигателя ПД14;
4. Разработка электропривода реверсивного устройства ЭРУ-ПД14 для авиадвигателя ПД14;
5. Разработка системы сигнализации пневмоцилиндров ССП-ПД14 для авиадвигателя ПД14;
6. Разработка привода сдвижки реверсивного устройства ПСФ-14 для мотогондолы авиадвигателя ПД-14.

1. Разработка электромагнита ЭМТ-14РУ для управления замком реверсивного устройства двигательной установки авиадвигателя ПД14

В связи с тем, что технические характеристики и конструктивное исполнение существующих в настоящее время отечественных и зарубежных электромагнитов не в полной мере удовлетворяют потребителей по возросшим техническим требованиям, связанными с виброустойчивостью, вибропрочностью, диапазону рабочих температур, ресурсным показателям, появилась необходимость в разработке электромагнита ЭМТ-14РУ, используемого в качестве элементов силового привода для управления замком реверсивного устройства на авиадвигателе ПД14.

Особенностью электромагнита ЭМТ-14РУ являются требование повышенного быстродействия и высокое значение напряжения отпускания. В ходе разработки были определены факторы, влияющие на время срабатывания/отпускания электромагнита: коэффициент запаса обмотки по току срабатывания, конфигурация магнитопровода, соотношение длин полюса и якоря, оптимальное расположение воздушного зазора относительно обмотки, начальное тяговое усилие. Для обеспечения необходимого напряжения отпускания применена пружина с большим усилием в сжатом состоянии, а также введён немагнитный "промежуток" в месте соединения фланца с корпусом.

Внешний вид электромагнита ЭМТ-14РУ, разработанный для авиадвигателя ПД-14, показан на рис. 1, технические характеристики представлены в табл. 1.

Рис. 1 - Внешний вид электромагнита ЭМТ-14РУ

Табл. 1 – Технические характеристики ЭМТ-14РУ

Наименование параметра		Значение
Напряжение питания, В		28
Напряжение отпускания при tокр.ср.= (25±10) °С, В, не менее		1
Напряжение срабатывания, В, не более		16
Потребляемый ток при U=28В и tокр.ср.= (25±10) °С, не более, А		2,3
Тяговое усилие, Н (кгс)	в начале хода штока	4,9 (0,5)
	в конце хода штока	78,4 (8,0)

Наименование параметра	Значение
Рабочий ход, мм	$9^{+0,5}$
Время срабатывания/отпускания во всех условиях эксплуатации, с, не более	0,2
Масса, не более, кг	2,3
Габарит, мм	Ø62,5x120
Режим работы	кратковременный

Опытные образцы электромагнита прошли в полном объеме межведомственные испытания, присвоена литера «О1» и изделие готово к серийным поставкам, осуществлены поставки ЭМТ-14РУ для комплектования первых авиадвигателей ПД-14.

2. Разработка электромеханизма МЗС-14 заслонки воздушного стартера авиадвигателя ПД14

В настоящее время технические характеристики и конструктивное исполнение существующих отечественных и зарубежных электромеханизмов, применяемых в качестве приводов заслонки воздушного стартера авиадвигателей, не в полной мере удовлетворяют потребителей по возросшим техническим требованиям, связанными с виброустойчивостью, вибропрочностью, диапазону рабочих температур, ресурсными показателям, а также в необходимости фиксации заслонки воздушного стартера в промежуточных положениях.

В связи с этим, для авиадвигателя ПД-14 появилась необходимость в разработке нового электромеханизма МЗС-14, используемого в качестве электропривода заслонки воздушного стартера, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям.

Особенностью электромеханизма МЗС-14 являются требование повышенного быстродействия при закрытии, непрерывный контроль исправности, фиксации заслонки воздушного стартера в промежуточных положениях и высокие ресурсные показатели. Высокое быстродействии решено установкой на второй ступени редуктора электромагнитного расцепителя, что уменьшает вращающиеся инерционные массы и обеспечивает при этом достаточную плавность хода для недопущения ударных нагрузок. Непрерывный контроль исправности осуществляется за счет встроенной микропроцессорной системы, реализованной на микросборке, позволяя уменьшить массу и габариты электромеханизма. Высокие ресурсные показатели достигнуты за счет отсутствия в электромеханизме фрикционных и контактных элементов.

Внешний вид электромеханизма МЗС-14, разработанный для авиадвигателя ПД-14, показан на рис. 2, технические характеристики

представлены в табл. 2.

Рис. 2 - Внешний вид электромеханизма МЗС-14

Табл. 2 – Технические характеристики электромеханизма МЗС-14

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания постоянного тока, В	28
Нагрузочный момент на выходном валу, Н·м (кгс·м)	14 (1,43)
Угол поворота выходного вала с возможностью остановки в промежуточном положении и изменение этого положения по сигналам РЭД, град	90±3
Масса, кг, не более	2
Габариты, мм, не более	136,5x120x76

Опытные образцы электромеханизма прошли в полном объеме межведомственные испытания, присвоена литера «О1» и изделие готово к серийным поставкам, осуществлены поставки МЗС-14 для комплектования первых авиадвигателей ПД-14.

3. Разработка системы электропитания и коммутации СЭПК-14-1 авиадвигателя ПД14

Отсутствие современных отечественных автономных источников питания с дублированием каналов электропитания и резервированием электропитания от бортовой сети для перспективных электрифицированных авиационных двигателей привело к необходимости разработки новой системы электропитания и коммутации СЭПК-14-1 для авиадвигателя ПД-14.

Особенностями СЭПК-14-1 является:

- наличие двух каналов генерирования электроэнергии с разделением на четыре линии электропитания в каждом канале;

- стабильное выходное напряжения питания в широком диапазоне частоты вращения компрессора высокого давления авиадвигателя;

- резервирование электропитания потребителей бортовой сетью при отказе СЭПК-14-1;

- обеспечение бесперебойности электропитания при провалах напряжения питания;

- обеспечение работы в условиях жесткой вибрации авиадвигателя в широком диапазоне рабочих температур, воздействии электромагнитных помех, молнии, дождя и т.д.;

- обеспечение стабильности работы системы электропитания авиадвигателя в условиях пожара

Система СЭПК-14-1 состоит из двух агрегатов: двухканального бесконтактного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, обеспечивающим генерирование электроэнергии и блока питания и коммутации, обеспечивающим стабилизацию и бесперебойность выходного напряжения питания и распределения электропитания по линиям.

Генератор устанавливается на коробку приводов авиадвигателя, блок питания и коммутации устанавливается на корпусе авиадвигателя.

Внешний вид агрегатов СЭПК-14-1, разработанный для авиадвигателя ПД-14, показан на рис. 3, технические характеристики приведены в табл. 3.

Рис. 3 – Внешний вид агрегатов СЭПК-14-1

Табл. 3 – Технические характеристики СЭПК-14-1

Наименование параметра	Значение
Выходная мощность каждого канала, не менее, Вт	210
Выходное напряжение питания, В	От 31 до 33
Частота вращения генератора, об/мин	От 3095 до 10063
Выходной ток каждого канала, не более, А	6
Рабочая/предельная повышенная температура генератора, °С	120/140
Рабочая повышенная температура блока питания и коммутации, °С	70/85
Предельная пониженная температура, °С	Минус 60
Суммарная масса агрегатов, не более, кг	9
Режим работы	продолжительный

Опытные образцы СЭПК-14-1 прошли в полном объеме предварительные испытания и испытания на летающей лаборатории. В настоящее время проводится подготовка изделия к серийным поставкам, осуществлены поставки СЭПК-14-1 с целью комплектования первых авиадвигателей ПД-14 для летно-конструкторских испытаний.

4. Разработка электропривода реверсивного устройства ЭРУ-ПД14 для авиадвигателя ПД14

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

Для выполнения эффективного торможения самолета тормозные системы должны работать в комплексе, каждой из которых предназначается выполнение функции снижения скорости самолёта на требуемом участке взлётно-посадочной полосы (ВПП).

Наиболее эффективным устройством для торможения является реверсивное устройство (РУ) реактивного сопла двигателя.

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

В мировой практике в качестве привода РУ применяются гидравлические приводы. Гидравлический привод РУ содержит в себе ряд недостатков, присущих всем приводам, функционирующих под управлением гидравлической системы.

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

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

В связи со сказанным для перспективного авиадвигателя ПД-14 появилась необходимость в разработке электромеханической системы РУ, где в качестве исполнительного органа применен электропривод ЭРУ-ПД14. Применение электромеханической системы РУ с электроприводом ЭРУ-ПД14 обусловлено его достоинствами: надёжность в эксплуатации, отсутствие гидрожидкости, отсутствие трубопроводных коммуникаций, простота обслуживания, меньшая масса (за счет отказа от трубопроводов, гидроцилиндров и гидрожидкости).

Особенностью электропривода ЭРУ-ПД14 являются требования повышенного быстродействия, высокой точности синхронизации и высокие ресурсные показатели. Высокое быстродействии решено установкой ролико-винтовой пары, как преобразователя вида движения, с безредукторным соединением с валом электродвигателя, что уменьшает вращающиеся инерционные массы и обеспечивает высокие динамические показатели. Высокая точность синхронизации штоков трех электромеханизмов обеспечивается реализацией алгоритмов методом распределенных вычеслений. Высокие ресурсные показатели электропривода ЭРУ-ПД14 значительно выше существующих гидравлических приводов. Электропривод ЭРУ-ПД14 не имеет аналогов в мире.

Внешний вид электропривода ЭРУ-ПД14, разработанный для авиадвигателя ПД-14, показан на рис. 4, технические характеристики

представлены в табл. 4.

Рис. 4 - Внешний вид электропривода ЭРУ-ПД14

Табл. 4 – Технические характеристики электропривода ЭРУ-ПД14

Наименование параметра	Значение
Напряжение питания: - переменное трехфазное, частотой 400 Гц, В - постоянное, В	 115-200 28
Максимальные суммарные нагрузки, Н	40971,93
Длительность перекладки положений РУ при температуре не ниже минус 40 ºС, с	2 - 6
Точность позиционного положения выходных штоков, мм	± 0,25
Режим работы электропривода	длительный
Режим работы электромеханизма, входящего в состав электропривода	повторно-кратковременный
Масса суммарная, кг, не более	58
Исполнение	всеклиматическое

Опытные образцы электропривода ЭРУ-ПД14 прошли стендовые испытания и испытания на летающей лаборатории.

5. Разработка системы сигнализации пневмоцилиндров ССП-ПД14 для авиадвигателя ПД14

Основанием для разработки является необходимость внедрения для авиадвигателя ПД-14 и его модификаций системы сигнализации пневмоцилиндров (далее – система ССП) для контроля работы механизации двигателя. В России отсутствуют аналогичные системы, обеспечивающие выполнение предъявляемых требований по составу, функциональному назначению, месту установки, сохранению работоспособности в ″жестких″ условиях внешних воздействующих факторов.

Состав системы ССП:

а) высокотемпературные бесконтактные сигнализаторы СП-ПД14 с выводным жгутом, встраиваемые в пневмоцилиндры управления в количестве 8 штук;

б) жгуты ЖС-1, ЖС-2 для соединения сигнализаторов СП-ПД14 с блоком мониторинга БМ-14;

в) блок управления сигнализаторами пневмоцилиндров БУСП-ПД14 в виде платы, предназначенной для установки в БМ-14, и содержащий соответствующее количеству сигнализаторов количество каналов обработки сигналов.

Целью разработки является создание системы ССП, удовлетворяющей:

- требованиям по конструкции и условиям эксплуатации для применения на двигателе ПД-14;
- требованиям по работе блока управления БУСП-ПД14 в составе блока мониторинга БМ-14 на двигателе ПД-14.

Система ССП выдаёт информацию в блок мониторинга БМ-14 о смене крайних положений исполнительных элементов пневмоцилиндров и пневмоклапанов системы механизации авиадвигателя ПД-14:

а) при приближении исполнительного элемента к положению ближнего упора – наличие сигнала;

б) при удалении исполнительного элемента от положения ближнего упора – отсутствие сигнала.

Конструктивные параметры положения ближнего упора, обеспечиваемые конструкцией авиадвигателя:

- минимальный гарантированный зазор между СП-ПД14 и исполнительным элементом 0,5 мм;
- максимальный гарантированный зазор между СП-ПД14 и исполнительным элементом 2 мм.

Система ССП работоспособна и сохраняет свои технические и метрологические характеристики во время и после воздействия внешних воздействующих факторов (ВВФ) по КТ-160G/DO-160G.

Проблемы, которые были решены в процессе разработки системы ССП:

а) выбор метода определения смены крайних положений исполнительных элементов пневмоцилиндров с учётом условий эксплуатации;

б) обеспечение работоспособности с учётом требований по ВВФ, особенно по температуре (минус 60°С - 350°С), вибрации (5-2000 Гц, до 20g), водонепроницаемости, соляному туману и т.д.

Разработка конструкции системы, освоение и внедрение современных техпроцессов, выбор соответствующих материалов, комплектующих элементов позволило обеспечить выполнение требований, предъявляемых к системе ССП.

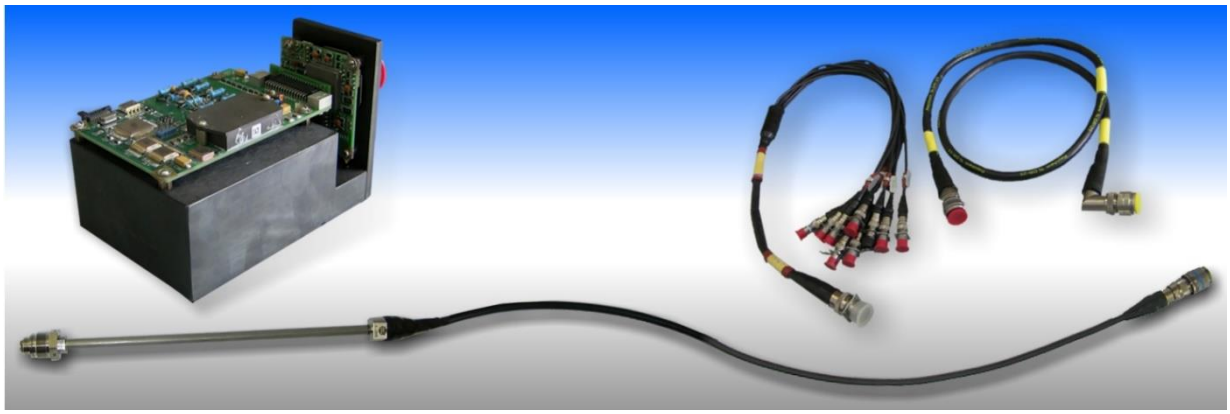

Рис. 5. Внешний вид система сигнализации пневмоцилиндров ССП-ПД14

Табл. 5 - Основные технические характеристики ССП-ПД14

Наименование	Значение параметра
Электропитание в двух режимах: а) от автономного генератора постоянного тока: - номинальное напряжение постоянного тока, В - диапазон напряжения постоянного тока, В б) от бортовой системы электропитания постоянного тока: -номинальное напряжение постоянного тока, В - диапазон напряжения постоянного тока, В	 32 31-33 28 22,0-30,3
Электропитание цепи подогрева от бортовой системы электропитания постоянного тока: - номинальное напряжение постоянного тока, В - диапазон напряжения постоянного тока, В	 28 22,0 - 30,3
Потребляемая мощность: - без учета работы подогрева, Вт, не более - суммарная при работе подогрева, Вт, не более	 3,5 8
Время готовности системы после включения электропитания: - без учета подогрева, с, не более - с учетом подогрева, мин, не более	 4 4
Время срабатывания системы, с, не более - для СП1, СП6, СП8 - для СП2, СП7	 0,1 0,3

Наименование		Значение параметра
- для СП3, СП4, СП5		1,0
Масса, кг, не более	БУСП-ПД14 СП-ПД14-1000 СП-ПД14-1200 ЖС-1 ЖС-2	0,20 0,25 0,25 0,90 1,10
Режим работы		продолжительный

Опытные образцы системы ССП прошли предварительные испытания, заканчиваются межведомственные испытания, РКД присвоена литера "О", проведены стендовые испытания в составе авиадвигателя ПД-14, испытания на летающей лаборатории, осуществлены поставки системы ССП для комплектования первых авиадвигателей ПД-14.

6. Разработка привода сдвижки реверсивного устройства ПСФ-14 для мотогондолы авиадвигателя ПД-14

Привод сдвижки реверсивного устройства (РУ) ПСФ-14 предназначен для мотогондолы двигателя ПД-14.

Привод обеспечивает сдвигание РУ с целью получения доступа к элементам двигателя ПД-14 при осмотре и техническом обслуживании. Впервые на авиационных двигателях российского производства применена механизированная система сдвигания РУ.

В состав привода входят:

- механизм поступательный МПС-ПД14 - 1 шт.;
- ключ специальный - 1 шт.

Особенностью изделия является габарит изделия:

в состоянии убранного штока – 1474 мм;

в состоянии выпущенного штока – 2634 мм.

Внешний вид электромагнита ПСФ-14 показан на рис. 6, технические характеристики представлены в табл. 6.

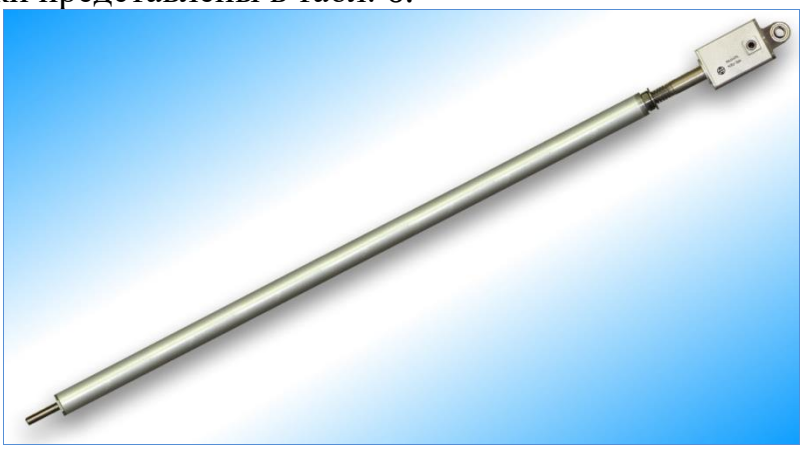

Рис. 6 - Внешний вид ПСФ-14

Табл. 6 – Технические характеристики ПСФ-14

Наименование	Значение, единица измерения

Количество оборотов в месте разъема под инструмент, необходимых для полного перехода привода из положения "Закрыто" в положение "Открыто" или обратно, не более	600
Ход штока МПС-ПД14	1160±5 мм
Рабочий момент в месте разъема под инструмент, не более	9,0 Н·м (0,92 кгс· м)
Частота вращения вала в месте разъема под инструмент, не более	2,5 с-1 (150,0 об/мин)
Нагрузка, действующая на МПС-ПД14 при сдвигании РУ в положение "Открыто"	250-750 Н
Нагрузка, действующая на МПС-ПД14 при сдвигании РУ в положение "Закрыто"	750-3550 Н
Масса привода ПСФ-14, не более	5 кг

Опытные образцы ПСФ-14 в полном объеме прошли предварительные, стендовые и летно-конструкторские испытания.

Дополнительный сведения

В отечественной печати широко освещены данные о проделанной работе:

1. Власов А.И. Автономная система электроснабжения системы автоматического управления авиадвигателя/ Власов А.И., Волокитина Е.В., Ковязин В.И., Никитин Н.В. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015.-№3.- С.14-18.
2. Власов А.И. Обзор современных разработок электротехнического оборудования АО «Электропривод» / Власов А.И., Конышев Д.В., Новоселова А.В.// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017.-№4.- С.12-19.
3. 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.
4. Рубцова Л.А., Малюгин А.А., Печёнкина Н.А., Киселёв Р.В. Особенности разработки малогабаритного слаботочного электромагнита с повышенным быстродействием для замка реверсивного устройства // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015.-№ 3. – С. 25-27.
5. Рубцова Л.А. Электромагнит – элемент силового привода. Особенности разработки / Рубцова Л.А., Малюгин А.А., Печёнкина Н.А., Киселёв Р.В. // Научно-технический семинар "Электропривод: теория, технология, практика и перспективы", Киров, 25 апреля 2018 г. Сборник тезисов докладов. – Киров: АО «Электропривод», 2018 – 117 с.

6. Волокитина Е.В. Электропривод реверсивного устройства для перспективных двухконтурных турбореактивных авиационных двигателей. /Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013.-№3.- С.30-33.
7. Волокитина Е.В. Математическая модель электропривода реверсивного устройства авиадвигателя ПД‑14./Волокитина Е.В., Тебеньков Ф.Г.// Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013.-№3.- С.42-44.