

ОТЗЫВ

официального оппонента

к.т.н., доцента Демидовой Галины Львовны

на диссертационную работу Гарипова Искандера Радиковича на тему:

«Электрифицированный компрессор гибридной силовой установки
регионального самолёта», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по научной специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

1. Актуальность работы

Современное развитие авиационной техники в значительной степени определяется требованиями к повышению топливной и энергетической эффективности, снижению эксплуатационных затрат и приведению силовых установок в соответствие с международными экологическими нормативами. В этом контексте разработка гибридных силовых установок (ГСУ), сочетающих в едином контуре традиционные газотурбинные двигатели (ГТД) и электрические приводы, представляет собой одно из приоритетных направлений в области авиационного двигателестроения.

Наиболее практико-ориентированной и технологически реализуемой на современном этапе считается параллельная архитектура ГСУ, не требующая радикального пересмотра аэродинамической компоновки планера и обеспечивающая наибольшую адаптивность к уже эксплуатируемым типам региональных воздушных судов. Существенным резервом повышения эффективности таких установок выступает электрификация отдельных узлов, в частности — компрессора, работающего в наиболее энергетически нагруженных режимах.

Ключевым инженерным и научным вызовом здесь является проектирование электрифицированного компрессора, конструктивно интегрирующего электрическую машину с компрессором ГТД. Реализация подобного

функционального объединения требует одновременного учёта электромагнитных, тепловых, газодинамических и механических процессов, а также взаимной адаптации конструктивных и энергетических параметров. Такие задачи лежат на стыке нескольких инженерных дисциплин и не могут быть решены традиционными расчётными подходами, основанными на независимом проектировании компонентов.

В этой связи актуальным представляется разработка методологии сопряжённого междисциплинарного проектирования, позволяющей оптимизировать характеристики электрифицированного компрессора в составе ГСУ с учётом его влияния на общий энергетический баланс и рабочие параметры силовой установки. Подобные подходы имеют не только научную новизну, но и непосредственную прикладную значимость для формирования высокоэффективных авиационных энергетических систем нового поколения. Таким образом, тематика диссертационного исследования Гарипова Искандера Радиковича соответствует современным вызовам авиационной науки и техники и обладает высокой степенью теоретической и практической значимости.

2. Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Гарипова Искандера Радиковича включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы.

Во введении обоснована актуальность разработки электрифицированного компрессора как ключевого функционального элемента гибридной силовой установки (ГСУ), способствующего повышению энергетической и топливной эффективности региональных самолётов. Сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость исследования. Обоснован выбор

направления, предполагающего сопряжённое проектирование электрической машины (ЭМ) и компрессора в составе ГСУ.

Глава 1 представляет анализ исследований и технологий в области создания гибридно-электрических силовых установок. Автор рассматривает тенденции развития рынка региональных самолётов, существующие схемы и компоненты гибридных силовых установок, включая способы сопряжения электрической части с газотурбинной. На основе обзора делается вывод о перспективности параллельной гибридной схемы для регионального самолёта, где электрификация компрессора позволяет повысить эффективность силовой установки.

Глава 2 посвящена разработке многодисциплинарной методики проектирования электрифицированного компрессора. Предлагается трёхуровневый подход к проектированию: системный уровень (увязка требований ГСУ с параметрами компрессора), аналитический уровень (первичный выбор параметров по упрощённым моделям) и численный уровень (детальный анализ с помощью вычислительных методов). Таким образом, автор стремится объединить электрические, тепловые, газодинамические и механические аспекты при проектировании.

Глава 3 описывает формирование комплекса технических решений для реализации электрифицированного компрессора. Здесь проведён анализ диапазонов рабочих параметров, согласование геометрических параметров электрической машины и компрессора, выбор типа и конфигурации электрической машины, а также проектирование общего облика (конструкции) электрифицированного компрессора. Автор сравнивает различные типы высокооборотных электрических машин (синхронно-реактивные, синхронные с постоянными магнитами, асинхронные) и варианты компоновки (например, обращённая конструкция ротора и традиционная) с точки зрения удельной

мощности, охлаждения и предельных скоростей, формируя рекомендации по оптимальному варианту.

Глава 4 посвящена исследованию влияния параметров электрифицированного компрессора на характеристики ГСУ самолёта. Предложен комплексный алгоритм оценки эффективности внедрения электрифицированного компрессора: по сути, методика расчёта, позволяющая на ранних этапах проектирования связать параметры электрифицированного компрессора с рабочими процессами ГТД (через уравнения баланса масс и энергии) и определить, как электрификация компрессора влияет на топливную эффективность и массу силовой установки. В этой главе представлены исходные данные и допущения для моделирования, описаны программы управления гибридной установкой, проведена верификация модели, а также приведены результаты сравнительного анализа разных вариантов силовой установки (с электрифицированным компрессором и без него). Отдельно рассмотрено сопоставление полученных результатов с данными других авторов.

В заключении обобщены ключевые результаты диссертационного исследования, подтверждена достижимость поставленной цели, представлены научные и практические итоги, а также обозначены перспективные направления дальнейших исследований, включая оптимизацию управления и расширение математических моделей.

3. Научная новизна темы диссертационного исследования.

В рамках выполненной работы получены новые научные результаты, обладающие оригинальностью и практической значимостью для области проектирования электротехнических компонентов авиационных энергетических установок. Основные элементы научной новизны заключаются в следующем:

Разработана формализованная методика междисциплинарного проектирования электрифицированного компрессора, обеспечивающая сопряжённый выбор параметров электрической машины и геометрии проточной части компрессора с учётом электромагнитных, газодинамических, тепловых и механических ограничений. Предложенный подход реализует системное увязывание конструктивных и энергетических характеристик в едином расчётном контуре и позволяет перейти от модульного проектирования к функциональной интеграции компонентов в составе гибридной силовой установки.

Сформирован методический подход к выбору конфигурации и параметров электрифицированного компрессора, включающий обоснование диапазонов мощности, степени повышения давления, теплового коэффициента, частоты вращения и предельной окружной скорости ротора. Подход базируется на анализе электрических машин обращённой конструкции и учитывает современные ограничения по материалам, охлаждению и прочностным характеристикам высокооборотных роторов.

Разработан алгоритм интегральной оценки эффективности применения электрифицированного компрессора в составе гибридной силовой установки, основанный на уравнениях баланса массы и энергии. В отличие от существующих методик системного моделирования, предложенный алгоритм обеспечивает количественную оценку влияния параметров электрифицированного узла на рабочие процессы в газотурбинном двигателе, включая перераспределение энергии между электрическим и тепловым контуром. Это позволяет учесть эффекты электрификации на уровне надсистемы уже на ранних этапах проектирования и оптимизации ГСУ.

4. Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработанная методика расширяет существующие теоретические подходы к проектированию электротехнических систем в авиации, формируя новый научный инструментарий, основанный на междисциплинарной интеграции. Практическая значимость подтверждается возможностью применения результатов в рамках эскизного и технико-экономического проектирования ГСУ, а также в образовательных и исследовательских центрах. Методика и алгоритм оценки эффективности обеспечивают на ранней стадии проектирования возможность рационального выбора компоновки, режимов работы и технических характеристик электрифицированного компрессора, адаптированных к требованиям конкретного типа ЛА.

5. Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы

Выводы и научные положения диссертации обоснованы и логически вытекают из проведённых исследований.

- Использованы базовые положения теории электромеханических преобразователей, газовой динамики и прочности;
- Применён аппарат системного анализа и параметрической оптимизации;
- Реализована численная верификация с использованием профессионального инженерного ПО (ANSYS Motor-CAD, Fluent, Maxwell, Static Structural);
- Проведено сопоставление с экспериментальными данными и результатами, имеющимися в публикациях.

Математические модели, расчетные схемы и результаты анализа представлены в диссертации полно и прозрачно, что свидетельствует о высокой степени достоверности научных выводов.

6. Апробация работы и публикации

Результаты исследования прошли широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях, включая «Климовские чтения», International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry, «Туполевские чтения» и др.

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе:

- 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ;
- 2 в журналах, индексируемых в Scopus;
- 7 в сборниках научных конференций, входящих в РИНЦ и Scopus;
- зарегистрирован 1 патент РФ и 2 программы для ЭВМ.

Объём публикационной активности и степень авторского участия соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

7. Положительные стороны диссертационной работы

– Актуальность выбранной научной задачи, связанной с повышением энергетической эффективности авиационных силовых установок за счёт интеграции электрических и тепловых компонентов, полностью соответствует современным направлениям развития авиационной техники и энергетики.

– Проведён обоснованный обзор современных подходов к проектированию электрических машин и элементов ГТД, что позволило автору выявить недостаточную проработанность методов сопряжённого проектирования и предложить собственную методику с высокой степенью интеграции.

– Работа отличается постановкой исследовательских задач на каждом уровне детализации, начиная с верхнеуровневого анализа параметров установки и заканчивая моделированием ключевых процессов в компрессоре.

– В диссертации продемонстрировано умелое применение комплекса профессиональных программных средств (в том числе ANSYS), что позволило

получить верифицируемые результаты моделирования, сопоставимые с данными, полученными на лабораторном стенде.

– Представленная методика проектирования и расчёта имеет выраженную прикладную направленность и может быть использована как в инженерной практике, так и в образовательном процессе, что подтверждается участием автора в научно-исследовательских проектах в интересах предприятий авиационной отрасли.

– Особое внимание уделено вопросам системной эффективности, что проявляется в разработке алгоритма оценки влияния электрифицированного компрессора на характеристики всей гибридной силовой установки. Такой подход отражает зрелое понимание взаимодействия подсистем на уровне надсистемной интеграции.

8. Замечания по диссертационной работе

1) Формулировки основных научных положений диссертации недостаточно чётки и корректны, в частности:

а) применение термина «многодисциплинарная» к методике проектирования вызывает вопросы. Обычно методику можно назвать комплексной, междисциплинарной или системной, однако слово «многодисциплинарная» в данном контексте звучит стилистически необычно и требует пояснения.

б) «Комплекс технических решений, включающий рекомендации по выбору конфигурации и параметров электрифицированного компрессора» формулируется как одно из положений. Однако, по сути, этот комплекс решений представляет собой метод или алгоритм проектирования, поэтому следовало бы представить его именно как методику (или алгоритм) выбора оптимальных параметров, а не просто перечисление рекомендаций. В текущей формулировке создаётся впечатление

перечисления результатов, тогда как научное положение должно отражать сущность предложенного метода.

в) «Результаты оценки эффективности применения электрифицированного компрессора в составе ГСУ регионального самолёта...» указаны третьим положением. Такая формулировка не корректна: сами по себе результаты оценки эффективности – это скорее выводы работы, но не научное положение. Научным достижением здесь мог бы быть именно предложенный алгоритм оценки эффективности, либо новая методика расчёта, а не просто полученные численные результаты. В тексте диссертации упоминается «комплексный алгоритм оценки эффективности внедрения электрифицированного компрессора» – вот его стоило вынести на защиту вместо абстрактных «результатов оценки эффективности». Таким образом, формулировки положений нечётко отражают научную новизну работы.

- 2) Предложенная в главе 2 междисциплинарная методика проектирования включает третий уровень, основанный на применении численных методов (решение систем уравнений, моделирование процессов в электрифицированном компрессоре с помощью ПО). Однако не до конца ясно, в чём состоит оригинальный вклад автора на этом этапе. Автор указывает, что расчёты электромагнитных, тепловых, газодинамических и механических процессов выполнялись с использованием известных программных комплексов (ANSYS Motor-CAD, Maxwell, Fluent, Static Structural и др.). Создаётся впечатление, что численный анализ сводится к применению стандартных коммерческих средств моделирования. Требуется пояснение какие новые элементы или адаптации внесены автором в эту часть методики. Например, разработаны ли авторские подпрограммы, модифицированы ли существующие модели, либо оригинально скомпонованы расчётные этапы? Без таких пояснений вклад

автора в численном моделировании представляется недостаточно прозрачным. Все расчёты в работе выполнены при фиксированных параметрах среды и материалов, без анализа влияния разбросов, неопределённостей или допусков.

- 3) В главе 3 рассматриваются разные типы электрических машин, схемы охлаждения, конструктивные компоновки, но отсутствует единый критерий оптимальности проектных решений. Оптимизация производится скорее эвристически, чем через многокритериальные методы (например, минимизация массы при ограничении по КПД и температуре). Нет чёткого математического формулирования задачи оптимизации, несмотря на наличие подходящего материала.
- 4) В начале четвёртой главы заявлен «комплексный алгоритм оценки эффективности внедрения электрифицированного компрессора», однако в тексте этот алгоритм не представлен в явном, формализованном виде. Ожидалось увидеть чёткое описание алгоритма псевдокод, описывающий последовательность действий и расчётов, входные/выходные параметры и критерии эффективности, однако представлена только блок-схема (рис. 41), таким образом, фактически данная методика оценки описана лишь словами и затем иллюстрируется расчетами.
- 5) Представленная в п.4.3. концепция управления гибридной силовой установкой изложена недостаточно строго с точки зрения терминологии и логики процессов. Формулировки «отдаёт команды», «повод электрической энергии» не соответствуют принятой технической лексике и снижают уровень проработки. Кроме того, не раскрыта архитектура взаимодействия подсистем: неясно, каким образом осуществляется

согласование между САУ ГТД и управлением ЭМ, отсутствует описание контуров обратной связи, приоритетов управления, ограничений по режимам и условий переходных процессов. В результате создаётся впечатление описательной, а не инженерно-формализованной схемы управления, что требует доработки для соответствия требованиям к системам управления авиационными энергетическими установками.

- 6) Несмотря на наличие лабораторного стенда и ссылки на верификацию, описание стендовых испытаний в диссертации остаётся на высоком уровне обобщения. Не раскрыты структура экспериментального стенда; тип используемых датчиков и точность измерений; описание процедуры эксперимента и условий; количественное сопоставление результатов, например, не приведена оценка расхождений между моделью и стендом по ключевым параметрам.
- 7) В диссертации обнаружены отдельные несоответствия в оформлении рисунков. В частности, некоторые рисунки имеют надписи и подписи на английском языке (например, рис. 6, 7, 10, 11), что выглядит не вполне уместно в русскоязычном тексте диссертации.

Вышеупомянутые недостатки не являются принципиальными и не снижают научной и практической значимости, а также общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Гарипова Искандера Радиковича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, и обладающей научной новизной, и практической значимостью. В ней изложены научно-обоснованные технические решения и представлены практические результаты по исследованию гибридных силовых установок региональных самолётов, имеющие существенное значение для развития авиационной промышленности.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени кандидата технических наук согласно п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842), а ее автор Гарипов Искандер Радикович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент:

к.т.н., доцент,
доцент факультета Систем
Управления и Робототехники

федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский
университет ИТМО»

Демидова Галина Львовна

15.08.2025

Адрес: Университет ИТМО, Кронверкский пр., д.49, лит. А, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101.
e-mail: demidova@itmo.ru

Кандидатская диссертация Демидовой Г.Л. защищена по специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации.

Подпись
удостоверяю
Менеджер ОПС
Виноградова А.Д.

