

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет», д.т.н., доцент

А.В. Еремин

«07» июля 2025г.

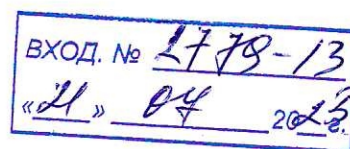
ОТЗЫВ

Ведущей организации ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на диссертационную работу Гарипова Искандера Радиковича «Электрифицированный компрессор гибридной силовой установки регионального самолета», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

Актуальность исследования

Воздушный транспорт занимает существенную долю в общей структуре грузоперевозок и перевозок пассажиров в мире и в России в том числе. По данным Министерства транспорта за 2024 год на долю воздушного транспорта в структуре перевозок пассажиров пришлось 1,076 % (111,7 млн. человек), при этом пассажирооборот (млрд. пассажиро-километров) составил 54,22% от общего числа. В структуре грузооборота за 2024 год на долю воздушного транспорта пришлось 1,9 млрд. тонно-километров (на 11 % больше чем в 2023 году), что составило 0,062 %. За счёт мобильности воздушный транспорт находит своё применение при транспортировке пассажиров и грузов на средние и длинные дистанции.

Силовые установки летательных аппаратов представляют собой высокотехнологичные устройства, тем не менее, величина термического КПД турбореактивных двухконтурных двигателей, которыми оснащены магистральные лайнеры, около 42%, а турбовинтовые двигатели, которые получили широкое распространение в региональных самолётах, имеют термический КПД на уровне 32%. В связи с чем, совершенствование энергоэффективности силовых установок летательных аппаратов магистральных лайнеров и, в большей степени региональных самолётов, может иметь значительный экономический эффект. Кроме того, с учётом научного консенсуса в области антропогенного воздействия на окружающую среду, декарбонизация транспорта, в том числе воздушного, является актуальной задачей.



MD

На сегодняшний день существует концепция полностью электрического самолёта, но с учётом уровня современных технологий, массовое внедрение таких летательных аппаратов нецелесообразно. Перспективно выглядит использование гибридной силовой установки, в которой электрическая машина подводит дополнительную мощность к валу газотурбинного двигателя в режиме пиковых нагрузок либо воздействует на часть ступеней компрессора.

Работа, посвящённая поиску новых технических решений, направленных на согласование совместной работы нагнетателя газотурбинного двигателя и электрической машины, объединённых в гибридную силовую установку летательного аппарата, а также развитию методики проектирования электрифицированного компрессора является весьма актуальной и представляет несомненный практический интерес.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показано научное и практическое значение проведенной работы. Обозначены методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, результаты апробации и структура работы.

В первой главе проведён анализ существующих схем ГСУ, рассмотрены особенности реализации ГСУ с механической и газодинамической связью. Выделены перспективные подходы к повышению удельной мощности ЭМ, включая совершенствование материалов и сопряжённое проектирование. На основе проведённого анализа выявлены недостатки существующих решений и сформулирован подход к разработке электрифицированного компрессора для ГСУ регионального самолёта.

Во второй главе разработана междисциплинарная методика проектирования электрифицированного компрессора на основе учёта электромагнитных, тепловых, газодинамических и механических процессов и их взаимосвязей. Методика включает трёхуровневую структуру проектирования: системный (оценка влияния электрификации на эффективность силовой установки), аналитический (первичное согласование параметров) и численный (детальное моделирование процессов). Описаны математические модели, итерационные схемы сопряжённого расчёта и программные средства для автоматизации проектирования.

В третьей главе представлены результаты разработки комплекса технических решений, включающего рекомендации по выбору конфигурации и параметров электрифицированного компрессора, с учётом существующего уровня развития электротехнических и конструкционных материалов. В главе проведён анализ типов электрических машин и систем охлаждения, обоснован выбор синхронной машины обращённой конструкции с постоянными

магнитами и жидкостным охлаждением. Выполнено численное исследование зависимости удельной мощности и КПД от параметров конструкции, определены ограничения, обеспечивающие техническую реализуемость электрифицированного компрессора.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния параметров электрифицированного компрессора на характеристики ГСУ регионального самолёта, в сравнении с альтернативными вариантами по показателям топливной и энергетической эффективности регионального самолёта. Для реализации данного исследования разработан комплексный алгоритм оценки эффективности применения электрифицированного компрессора в составе гибридной силовой установки регионального самолёта. Проведено моделирование типового полётного цикла и сравнение предложенной архитектуры с альтернативными вариантами ГСУ. Показано, что применение электрифицированного компрессора обеспечивает снижение расхода топлива на 10–11%. Проведена верификация расчётной модели на стенде и даны рекомендации по применению различных программ управления мощностью.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации

В итоге проделанной работы, решены следующие задачи:

- 1) Проведён анализ современных исследований в области ГСУ региональных самолётов и способов повышения удельных характеристик ЭМ.
- 2) Разработана междисциплинарная методика проектирования электрифицированного компрессора в составе ГСУ, с учётом взаимосвязи между электромагнитными, тепловыми, газодинамическими и механическими процессами на системном уровне.
- 3) Разработан комплекс технических решений, включающий рекомендации по выбору конфигурации и параметров электрифицированного компрессора, с учётом существующего уровня развития электротехнических и конструкционных материалов.
- 4) Исследовано влияние параметров электрифицированного компрессора на характеристики ГСУ регионального самолёта, в сравнении с альтернативными вариантами по показателям его топливной и энергетической эффективности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена междисциплинарная методика проектирования электрифицированного компрессора, которая предусматривает сопряженный выбор размеров проточной части компрессора и главных размеров ЭМ, при учете взаимосвязи между электромагнитными, тепловыми, газодинамическими и механическими процессами на системном уровне.
2. С применением междисциплинарной методики проектирования сформулирован комплекс технических решений, включающий рекомендации по выбору конфигурации и параметров электрифицированного компрессора (мощность, степень повышения давления, тепловой фактор, окружная скорость, частота вращения), позволяющие реализовать электрифицированный компрессор на базе ЭМ обращённой конструкции и осевого компрессора.
3. Предложен комплексный алгоритм оценки эффективности применения электрифицированного компрессора в составе ГСУ, который, в отличие от существующих, позволяет увязывать параметры электрифицированного компрессора с параметрами газотурбинного двигателя на основе баланса масс и энергий, что обеспечивает корректное определение влияния электрификации на рабочие процессы ГТД и на показатели эффективности самолёта на ранних этапах проектирования.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов диссертационной работы заключается в обосновании и разработке:

- междисциплинарной методики проектирования электрифицированного компрессора, обеспечивающей выбор его параметров с учётом взаимосвязи между электромагнитными, тепловыми, газодинамическими и механическими процессами;
- комплекса технических решений, включающий выбор параметров электрифицированного компрессора при существующем уровне электромагнитных и конструкционных материалов;
- алгоритма оценки эффективности применения электрифицированного компрессора в составе гибридной силовой установки регионального самолёта.

Реализация результатов работы

Основные положения и рекомендации диссертационной работы использованы:

- в образовательном процессе на кафедре электромеханики ПИШ «Моторы Будущего» ФГБОУ ВО УУНиТ в рамках дисциплин «Аэродинамика

и теплопередача в электрических машинах» по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и «Системы терморегулирования перспективных силовых установок» по направлению подготовки 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов».

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечивается использованием фундаментальных методов математической физики (метода конечных элементов и специального программного обеспечения, реализующего этот метод) и теории поля, теории электрических и магнитных цепей, теории электромеханического преобразования энергии, уравнения связи между электромагнитными нагрузками и главными размерами машины, результатами натурных исследований и экспериментов.

По материалам диссертации опубликовано 16 научных работы, включая 4 статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и WoS, 7 статей в сборниках научных конференций, входящих в РИНЦ и Scopus, получен 1 патент РФ на изобретение и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. (объем публикаций составляет – 6,5 п.л., авторский вклад- 5,2 п.л.)

Аннотация диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы.

Замечания по работе:

1. В рамках сравнительной оценки методик проектирования, представленной в таблице 2, указано, что проектная цель в предлагаемой методике: обеспечение газодинамической связи с ГТД и оптимизация характеристик ГСУ. Не ясно, каким образом оценивалась мера газодинамической связи и какие характеристики ГСУ предлагается оптимизировать?

2. В формуле (1) диссертации и аннотации предложено ввести коэффициент электрификации k_{el} ГСУ, который лежит в диапазоне от $1/\pi_k$ (π_k – суммарная степень сжатия компрессора) до 1 и характеризующий соотношение между тепловой и электрической энергией, подводимой к компрессору. Чем обоснован выбор нижней границы определения коэффициента?

3. На стр.48 диссертации рассмотрены потери в электрической машине, которые определялись в рассматриваемой методике. Отмечено, что электрические потери учитывались исходя из уравнения Джоуля-Ленца. При этом рабочая частота тока в обмотке статора достигает величины 2 кГц. Из текста диссертации не ясно, учитывались ли добавочные потери в

проводниках обмотки якоря и массивных конструктивных частях, в том числе постоянных магнитах?

4. Рисунок 20 в диссертационной работе иллюстрирует влияние коэффициента электрификации на эффективный коэффициент ГСУ для трёх размерностей ГТД (500 кВт, 1400 кВт и 5400 кВт). График получен из выражения (2) при условии, что КПД электрифицированного компрессора постоянный и равен 0,9. Из теории электрических машин известно, что при увеличении номинальной мощности возрастает и КПД при условии сохранения электромагнитных нагрузок. Почему отмеченный эффект не учтён при построении и анализе зависимости эффективного коэффициента ГСУ от коэффициента электрификации?

5. Утверждение «...4-полюсная ЭМ с 24 пазами и сосредоточенной двухслойной обмоткой, разбитой на 2 – 8 параллельных ветвей под напряжением 540 В – оптимальна для 75 – 300 кВт при частоте перемагничивания до 2000 Гц и частоте вращения ротора 22000 об/мин...» (стр. 58 диссертации) следовало бы подтвердить расчётами или ссылками на исследования или пояснить, что имеется в виду под определением «оптимальна».

6. Согласно рисункам 27 и 29 диссертационной работы при варьировании окружной скорости и частоты вращения ротора область максимального КПД не совпадает с областью минимальных потерь. Чем это может быть объяснено? Каково соотношение электрических, магнитных и добавочных потерь?

7. Выбранная конфигурация магнитной системы и обмоточных данных (обмотка с $q < 1$) приводят к относительно высоким пульсациям момента (6 – 20% согласно рисунку 28, при этом в процессе выбора оптимальных вариантов величина пульсаций ограничивается на уровне 10%). Оценивалось ли влияние пульсаций момента ЭМ на работу нагнетателя?

8. Автором предложено определять требуемый расход промежуточного теплоносителя, необходимый для охлаждения ЭМ, по зависимости (3) в автореферате. При этом число Рейнольдса в канале охлаждения, а также температура на выходе из каналов являются функцией расхода. Каким образом это учитывается в представленной методике?

9. В диссертации имеются описки, орфографические, синтаксические и пунктуационные погрешности. Следовало бы дать пояснения различиям связей на рисунке 3 автореферата. На рисунках 7, 8 в автореферате отмеченные автором области совпадают по цвету с масштабной шкалой, что затрудняет чтение графиков.

Заключение по работе

Несмотря на отмеченные недостатки, представленная соискателем диссертационная работа отвечает требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор – Гарипов Искандер Радикович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа и отзыв на диссертацию и автореферат обсуждены и одобрены на научно-техническом семинаре кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет, протокол №8 от 30 июня 2025 г.

Заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»
ФГБОУ ВО «СамГТУ», д.т.н., профессор,
дата 30.06.2025

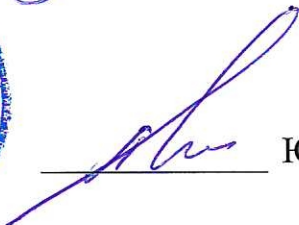
 Ю.А. Макаричев

Доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»
ФГБОУ ВО «СамГТУ», к.т.н., доцент,
дата 30.06.2025

 Ю.Н. Иванников

Подпись Ю.А. Макаричева и Ю.Н. Иванникова заверяю, ученый секретарь
Самарского технического университета
д.т.н.



 Ю.А. Малиновская

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный технический
университет»

30.06.2025г.

443100, РФ, г.Самара, ул. Молодогвардейская, д.244, Главный корпус.

Тел.: (846) 242-37-90